

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra zadávající téma diplomové práce

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Formula Student – řídicí elektronika trakčního střídače

Autor práce: **David Raichart**  
Vedoucí práce: **Luboš Streit**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David RAICHART**  
Osobní číslo: **E21N0033P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Výkonové elektronické technologie a pohony**  
Téma práce: **Formula Student – řídicí elektronika trakčního střídače**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

## Zásady pro vypracování

1. Definujte požadované parametry řídicích obvodů trakčního střídače.
2. Navrhněte obvodová schémata dílčích částí.
3. Navrhněte desky plošných spojů.
4. Osadte a oživte kompletní elektroniku.
5. Experimentálně ověřte funkci se silovou částí trakčního střídače.

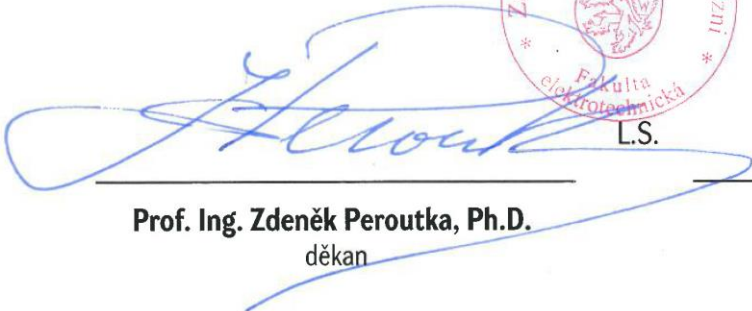

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem a sestavením sestavy střídačů pro pohon motorů do elektrické formule. Jedná se první prototyp plně elektrické formule konstruované univerzitním týmem Západočeské univerzity. Sestava obsahuje tranzistorové moduly, budící obvody umístěné na budících deskách, desky propojující budiče modulů schopné měřit různé parametry sestavy, hlavní řízení celé sestavy tvořené řídicí deskou a systémem RUMM, kondenzátorové desky měřící proud a připojující kondenzátory do meziobvodu. V práci se nachází definice parametrů jednotlivých komponent sestavy. Podle definovaných parametrů jsou vytvořeny a popsány jednotlivá schémata všech desek plošných spojů, které jsou obsaženy v sestavě. Další částí práce je návrh těchto desek ze zhotovených schémat. Práce obsahuje kompletní návrh dohromady šesti typů desek plošných spojů. Předmětem práce je také výroba a osazení všech desek. Postup výroby je v práci detailně popsán. Celá práce je zakončena sestavením celé sestavy a jejím experimentálním otestováním.

## **Klíčová slova**

E-formule, UWB Racing, Studentská formule, střídač, sestava střídačů, elektromotor, RUMM, tranzistorový modul, deska plošných spojů, buzení tranzistoru, budič, deska budičů, sběrná deska, řídicí deska, deska kondenzátorů, schémata

## **Abstract**

This thesis deals with the design and construction of an inverter assembly for driving motors in an electric formula. This is the first prototype of a fully electric formula designed by a university team from the University of West Bohemia. The assembly includes transistor modules, driver circuits located on driver boards, boards connecting module drivers capable of measuring various parameters of the assembly, main control of the whole assembly consisting of a control board and RUMM system, capacitor boards measuring current and connecting capacitors to the DC link. The definition of the parameters of the different components of the assembly is included in the thesis. According to the defined parameters, individual schematics of all the circuit boards included in the assembly are created and described. The next part of the work is the design of these boards from the made schematics. The work contains a complete design of six types of printed circuit boards in total. The manufacturing and fitting of all the boards is also the subject of the work. The manufacturing process is described in detail in the thesis. The whole work is concluded with the assembly of the whole assembly and its experimental testing.

## **Key Words**

E-formula, UWB Racing, Student formula, inverter, inverter assembly, electric motor, RUMM, transistor module, circuit board, transistor driver, driver, driver board, collector board, control board, capacitor board, schematics

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Streitovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, a metodické vedení práce. Další poděkování patří Matějovy Grimboschovi za pomoc s osazováním desek plošných spojů.

Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu No. SGS-2021-021.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Definování požadovaných parametrů řídicích obvodů trakčního střídače .....	- 2 -
1.1 Specifikace desky budičů.....	- 4 -
1.2 Specifikace sběrné desky .....	- 5 -
1.3 Specifikace řídicí desky .....	- 5 -
1.4 Specifikace desky kondenzátorů.....	- 7 -
2 Návrh obvodových schémat dílčích částí .....	- 8 -
2.1 Schémata Driveru .....	- 9 -
2.1.1 Hlavní schéma Driveru.....	- 9 -
2.1.2 Schéma vlastního budiče driveru.....	- 13 -
2.1.3 Schéma obvodu pro zajištění mrtvých časů .....	- 16 -
2.2 Schémata horního Collectoru.....	- 16 -
2.2.1 Hlavní schéma horního Collectoru.....	- 17 -
2.2.2 Schéma pro měření napětí DC linku .....	- 18 -
2.2.3 Schéma vybíjení DC linku.....	- 19 -
2.2.4 Schémata pro měření teplot .....	- 20 -
2.2.5 Schéma obvodu pro přepínání hodnot z teplotních čidel .....	- 21 -
2.2.6 Schéma obvodu teplotních čidel.....	- 22 -
2.3 Schéma dolního Collectoru.....	- 23 -
2.3.1 Hlavní schéma dolního Collectoru .....	- 23 -
2.3.2 Schémata pro měření teplot .....	- 24 -
2.4 Schéma řídicí desky Control.....	- 24 -
2.4.1 Hlavní schéma řídicí desky .....	- 25 -
2.4.2 Schéma RUMM.....	- 26 -
2.4.3 Schéma připojení sběrných desek.....	- 28 -
2.4.4 Schéma světelné signalizace pomocí LED .....	- 29 -
2.4.5 Schéma zdrojů .....	- 30 -
2.4.6 Schéma Binary In Out .....	- 31 -
2.4.7 Schéma připojení CAN.....	- 32 -
2.4.8 Schéma motorového konektoru .....	- 32 -

2.4.9	Schéma měření stejnosměrného proudu .....	- 33 -
2.5	Schéma horní desky kondenzátorů .....	- 34 -
2.6	Schéma dolní desky kondenzátorů.....	- 36 -
3	Návrh desek plošných spojů.....	- 37 -
3.1	Vize sestavy .....	- 37 -
3.2	Návrh desky driverů.....	- 39 -
3.3	Návrh horní sběrné desky .....	- 41 -
3.4	Návrh dolní sběrné desky .....	- 43 -
3.5	Návrh řídicí desky.....	- 44 -
3.6	Návrh horní desky kondenzátorů.....	- 46 -
3.7	Návrh spodní desky kondenzátorů.....	- 48 -
4	Osazení a oživení navrhnutých desek.....	- 49 -
4.1	Desky driverů.....	- 50 -
4.2	Sběrné desky .....	- 56 -
4.3	Řídicí deska.....	- 58 -
4.4	Desky kondenzátorů.....	- 59 -
5	Experimentální ověření funkce se silovou částí trakčního střídače.....	- 60 -
5.1	Experimentální ověření funkce .....	- 60 -
5.2	Experimentální sestavení celé sestavy .....	- 63 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 65 -
	Literatura .....	- 66 -
	Přílohy .....	I



## Seznam symbolů a zkratk

RUMM	Rice Universal Microcontroller Module
GND	GrouND (uzemnění)
RICE	Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
PWM	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
ADC	Analog/digital converter (analogo-digitální převodník)
DAC	Digital/analog converter (digitálně-analogový převodník)
MCU	Microcontroller (mikrokontrolér)
FPGA pole)	Field-programmable gate array (programovatelné hradlové
FIO	FPGA input/output (vstup či výstup hradlového pole)
GIO	MCU input/output (vstup či výstup mikrokontroléru)
CAN	Controller Area Network
SPI	Serial Peripheral Interface
UWB	University of West Bohemia
PCB	Printed circuit board
LED	Light emitting diode
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor (polem řízený tranzistor s izolovaným hradlem)
SAE inženýrů)	Society of automobile engineers (Společnost automobilních
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
TS	Tractive systém (vysokonapěťová část)

LVS	Low voltage system (Nízkonapěťová část)
NO	Normaly open (Za normálního stavu je prvek rozpojený)
NC	Normaly closed (Za normálního stavu je prvek sepnutý)
SiC	Silicon Carbide (Karbid křemíku)
IO	Integrovaný obvod
I/O	Input/Output (Vstup/Výstup)
THT	Through-hole technology
SMD	Surface Mount Device

## Úvod

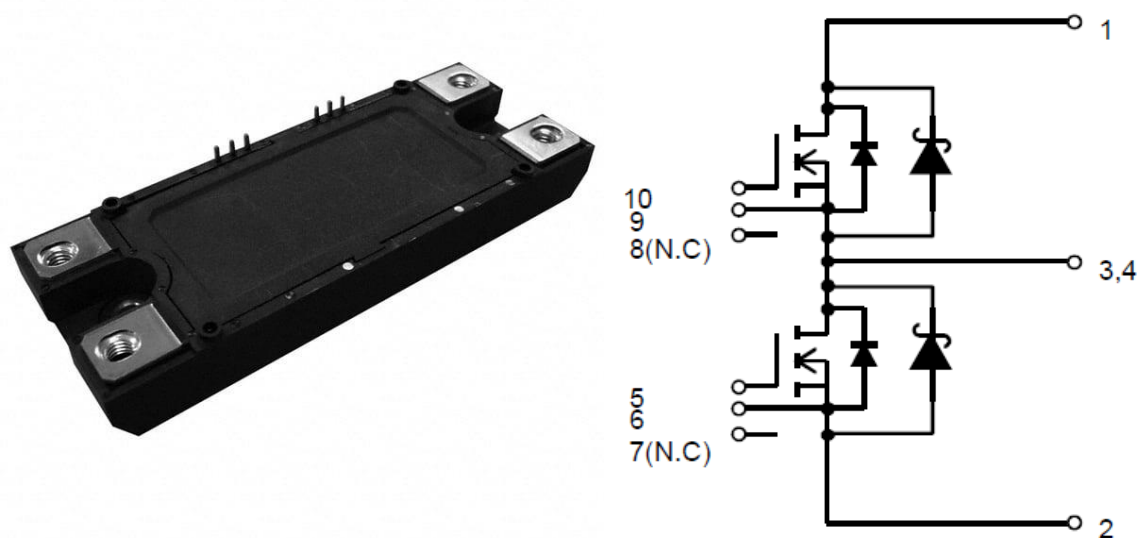
Hlavním důvodem návrhu této výkonové sestavy střídačů je použití v elektrické formuli. Formulí konstruuje celým tým společně. Jedná se o univerzitní tým UWB racing. Každý člen nebo skupina členů se specializuje na vytvoření jedné komponenty formule. Cílem po sestavení formule je účast týmu na mezinárodních závodech Formule SAE. Soutěž spočívá v různých závodních disciplínách. Před účastí na závodech musí formule projít obtížnou technickou kontrolou. Tým naší univerzity UWB racing se těchto závodů účastnil v minulých letech, ale pouze se spalovací formulí. Nyní je snaha sestrojít první prototyp formule čistě elektrické pro účast v jiné kategorii závodů.

Práce je zaměřena na sestrojení celé jedné komponenty formule. Jedná se o druhou nejdůležitější komponentu hned po trakční baterii, a to sestavu střídačů pro pohon elektromotorů formule. Sestava musí být schopná krom řízení motorů zajišťovat spoustu dalších funkcí celé formule, protože se v ní zároveň nachází hlavní řídicí jednotka, opatřená výkonným procesorem. Celkově je sestava tvořena dvanácti deskami budičů, umístěnými na výkonových modulech, vytvářející čtyři střídače. Dále z chladiče, na jehož každé straně je umístěno šest těchto modulů. Návrh a konstrukce chladiče není součástí této práce. Dále ze dvou desek spojujících desky budičů. Tyto spojující desky jsou zavedeny do řídicí desky, sloužící jako mozek sestavy. Před moduly se nachází další dvě desky, které připojují do meziobvodu kondenzátory Na meziobvod je připojena trakční baterie. Práce vychází ze dvou bakalářských prací, které se už o návrh snažily, ale nakonec nebyl dokončen ani zkonstruován. Jedná se o mojí bakalářskou práci [1] na návrh výkonové části sestavy a o bakalářskou práci Ondřeje Blažka [2], která pojednává o návrhu řídicích obvodů sestavy. V této práci jsou oba návrhy spojeny, předělány, zkonstruovány a otestovány.

Práce je rozdělena na několik částí reprezentujících postup celého návrhu. Na začátku se definují potřebné parametry, které od sestavy potřebujeme, poté jsou navrhnutá schémata jednotlivých částí tak, aby odpovídala požadovaným specifikacím. Další částí je návrh desek plošných spojů z vytvořených schémat. V poslední části je popsána výroba desek, jejich osazení a následné otestování. Výstupem této práce je zhotovená celá navrhnutá sestava střídačů.

## 1 Definování požadovaných parametrů řídicích obvodů trakčního střídače

Předmětem této práce je návrh elektrické jednotky, schopné zajistit řízení a napájení motorů v elektrické formuli. Na tuto jednotku je ale mnohem více vedlejších požadavků. Pohon formule je řešen tak, že každé kolo má svůj motor. Jedná se o třífázové synchronní motory s buzením pomocí permanentních magnetů. Motory jsou navrženy na míru přímo pro použití ve formuli. Každý motor je třeba řídit zvlášť. Řízení a napájení motorů je realizováno pomocí frekvenčního střídače. Motory jsou čtyři a každý potřebuje svůj střídač, tím pádem musí jednotka obsahovat čtyři střídače. Jedná se o klasické střídače tvořené novějším typem výkonových tranzistorů. V každém střídači bude tedy šest SiC MOSFET tranzistorů. Tyto tranzistory jsou ve formě výkonových modulů. Jeden modul obsahuje dva tyto tranzistory. Konkrétně se jedná o modul BSM120D12P2C005 [3].



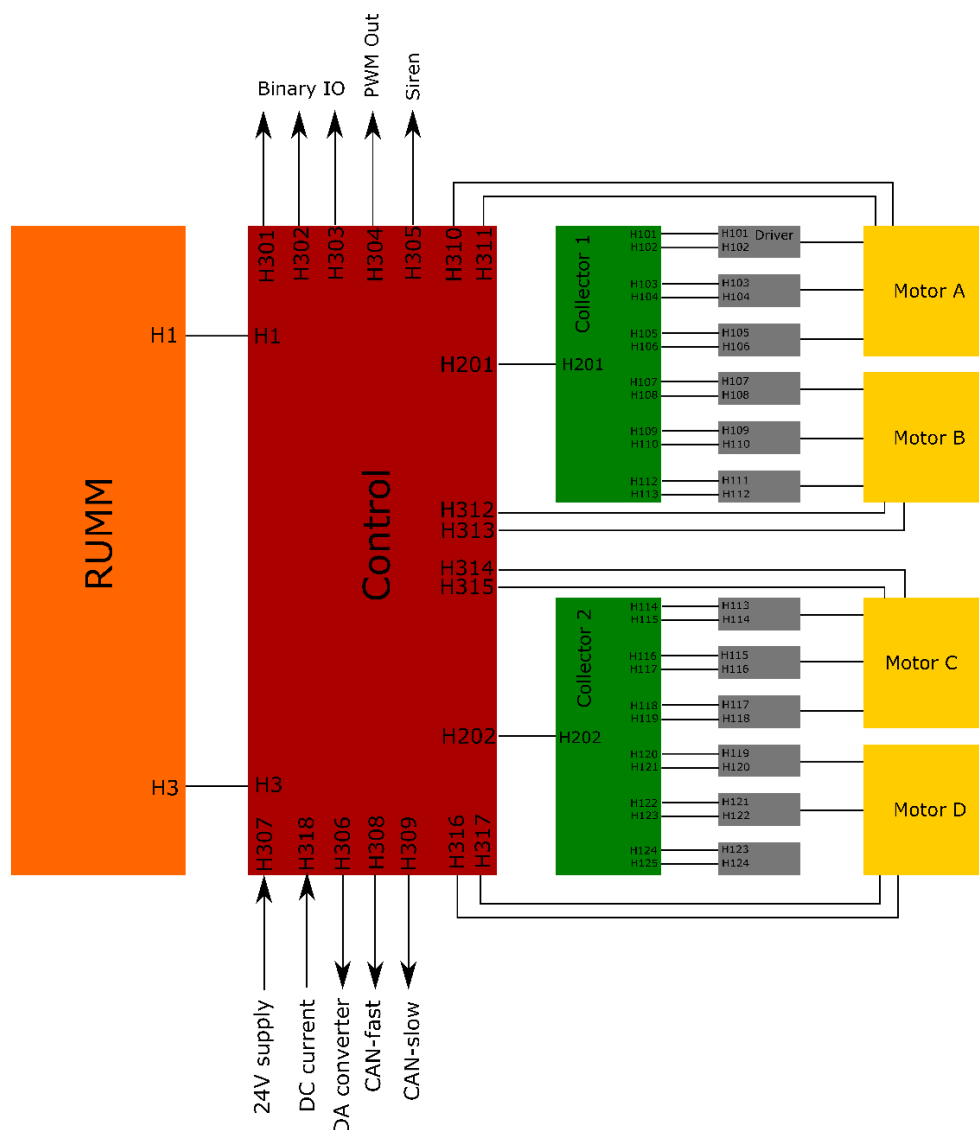
Obr. 1.1 Schéma vnitřního zapojení a pouzdro výkonového modulu převzato z [3]

V počátku návrhu střídačů nebyly zafixovány konkrétní motory, proto byly vybrány tyto moduly, které zajišťují dostatečnou výkonovou rezervu. Pro první verzi elektrické formule jsou tedy střídače značně předimenzovány. V průběhu budoucích závodů budou sbírána měřená data a další verze střídačů již bude optimalizována na konkrétní očekávané zatížení.

Jedním z původních návrhů bylo použití dvou střídačů a dvou motorů pro přední a zadní nápravu.

Každý modul je opatřen svojí vlastní deskou, zajišťující především buzení tranzistorů. Vedlejší funkcí této desky je měření výstupního fázového proudu z modulu. Moduly musí být nějakým způsobem chlazeny. Výkonové moduly jsou ochlazovány prouděním chladicí kapaliny ve vodním chladiči, na který jsou připevněny. Na plochem chladiči budou z obou stran namontovány moduly a jejich budící desky. Požadavky na chlazení jsou nízké, protože jak již bylo zmíněno, střídač je má značnou výkonovou rezervu. Dále je nutné nějakým způsobem posbírat signály z driverů. Toto propojení je realizováno další deskou. Konkrétně se jedná o dvě spojovací desky, každá spojuje šest modulů a tím vznikají dva střídače. Vedlejším požadavkem na tuto desku je schopnost měření stejnosměrného napětí, kterým bude napájen střídač, s tímto požadavkem souvisí i požadavek na schopnost připojit vybíjecí odpor do stejnosměrného obvodu. Na těchto deskách musí dojít i ke spojení a vyvedení signálů z budících desek. Signály jsou vyvedeny do další desky, která musí být schopná řídit všechny čtyři střídače a zároveň zpracovávat a vyhodnocovat dílčí signály z ostatních desek. U této desky je požadavek na velké množství vedlejších funkcí, ale především na komunikaci a další propojení s ostatními komponenty formule.

K vytvoření třífázové soustavy pomocí střídače je nutné zajistit stejnosměrný meziobvod. Na meziobvod bude připojena trakční baterie a obvod musí obsahovat hlavně dostatečně velké kondenzátory pro zajištění energie pro napájení střídačů a pro zvýšení stability napětí v meziobvodu. K připojení kondenzátorů do obvodu musí být vytvořeny další desky. Desky budou dvě, pro šest horních a šest dolních modulů. Vedlejším požadavkem na tyto desky je měření stejnosměrného proudu tekoucího z trakční baterie. Celá sestava musí být mezi sebou patřičně propojena. Na Obr. 1.3 jsou znázorněny všechna propojení mezi sestavou a výstupy ze sestavy do dalších komponent. Každý konektor má svoje předdefinované značení.



Obr. 1.2 Schéma zapojení jednotlivých desek sestavy se zakreslenými výstupními signály

## 1.1 Specifikace desky budičů

Každý tranzistor musí být opatřen budičem řídicího signálu, který je schopen spínat tranzistor příčným spínacím výkonem. Podle tohoto spínacího výkonu se musí zvolit vhodný integrovaný obvod budiče. V původním návrhu uvažovaném v mé bakalářské práci [1], byl vypočítán spínací výkon a zvolen budič ISO5852S-EP. Konkrétní integrovaný obvod ale díky celosvětové krizi zmizel z trhu a bylo nutné zvolit jiný budič. Jako náhrada byl zvolen budič 1ED3461Mc12M [4]. Budič musí být napájen dalším zdrojem. V tomto případě je nutný zdroj, který zvládne vytvořit napětí 18 až -2,5 V. Pro tuto funkci byl vybrán zdroj MGJ2D121802SC [6]. Dalším požadavkem na desku umístěnou na modulu je měření výstupního fázového proudu. Pro tuto funkci bylo vybráno čidlo ve formě

integrovaného obvodu. Konkrétně se jedná o čidlo ACS37003KMCATR-180B5 [7], které je schopné změřit proud až 180 A.

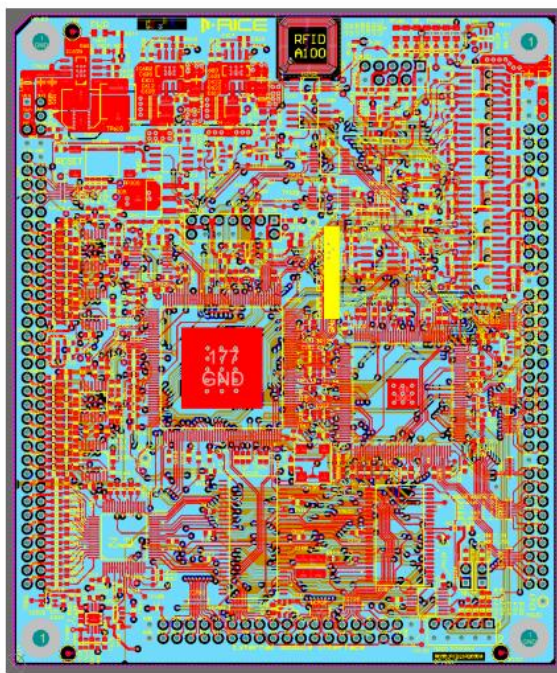
## 1.2 Specifikace sběrné desky

Hlavním požadavkem na tuto desku je již zmíněné spojení desek budičů. S tímto spojením souvisí i spojování signálů Ready a Fault, to je provedeno převážně pomocí hradla typu NAND s osmi vstupy typu 74AHC30PW [8]. Dalším důležitým požadavkem je spínání vybíjecího odporu. Je důležité spínání vybíjecího odporu galvanicky oddělit od ostatních obvodů na desce. K tomuto spínání je použit optron PLB171P [9] a je spínán výkonový rezistor, jehož odpor je 20 k $\Omega$  a maximální výkon 35 W. Výkonový rezistor bude umístěn přímo na chladiči a napojen do desky pomocí fastonů. Také je nutné, aby tato deska dokázala změřit napětí v DC-linku. Uvažujeme, že se toto napětí může pohybovat od 0 do 670 V a k jeho měření bylo vybráno čidlo opět ve formě integrovaného obvodu. Konkrétně se jedná o čidlo AMC1311B [10]. Neméně podstatným požadavkem na tuto desku je také měření teplot modulů, vstupní a výstupní vody do chladiče a teploty vybíjecího rezistoru. Teplota se měří z důvodu kontroly správné funkčnosti celého systému. K měření teploty budou použity čidla typu PT100. Popisovaná čidla budou napojena pomocí konektorů do této desky a jejich signály budou zpracovány obvodem ADS114S08IPBSR [11], který je schopný volit mezi čidly, kterou teplotu si přejeme vyčíst.

## 1.3 Specifikace řídicí desky

Nejdůležitějším požadavkem na tuto desku je její schopnost řídit čtyři střídače zároveň. Toto řízení bude prováděno na základě simulace jízdního modelu a požadavku řidiče. Pro tuto funkci je potřeba dostatečný výpočetní výkon. Předpokládá se, že by pro naše použití měl stačit mikrokontroler TMS320F28377, který je použit v jednotce RUMM, která bude použita na řídicí desce. RUMM je univerzální mikrokontrolerový modul, vyvinutý v RICE (Research and Innovation Centre for Electrical Engineering) na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni [12]. Vedlejší požadavky na desku zahrnují hlavně komunikaci s ostatními komponenty formule a schopnost zpracovat a vyhodnotit všechny měřené signály. Požadavek na komunikaci je přes datovou sběrnici typu CAN. Tyto sběrnice jsou zde realizovány dvě. Jedna rychlá, připojená přímo na speciální vstup do periférie CANu a druhá pomalá, připojená na univerzální přepínatelný vstup, který je nastaven jako druhý vstup do CANu. Rozdělení na pomalý a rychlý CAN je z důvodu

charakteru zprávy, která se na něj posílá. Rychlý je určen pro důležité komponenty, jako je volant, pedály a akcelerometry. Pomalý CAN je naopak určen pro více zpráv z komponent, které se v čase mění pomaleji, jako je třeba senzor teploty, čidlo napětí, brzdové světlo, pumpa. Řídicí deska musí být schopna zpracovat a vyhodnotit signály z měření fázových proudů, měření stejnosměrného proudu z baterie, měření stejnosměrného napětí v DC linku, měření teplot v sestavě střídačů, měření poloh motorů, a měření teplot motorů. Většina těchto signálů je přivedena na analogové vstupy RUMMu. Vzhledem k nedostatku počtu analogových signálů jsou některé převedeny na digitální pomocí dalších obvodů a až následně zpracovány procesorem. Dalším požadavkem na procesor je schopnost zajistit zvukovou signalizaci pomocí sirény. Pro další možné požadavky, které by mohly v budoucnu vzniknout, je potřeba na desku umístit několik univerzálních výstupů (vstupů), pomocí kterých bude možné tyto požadavky realizovat.

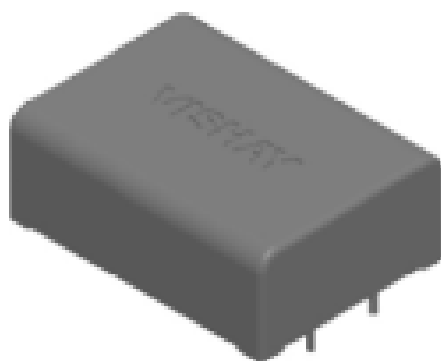


Obr. 1.3 Náhled PCB modulu RUMM převzato z [12]



#### 1.4 Specifikace desky kondenzátorů

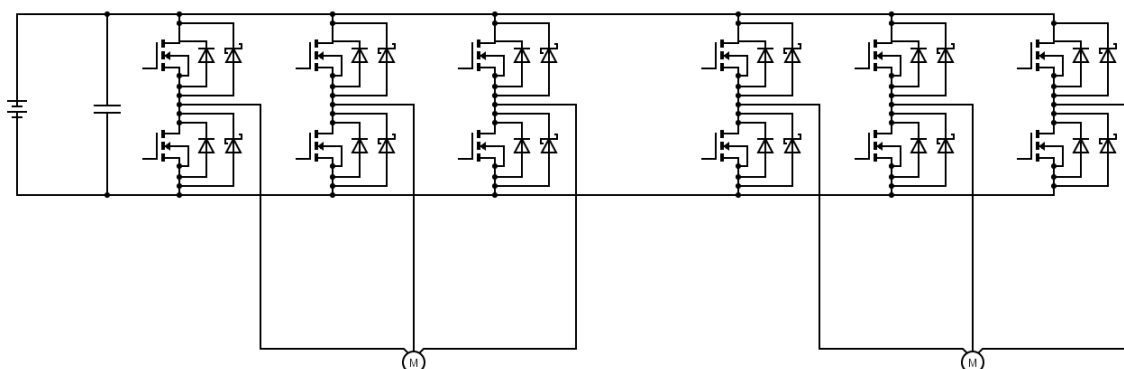
Na tuto desku není kladeno tolik požadavků, ale je důležité, aby kondenzátory na ní umístěné byly schopny dodávat dostatečné množství energie tranzistorům při tvoření třífázových průběhů. Připojení kondenzátorů musí být provedeno tak, aby parazitní indukčnost propojení byla co nejmenší. Hodnoty kondenzátorů byly zvoleny podle původního uvažovaného kondenzátoru, který byl vypočítán a vybrán v bakalářské práci [1]. Vybrány byly svitkové metalizované kondenzátory MKP1848S [13], jejichž parametry odpovídají původním uvažovaným. Každý z těchto kondenzátorů má kapacitu 30  $\mu\text{F}$  při maximálním napětí 700 V stejnosměrných. Tyto kondenzátory budou rozmístěné na dvou deskách a bude jich dohromady čtrnáct. Jediným vedlejším požadavkem je měření stejnosměrného proudu. Toto měření bude prováděno pomocí stejného integrovaného obvodu jako měření fázových proudů ACS37003KMCATR-180B5 [7]. Požadavek na maximální možný stejnosměrný proud je něco kolem 184 A. Jak již bylo zmíněno výše, toto čidlo má maximální proud 180 A, proto musíme použít dvě čidla, a to na každé desce jedno. V řídicí desce musí být kromě zpracování a vyhodnocení zajištěno také sčítání obou proudů. Proudů se sčítají z důvodu nedostatku analogových vstupů a při měření je důležitý pouze celkový proud.



Obr. 1.4 Pouzdro použitého kondenzátoru převzato z [13]

## 2 Návrh obvodových schémat dílčích částí

Náplní následujících kapitol této práce je návrh dohromady šesti různých typů desek a schémat. Jedná se o desku driveru, horní sběrnou desku, spodní sběrnou desku, desku řídicí, horní desku kondenzátorů a spodní desku kondenzátorů. Celá sestava je jasněji vyobrazena v dalších kapitolách pomocí 3D modelu. Středem sestavy střídačů je vodní chladič. Na chladič je z obou stran připevněno šest výkonových modulů. Jeden modul obsahuje vždy dva SiC mosfet tranzistory. Tyto moduly skládají dohromady čtyři střídače. Na Obr. 2.1 je vyobrazeno obvodové schéma výkonové části dvou střídačů. Na každém modulu je umístěna deska budičů obsahující budící obvody pro horní a dolní tranzistor. Šest horních desek budičů je propojeno pomocí horní sběrné desky a šest dolních desek budičů je propojeno dolní sběrnou deskou. Na výkonové moduly jsou připojeny kondenzátorové desky opět z každé strany jedna. Sběrné desky jsou na jednom konci propojeny s řídicí deskou, na které bude dále připojena deska RUMMu.



Obr. 2.1 Schéma výkonové části dvou střídačů složených z výkonových modulů

Desky kondenzátorů se odlišují pouze orientací, a schéma mají totožné. Sběrné desky nejsou totožné, tím pádem zde budou představena rozdílná schémata obou desek. Každá deska je představována schématem hlavním a dílčími schématy vedlejšími. Všechna hlavní schémata budou dopodrobna popsána v samostatných kapitolách. Veškeré obvody byly navrženy v programu Altium designer. Základem celé sestavy jsou desky driveru. Každá z těchto desek je umístěna přímo na výkonovém modulu. Její hlavní funkcí je řízení dvou SiC Mosfet tranzistorů, nacházejících se ve výkonovém modulu. Dále zajišťuje měření proudu na výstupu z modulu a komunikuje se sběrnou deskou. Výkonové moduly jsou

umístěny na vodním chladiči z obou stran. Z každé strany je šest modulů se šesti deskami driverů. Těchto šest driverů spojuje vždy sběrná deska z každé strany. Sběrná deska slouží především k výměně informací mezi drivery a řízením. Na horní desce se navíc nachází měření napětí DC linku a vybíjecí obvod napojený na obvod bezpečnostního vypnutí formule (angl. Shutdown Circuit). Spodní deska se kromě absence výše zmíněných obvodů liší také orientací a obsahem relé, které slouží k aktivaci obvodu bezpečnostního vypnutí formule pomocí řídicího systému střídačů. Obě sběrné desky jsou na konci kolmo připojeny k řídicí desce. Na řídicí desce se kromě modulu procesorové desky RUMM nacházejí hlavní zdroje celého systému a konektory na propojení různých periférií a komunikací se zbytkem formule. Kondenzátorové desky jsou nejjednodušší a slouží pouze k připojení kondenzátorů do DC linku, napojení DC linku na jednotlivé moduly z obou stran a k měření stejnosměrného proudu DC linku. Všechny schémata jsou umístěna v plném rozlišení v přílohách této práce.

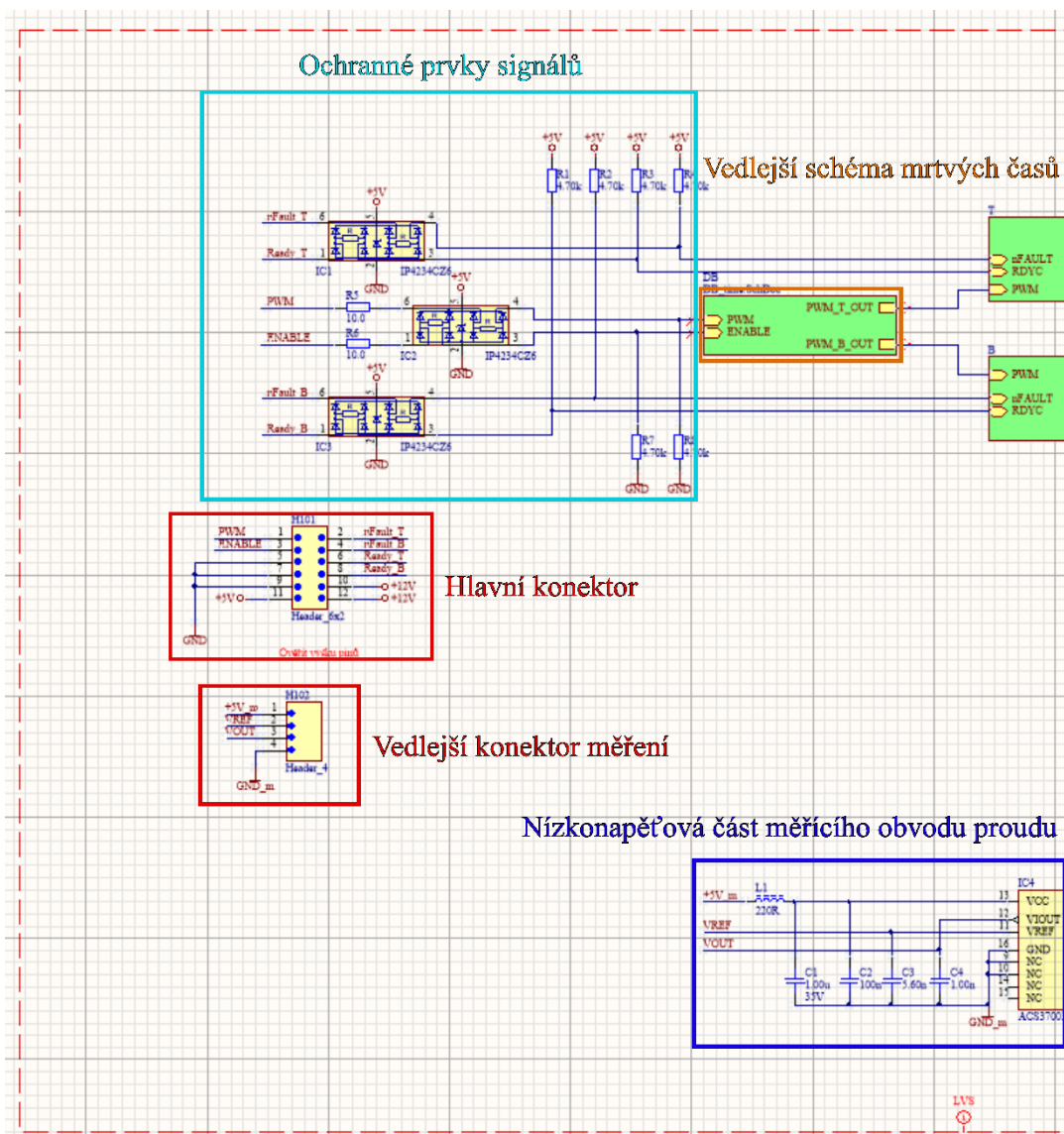
### 2.1 Schémata Driveru

Deska driverů je vyobrazena jedním hlavním schématem a dvěma vedlejšími schématy. Jedná se o hlavní schéma Driver\_Main a dvě dílčí schémata. Driver obsahující samotný budicí obvod a DB\_time, kde se nachází obvody pro zajištění mrtvých časů při spínání tranzistorů. Při vytváření těchto schémat bylo vycházeno z původního návrhu vytvořeného v mé bakalářské práci [1], ovšem na všech dílčích schématech byly provedeny nemalé změny. Oproti původnímu návrhu byl přidán obvod na měření fázového proudu tekoucího z výkonového modulu. Hlavní čip budiče se musel kompletně vyměnit, včetně jeho celého zapojení z důvodu nemožnosti sehnat původní čip skladem. Signalizační LED byly přesunuty z hlavního schématu do schémat dílčích. Ve schématu na mrtvé časy byla nahrazena některá hradla hradly univerzálními pro snadnější realizaci a z důvodu nedostatku čipů na trhu.

#### 2.1.1 Hlavní schéma Driveru

Schéma je rozděleno na dvě části. Nízkonapěťovou část a vysokonapěťovou. Nízkonapěťová část je popsána na Obr. 2.2 V nízkonapěťové části se mimo dílčích schémat nacházejí ochranné prvky na vstupní a výstupní signály vedoucí do desky. Jedná se o pull-up a pull-down rezistory a o přepěťovou ochranu. Jako vstupní signály považujeme signál pulzně šířkové modulace (PWM) a aktivační signál tranzistorů (Enable). Jako výstupní signály považujeme signál vyhodnocené chyby pro horní a dolní

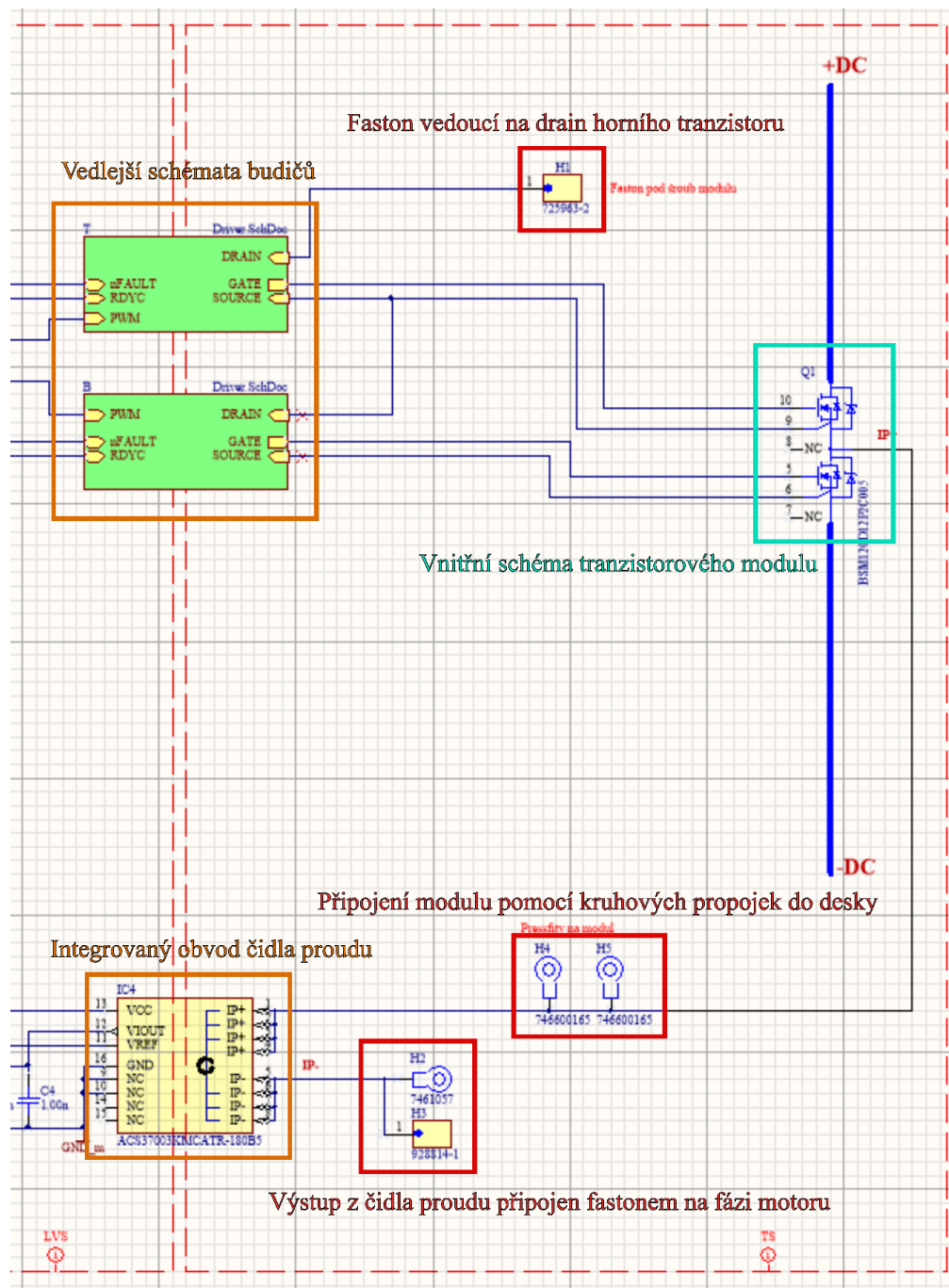
tranzistor (nFault\_T, nFault\_B). Další výstupní signály vedoucí z této desky jsou z čidla měření proudu. Jedná se o analogové signály, a to signál referenčního napětí (VREF) a signál reprezentující změřený proud podle výše napětí (VOUT). Tyto signály vzhledem ke svému analogovému charakteru neobsahují ochrany v podobě pull down a pull up rezistorů, ani v podobě přepět'ové ochrany. Jako poslední signály jsou signály sloužící k indikaci připravenosti budiče a zároveň sloužící jako vstup pro resetování budičů. Opět pro horní a dolní tranzistor zvlášť (Ready\_T, Ready\_B). Další komponentou, nacházející se v nízkonapět'ové části schématu, jsou konektory pro výše zmíněné signály. Jedná se o konektor hlavní, obsahující signály Ready, PWM, Enable, Ready, dále napájení +12 a +5 voltů a GND. Konektor na sběrnou desku má dohromady dvanáct pinů. Pro zem tři piny a pro napájení +12 voltů dva piny. Dalším konektorem je konektor od čidla proudu, obsahující dva výše zmíněné analogové signály VREF a VOUT. Také obsahuje analogové napájení +5 voltů a analogovou zem. Vývod signálů je rozdělen do dvou konektorů ze dvou důvodů. Prvním je oddělení digitální a analogové části z důvodu eliminace vzájemného rušení těchto dvou systémů. Druhým důvodem je nutnost zachovat izolační bariéry na desce a zároveň udržet co nejmenší rozměry. Zmiňovaný problém bude více patrný v dalších kapitolách o rozvržení desky plošných spojů. V nízkonapět'ové části se nachází i výstupní část čidla pro měření proudu, doplněná o několik kondenzátorů navržených podle doporučeného zapojení převzatého z datasheetu čidla [7]. Indukčnost na přívodu analogového napájení zde slouží pro eliminaci proudových špiček.



Obr. 2.2 Obrázek nízkonapěťové části hlavního schématu budiče

Ve vysokonapěťové části schématu můžeme vidět druhou část čidla na měření proudu. Vstup do tohoto čidla je proveden přes kruhové propojky, které jsou zapájeny do desky a napojeny na výstup z výkonového modulu. Toto napojení je na schématu znázorněno. Výstup z čidla vedoucí na fázi jednoho z motorů, je vyveden pomocí pressfitu a fastonu. V praxi bude použita pouze jedna z těchto možností. Z důvodu očekávaného velkého proudu je vstup a výstup do čidla proveden vždy přes 4 piny. Dále můžeme ve vysokonapěťové části vidět výstupy z driverů, vedoucí na naznačené schéma tranzistorů. V horní části je umístěn další faston, sloužící pro napojení horního drainu na kladný pól DC linku. Z tohoto fastonu povede drát na kruhovou propojku připojující DC link do modulu. Schéma výkonového modulu je pomyslně připojeno na DC link. Toto připojení

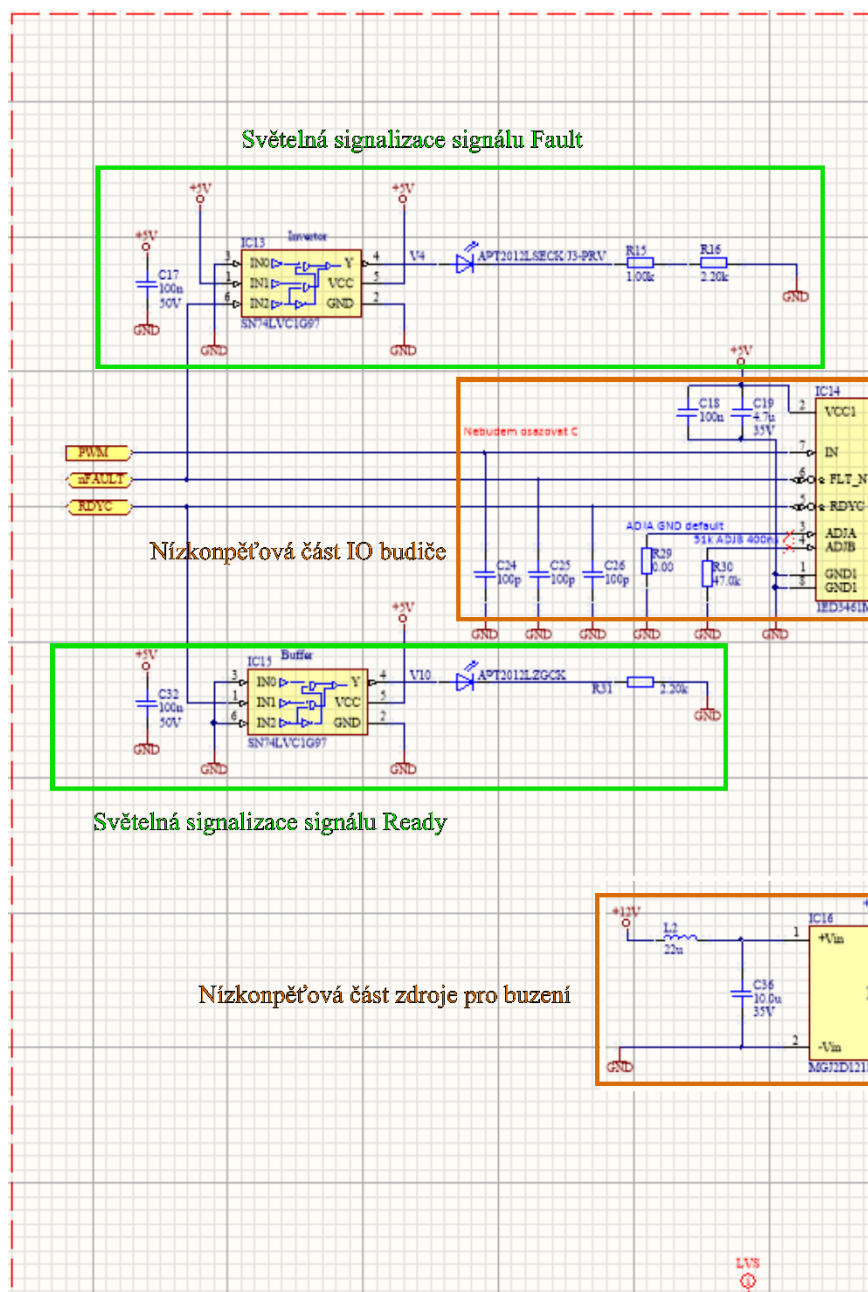
bude provedeno stejným typem kruhových propojek, jaké jsou použity na vyvedení výstupní fáze z modulu do desky. U propojek, které jsou použity k vyvedení výstupní fáze do desky, bylo nutné provést úpravu a propojky zmenšit, aby bylo dosaženo vhodné výšky desky nad výkonovým modulem. Tím pádem jsou propojky připojující DC link vyšší než propojky připojující výstup z modulu.



Obr. 2.3 Obrázek vysokonapěťové části hlavního schématu budiče

### 2.1.2 Schéma vlastního budiče driveru

Toto schéma se v hlavním schématu nachází dvakrát, pro horní a dolní tranzistor. Obě zapojení jsou totožná, jen vstupy a výstupy z tohoto schématu jsou zapojeny rozdílným způsobem, jak je vidět v předešlé kapitole. Opět se schéma dělí na vysokonapěťovou a nízkonapěťovou část. V nízkonapěťové části se nachází signalizační LED pro chybový výstup a pro kombinovaný signál připravenosti a resetování budiče. Hradla pro rozsvícení LED jsou opět realizovaná hradly univerzálními. V nízkonapěťové části se nachází také část hlavního obvodu budiče. Kondenzátory umístěné na signálových vstupech a výstupech jsou zde pro případné doladění signálů a případného potlačení rušení. Na desce zatím nebudou osazeny. Další dva kondenzátory u napájení budiče mají funkci jako rychlá zásobárna energie. Rezistory na pinech ADJA a ADJB jsou použity pro nastavení desaturační ochrany budiče. Poslední komponentou v nízkonapěťové části je část zdroje pro buzení tranzistorů, ke které je sériově připojena indukčnost pro vyhlazení proudů a paralelně kondenzátor pro vyhlazení napětí.

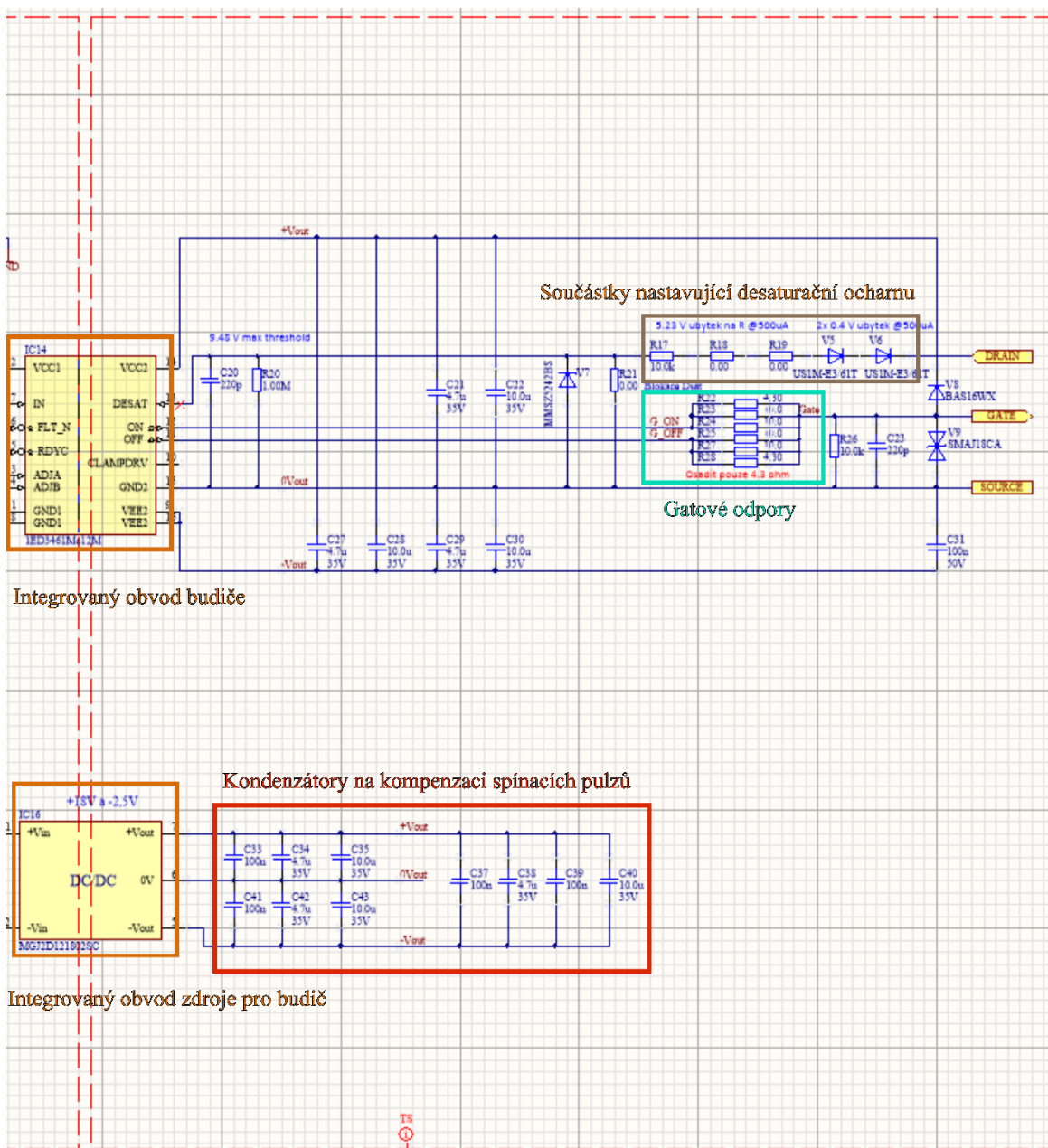


Obr. 2.4 Obrázek nížkonpěťové části vnitřního schématu budiče

V druhé části schématu se opět bavíme o vysokonpěťové části, která musí být oddělena od té nížkonpěťové podle pravidel závodu [14]. Ke druhé části budiče jsou připojené součástky, zajišťující desaturační ochranu. Je nutné zmínit, že ve skutečnosti se nejedná přímo o desaturační ochranu, protože desaturace u mosfetových tranzistorů není možná. Ve skutečnosti jde o ochranu nadproudovou, pojmenovanou nepřesně jako desaturační. Výstup na gate tranzistoru je opatřen gatovými odpory, jsou zde dvě varianty osazení odporů. Požadovaná hodnota odporu, určená podle potřebného budícího proudu, je kolem 5 ohmů. Osazen bude tedy buď jeden velký 4.3 ohmový rezistor nebo dva menší 10



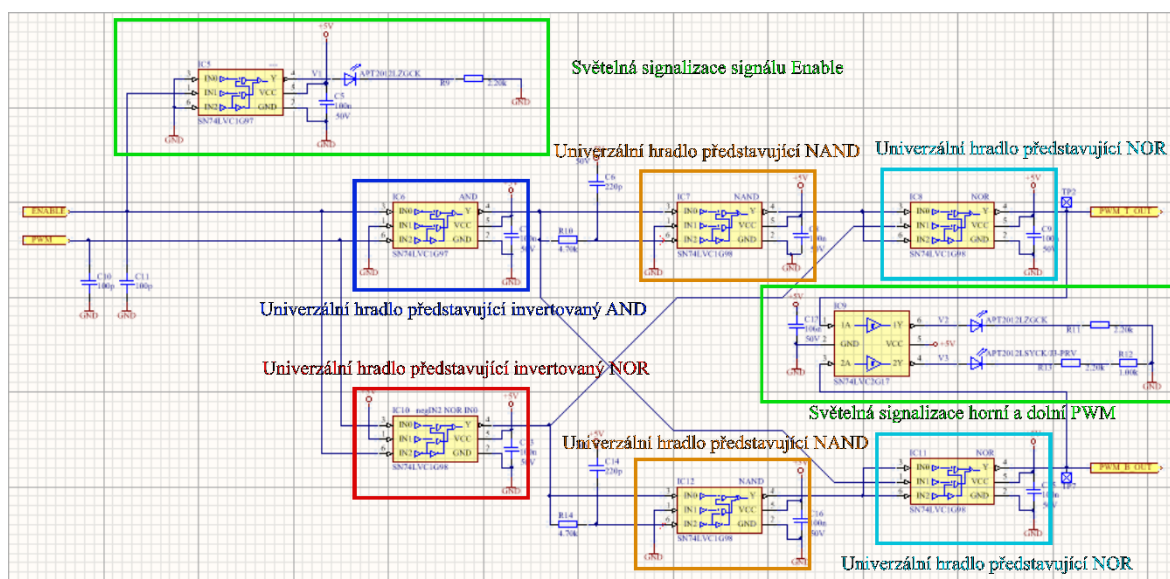
ohmové jak pro zapínací, tak vypínací pulz do gate. Vstupní piny vedoucí na zdroj pro buzení jsou opatřeny velkým množstvím kondenzátoru z důvodu vytvoření zásobárny energie pro spínací pulzy přiváděné na tranzistor. Tyto kondenzátory jsou ve schématu na Obr. 2.5 umístěny jak u zdroje, tak u budiče. Ideálně by měli být hlavně u budiče, ale kvůli přehlednosti schématu jsou takto rozloženy.



Obr. 2.5 Obrázek vysokonapěťové části vnitřního schématu budiče

### 2.1.3 Schéma obvodu pro zajištění mrtvých časů

Schéma obvodu obsahuje pouze logickou nízkonapěťovou část. Jeho funkcí má být zajištění mrtvých časů mezi spínáním horního a dolního tranzistoru, aby nedošlo k větrovému zkratu. Signály pro horní a dolní tranzistor byly sloučeny tak, že jsou ovládány signály Enable a PWM, kde signál Enable povolí spínání tranzistorů a signál PWM rozhoduje, jestli je sepnut horní nebo dolní tranzistor. Mrtvý čas mezi jejich sepnutím je zajištěn vždy, a to hardwarově. Tímto je zaručena větší odolnost vůči rušení, než v případě vedení jednotlivých signálů pro horní a dolní tranzistor až do procesoru. Ve schématu jsou i tři signalizační LED. Pro signál Enable a pro horní a dolní PWM. Logika je složena z univerzálních hradel, jejichž funkce se určuje podle jejich zapojení do obvodu. Dané hradlo, které univerzální obvod představuje, je vždy označeno ve schématu nad jeho schématickou značkou. Každé hradlo je navíc opatřeno svým vlastním kondenzátorem. Aktivace signalizační LED u horní a dolní PWM není provedena univerzálním hradlem ale duálním bufferem.



Obr. 2.6 Obrázek schématu mrtvých časů

## 2.2 Schémata horního Collectoru

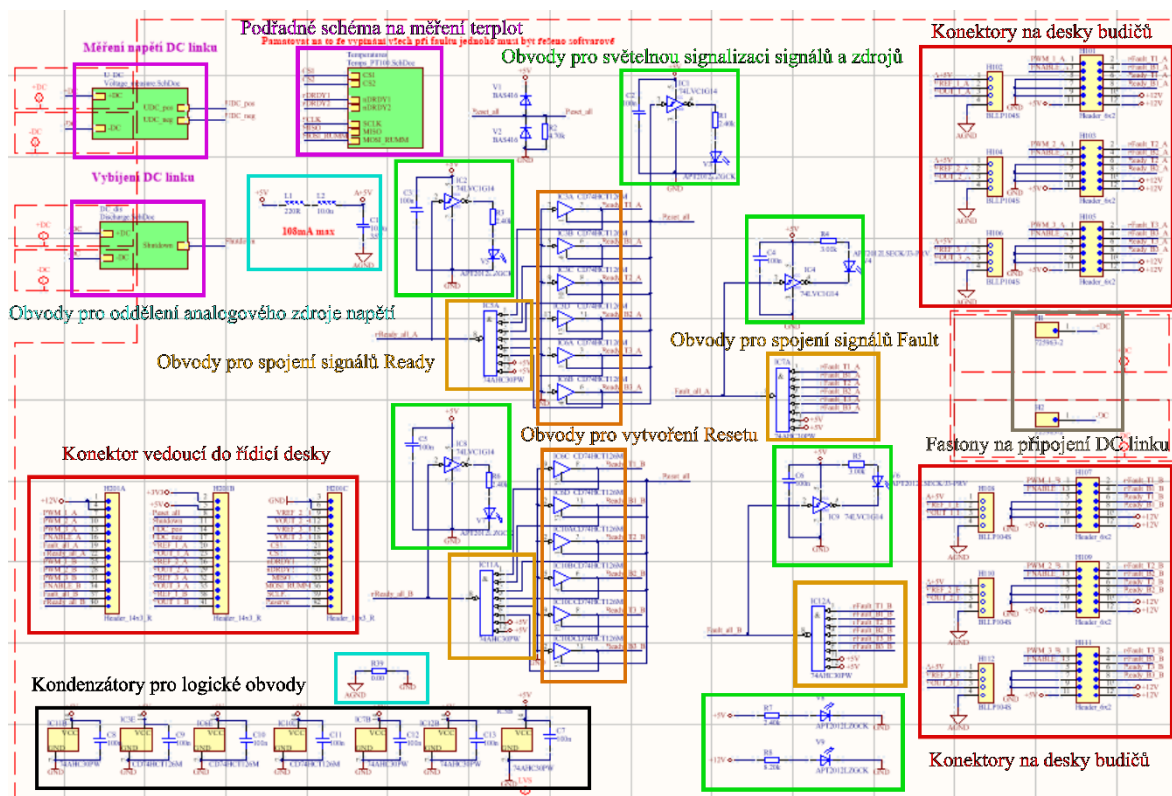
Sběrné desky byli navrhovány především za účelem posbírání signálů z desek budičů. Každá ze dvou sběrných desek musí být schopna posbírat signály konkrétně ze šesti desek budičů. Horní a dolní deska collectoru se liší hlavně vedlejšími obvody a schémata. Měření napětí a vybíjecí obvod se nachází pouze na desce horní. Naopak na desce dolní se nachází

schéma schopné vybavit obvod bezpečnostního vypnutí formule (shutdown circuit) Hlavní schéma collectoru, neboli sběrné desky, obsahuje tři dílčí schémata. Dílčí schéma pro měření napětí DC linku, dílčí schéma pro vybíjecí obvod DC linku a dílčí schéma pro měření teplot. Schéma pro měření teplot obsahuje další dílčí schémata přímo s čidly teplot a dílčí schémata pro přepínání analogových signálů z čidel, vedených do řídicí desky. Topologie desky zůstala oproti méj bakalářské práci [1] podobná, ale jinak se deska kompletně předělávala. Muselo se zde počítat s jiným způsobem spojování signálů z budičů. Přibylo měření proudu každé fáze na deskách budičů a konektory pro tyto změřené signály. Oproti bakalářské práci byla navrhována jak horní, tak spodní sběrná deska s rozdílnými vedlejšími funkcemi. Také byly přidány kompletní obvody pro měření teplot tranzistorů, vody chladiče a kondenzátorů v DC linku. Střídače jsou označeny A, B, C, D. Tato horní spojovací deska spojuje šest tranzistorů, které tvoří dva střídače, a to střídač A a B.

### 2.2.1 Hlavní schéma horního Collectoru

Na hlavním schématu kolektoru se nachází převážně nízkonapěťová část až na pár výjimek, a to připojení měření napětí a vybíjecího obvodu do DC linku pomocí vyobrazených fastonů. Hlavní prvky schématu jsou konektory propojující šest desek budičů. Také se v hlavním schématu nachází hlavní konektor fungující jako spojení všech budičů s řídicí deskou. Další funkcí hlavního schématu je spojení Fault a Ready signálů a vytvoření signálu reset pomocí logických hradel. Resetování chyby u budiče je provedeno uzemněním signálu ready. Signál ready funguje tedy jako signalizace připravenosti budiče a zároveň pro resetování budičů. Resetování budičů je realizováno pomocí řízeného hradla, při jehož aktivaci dojde k uzemnění signálů Ready a tím k resetu budičů. Díky použití tohoto hradla lze uzemnit všechny signály Ready, aniž by došlo k jejich spojení. Spojení signálů je provedeno tak, že pokud jeden z budičů zahlásí chybu, je chyba signalizována jako chyba všech a je nutno resetovat všechny budiče, protože i signál reset je pro všechny spojený. U signálu Ready je zapojení provedeno tak, že dokud nejsou ready všechny, tak není aktivní ani ready celkový. Toto spojení signálu Ready a Fault je provedeno vždy pro jeden střídač, tudíž pro tři desky budičů. Resetovací signál je spojen pro všechny čtyři střídače dohromady. Spojené signály připravenosti nReady\_all\_A, nReady\_all\_B a chyby Fault\_all\_A, Fault\_all\_B jsou opět signalizovány pomocí LED. Signalizován pomocí LED je také Reset\_all a napájení přiváděné z řídicí desky +5 a +12 voltů. Signál na resetování je ještě vybaven jednoduchou přepětovou ochranou. Kromě výše zmíněných dílčích schémat

se ve schématu nachází ještě obvod pro oddělení analogové země AGND a analogového napětí A+5V, použitého pro napájení proudových čidel na deskách budičů. Posledními komponentami, které můžeme na tomto schématu vidět, jsou blokovací kondenzátory fungující jako zásobárna rychlé energie pro hradla spojující signály.

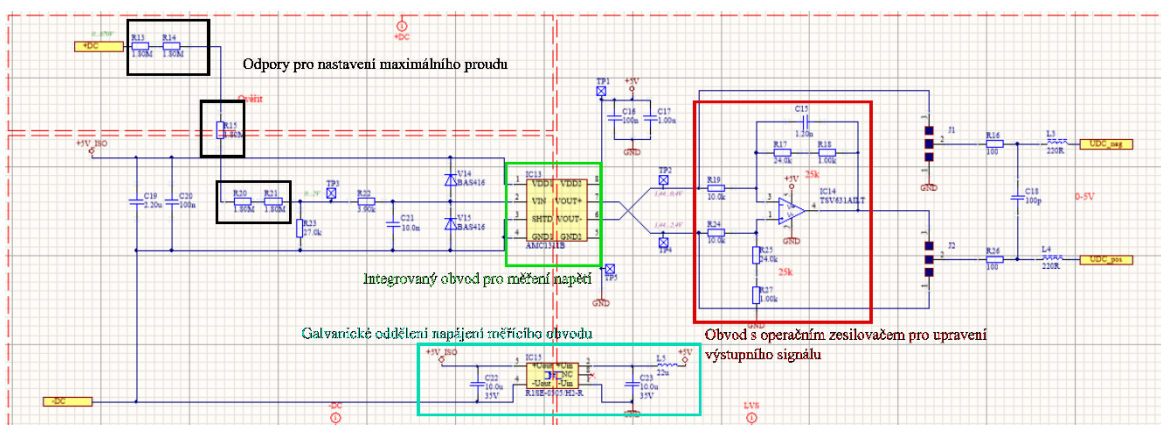


Obr. 2.7 Obrázek hlavního schématu horní sběrné desky

### 2.2.2 Schéma pro měření napětí DC linku

V tomto schématu je obvod pro měření napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Je rozdělen na signálovou a měřicí vysokonapěťovou část, která je galvanicky oddělená. Je nutné galvanicky oddělit i zdroj. Část tohoto schématu je převzatá z projektu SHRack [5], ale signálová část byla kompletně přepracována za účelem eliminace nutnosti diferenciálního napájení operačního zesilovače, které bylo v převzatém schématu původně použito. Vysokonapěťová část obsahuje část galvanicky odděleného zdroje +5V\_ISO, na kterou je připojen vyhlazovací kondenzátor. Vysokonapěťová měřicí část čidla byla převzata z projektu SHRack, ale je zapojena podle doporučení v datasheetu čidla [10]. Vstup do čidla z kladného napětí meziobvodu je opatřen několika rezistory pro nastavení vhodného maximálního proudu.

V nízkonapětové signálové části se pomocí operačního zesilovače upravuje výstupní změřená hodnota z čidla napětí tak, aby měla rozsah od 0 do 5 V, představující změřenou hodnotu napětí. Rozsah lze změnit přemostěním obvodu operačního zesilovače a dosáhnout rozsahu od -2,5 do 2,5 V. Pro toto přemostění je ve schématu umístěn jumper. Na výstupu tohoto signálu z měření je umístěn jednoduchý filtr. Na nízkonapětové části oddělovacího zdroje je opět připojena indukčnost s kondenzátorem pro vyhlazení proudu a napětí.

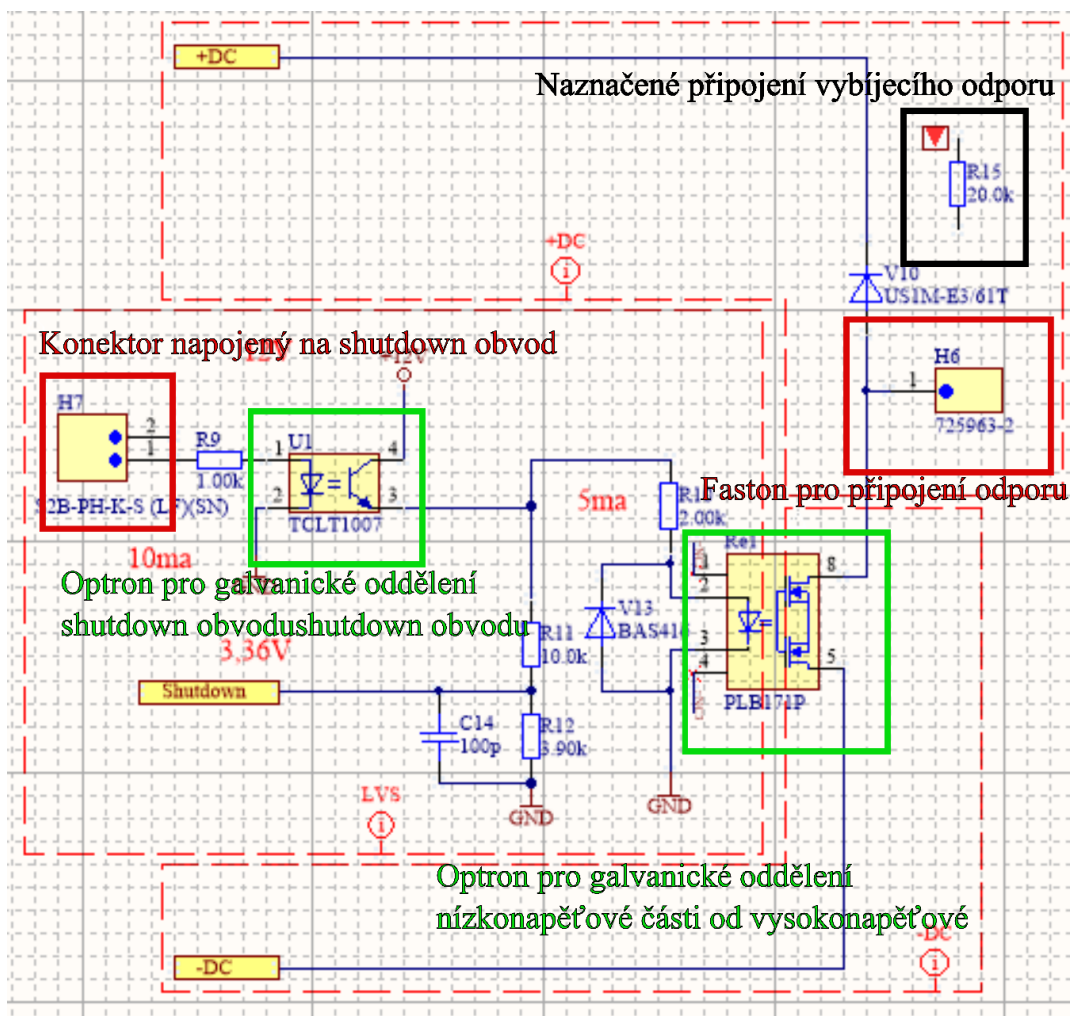


Obr. 2.8 Obrázek schématu měření napětí na DC linku

### 2.2.3 Schéma vybíjení DC linku

Hlavní funkcí tohoto schématu je připojení vybíjecího odporu, pokud je formule v nečinnosti nebo pokud dojde k vybavení obvodu bezpečného vypnutí formule (Shutdown circuit). Vybíjecí obvod je přímo připojen pomocí konektoru na tento obvod a pokud dojde ke ztrátě proudu z tohoto obvodu, tak dojde k automatickému připojení vybíjecího odporu. Zmíněný systém zaručuje i to, že pokud je formule vypnutá, tak ze shutdown obvodu neteče proud, takže v klidovém stavu je opět vybíjecí odpor připojen. Vybíjecí odpor a připojení na meziobvod je tu opět naznačeno jako vysokonapětová část. Vybíjecí odpor bude umístěn přímo na chladiči a připojen přes fastony do desky. Hodnota vybíjecího odporu byla zvolena na 20 k $\Omega$  a maximální výkon na 35 W. Připojení shutdown obvodu je realizováno konektorem typu JST a je galvanicky odděleno pomocí optronu TCLT1007. Spínač vybíjecího odporu je taktéž galvanicky oddělen optronem typu NO (Normally open). Jedná se o typ s velkým izolačním napětím až 800 V konkrétně jde o typ PLB171P. Také je zde provedeno vyvedení signálu, který detekuje signál shutdown obvodu a posílá tuto informaci do procesoru. Přes napětový dělič je zde upravena hodnota napětí z 12 V na

3,3 V z důvodu přizpůsobení napěťové hladině procesoru. Proud vybavující první i druhé galvanické oddělení je nastaven pomocí rezistorů R9 a R10 a jedná se o proud aktivující LED, která světelně otvírá fototranzistor uvnitř optronu.



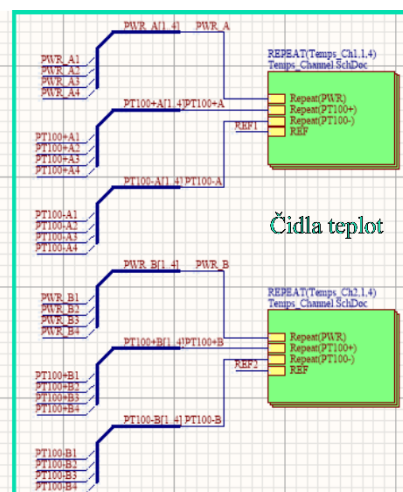
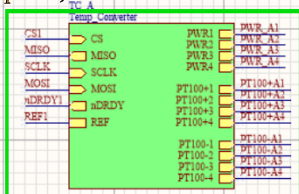
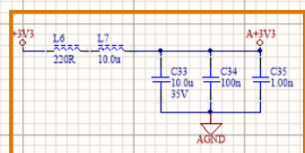
Obr. 2.9 Obrázek schématu vybíjení DC linku

## 2.2.4 Schémata pro měření teplot

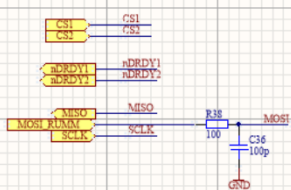
V tomto schématu můžeme vidět další dílčí schémata, a to dílčí schéma představující samotná čidla teploty a schémata představující obvod pro spojení a přepínání mezi měřenými signály. Obvody pro měření teplot a přepínání čidel byly převzaty z [15] a částečně upraveny. Jedná se o dva spojovací obvody schopné přepínat mezi čtyřmi analogovými signály. Čidel se zde tedy nachází osm. Šest čidel bude použito pro šest tranzistorových modulů. Zbýlá dvě čidla budou zde použita pro měření teploty vstupní a

výstupní vody do chladiče. Také se tu nachází další obvod pro vytvoření analogového napájení, a to hladiny A+3V3 pro napájení přepínacího obvodu.

Obvod pro vytvoření analogového napětí 3,3 V



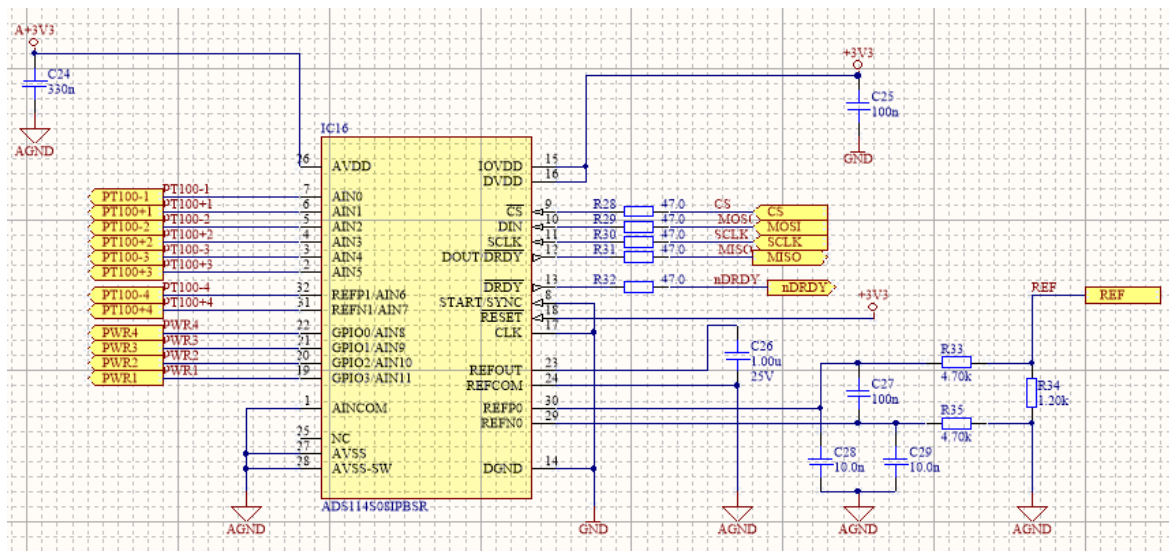
Schémat obvodů pro přepínání mezi čidly



Obr. 2.10 Obrázek schématu měření teploty

### 2.2.5 Schéma obvodu pro přepínání hodnot z teplotních čidel

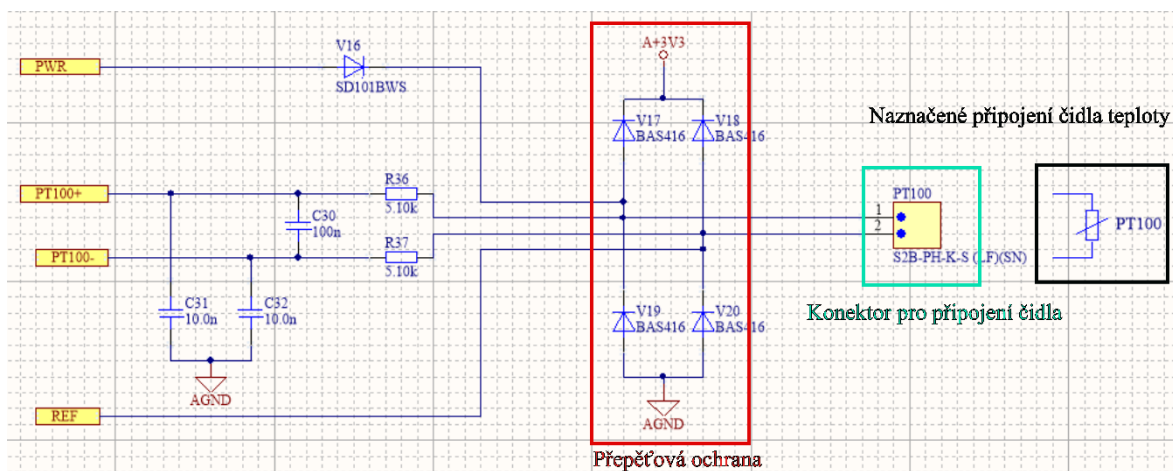
Do integrovaného obvodu jsou přivedeny signály ze čtyř čidel. Pomocí vstupního signálu CS dochází k nastavení, z jakého čidla chceme vyčíst hodnotu převedenou na digitální signál. Hodnota je vyčtena pomocí signálu MISO a pomocí signálu MOSI je možné přivést digitální signál z řídicí desky. Vstupní signál SCLK slouží k zavedení hodin do integrovaného obvodu a výstupní signál nDRDY udává, jestli je obvod připraven k vyčítání dat. Signál REF slouží k přivedení referenčního napětí na čidla, obvod signálu je zapojen podle doporučení ze datasheetu integrovaného obvodu ADS114S08IPBSR [11]. Digitální i analogové napájení je opatřeno kondenzátory sloužící jako rychlá zásobárna energie. Vstupní a výstupní signály vedoucí do řídicí desky jsou opatřeny rezistory pro omezení maximálního proudu.



Obr. 2.11 Obrázek schématu obvodu pro přepínání mezi čidly

### 2.2.6 Schéma obvodu teplotních čidel

Hlavní částí tohoto schématu je konektor typu JST, připojující čidlo teploty. Jedná se o čidlo PT100. Výstup z čidla je opatřen přepět'ovou ochranou v podobě diod. Vstup PWR zajišťuje napájení pro zvolené čidlo k měření. Na výstupních měřených signálech se nachází ještě RC filtry. Napájení i uzemnění je zde provedeno analogově.



Obr. 2.12 Obrázek schématu připojení čidla teploty PT100

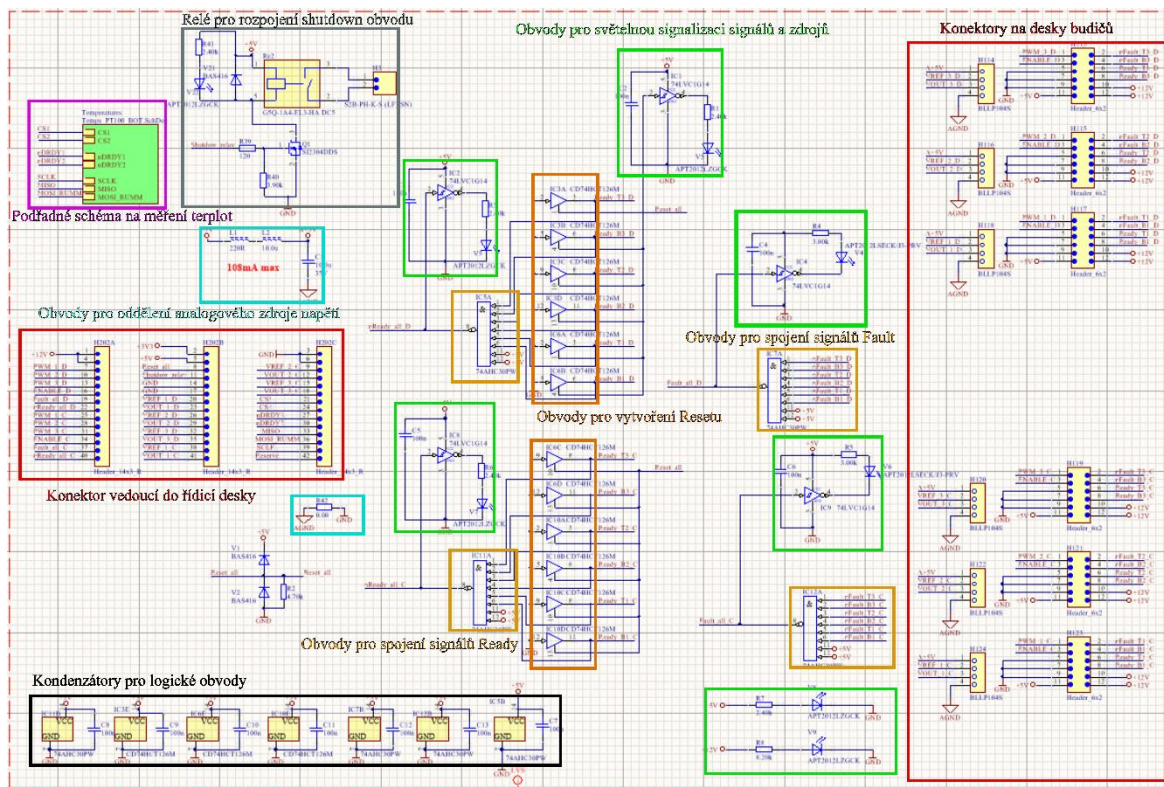


## 2.3 Schéma dolního Collectoru

Jak již bylo zmíněno, schéma dolní sběrné desky je rozdílné od schématu desky horní. Schéma je rozděleno na hlavní schéma a na jedno vedlejší schéma. Hlavní schéma obsahuje stejné komponenty jako schéma horní sběrné desky, ale nevyskytuje se zde vysokonapěťová část s připojením na DC link. Dále se zde nachází pouze jedno dílčí schéma, a to schéma na měření teplot, které je totožné jako u horní sběrné desky. V hlavním schématu se ale navíc nachází obvod pro vybavení shutdown obvodu, který již byl zmíněn.

### 2.3.1 Hlavní schéma dolního Collectoru

Většina komponent na tomto schématu byla už popsána v předchozí kapitole, protože se zde jedná o stejné zapojení jako na desce horní. Opět se zde pomocí konektorů spojuje šest desek budičů a tvořící dohromady dva třífázové střídače. Tentokrát se jedná o střídače s označením C a D. Spojení signálů a světelná signalizace je zde provedena totožně. Hlavním rozdílem je zde absence měření napětí a vybíjecího obvodu. Tyto obvody stačí mít pouze jednou pro všechny čtyři střídače. V tomto schématu se nenachází ani žádné vysokonapěťové části. Dalším markantním rozdílem je přidání obvodu pro vybavení centrálního ochranného obvodu formule (shutdown circuit). Vybavení tohoto obvodu se provádí rozepnutím relé, které za normálního chodu zajišťuje spojení tohoto obvodu. Podobným systémem by měly být vybaveny všechny systémy formule, aby při chybě jednoho došlo k rozpojení shutdown obvodu. Probíraný obvod musí být rozpojen i v klidovém stavu, na což spoléhá obvod pro zapojení vybíjecího odporu. Spínací relé je vybaveno světelnou signalizací. Pomocí unipolárního tranzistoru je zde přiveden signál aktivující relé z řídicí desky. Dokud tento signál není aktivován, je stále zapojen vybíjecí obvod a také je vyhodnocena chyba v ostatních komponentách formule, připojených na shutdown circuit. Shutdown obvod je napojen pomocí konektoru typu JST.



Obr. 2.13 Obrázek hlavního schématu dolní sběrné desky

### 2.3.2 Schémata pro měření teplot

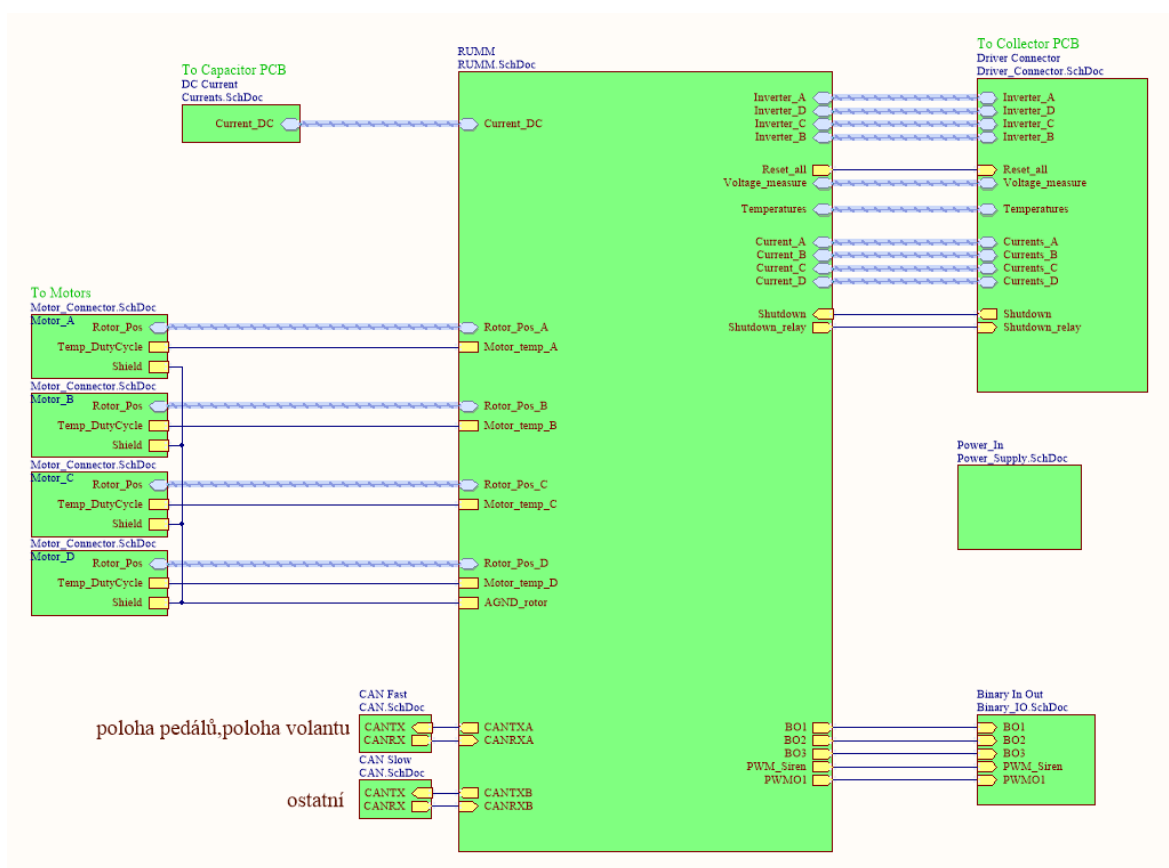
Tato schémata jsou naprosto totožná se stejnou funkčností jako u horní sběrné desky.

## 2.4 Schéma řídicí desky Control

Hlavní deskou celé sestavy je řídicí deska. Její hlavní funkcí je sloužit jako mozek celého střídače. Na této desce také dochází ke kompletnímu propojení všech čtyř střídačů s řídicím modulem RUMM. Dochází zde i k propojení sestavy se zbytkem formule a s dalšími vedlejšími komponentami. Topologie a část vedlejších schémat byla převzata z bakalářské práce Ondřeje Blažka [2]. Některá vedlejší schémata byla kompletně předělána, jako třeba schéma pro spojování sestavy, schéma hlavních zdrojů sestavy, schéma připojení RUMM, schéma pro měření stejnosměrného proudu. Ale naopak schémata připojující motory, schémata připojení komunikace CAN a schémata určené pro další vstupy a výstupy byla jen lehce upravena a z velké části převzata z již výše zmíněné bakalářské práce [2]. Na žádném ze schémat řídicí desky se již nenachází vysokonapěťová část.

### 2.4.1 Hlavní schéma řídicí desky

Hlavní schéma v tomto případě vyobrazuje pouze propojení jednotlivých dílčích schémat. Je zde vidět, jak jednotlivá schémata jsou vždy nějakým způsobem propojena s dílčím schématem, ve kterém se nachází hlavní řídicí jednotka, a to modul RUMM. U zdrojů není naznačené žádné propojení, protože jsou propojeny úplně s každým schématem v celé sestavě. Většina dílčích schémat je propojena pomocí harnessu, což je schematicky naznačen soubor více propojovacích signálů spadající do určité skupiny, v našem případě třeba signálů pro jeden ze čtyř střídačů. Jak již bylo zmíněno, nejdůležitější je schéma s hlavní řídicí jednotkou a schéma spojující signály z obou sběrných desek, tudíž ze všech čtyř střídačů. Schémata představující propojení čidel motorů jsou čtyři, protože uvažujeme čtyři motory s tím, že každý bude mít svůj střídač. Zde bude střídač A napájet motor A a podobně. Totožná schémata komunikací CAN jsou zde také dvakrát pro propojení rychlého a pomalého CANu.

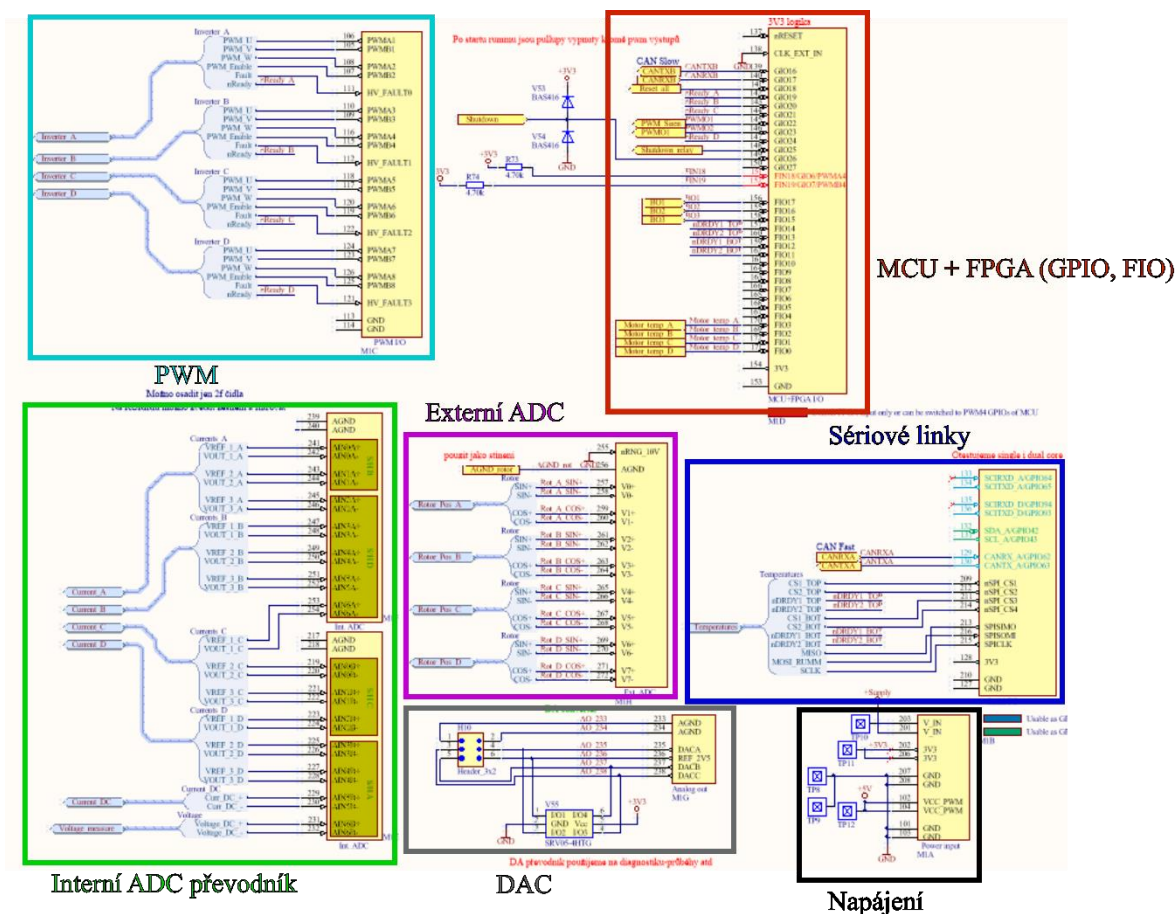


Obr. 2.14 Obrázek hlavního schématu řídicí desky

### 2.4.2 Schéma RUMM

V tomto schématu jsou umístěny všechny periférie řídicího modulu RUMM a napojení všech potřebných vstupů a výstupů na tyto signály. Jedná se zde o mikrokontrolerový modul RUMM – RICE Universal Microcontroller Module. Zapojení signálu bylo provedeno pomocí datasheetu RUMMu [12] a podle doporučení řešitele tohoto systému Ing. Tomáše Košana, Ph.D. Jednotlivé periférie jsou vždy popsány pod jejich schématickou značkou. Jedná se hlavně o analogové vstupy v interním a externím ADC, digitální I/O, PWM I/O, o sériové I/O, DA převodník a o napájení. Z periférie PWM jsou napojeny všechny výstupy na PWM střídačů. Dále jsou zde do vstupů HV\_Fault napojeny jednotlivé výstupy faultů ze střídačů. Další výstupy PWM jsou napojeny na Enably daných střídačů. Celá periferie je tedy využita kompletně. Jediné nezapojené piny zůstávají piny GND. Na tyto piny by se za normálních podmínek přivedl zpětný proud z tranzistorů, což by musela být separátně vedená zem už z desky budičů. Vzhledem k tomu, že máme všechny země spojené a nemáme tuto zem vyvedenou zvlášť, tak necháme tyto piny nezapojené, protože ke spojení se zemí zde dochází uvnitř systému RUMM. Pod touto periferií můžeme ve schématu vidět interní převodník analogového signálu na digitální. Zde jsou zapojena čidla proudu jednotlivých fází, měření stejnosměrného proudu meziobvodu a měření napětí meziobvodu. Jediné nezapojené piny zůstávají svorky analogové země. Tyto země nezapojujeme, protože analogová země byla oddělena už na sběrných deskách a zde už máme zem čistě digitální a ke spojení se zemí dojde opět uvnitř systému RUMM. Interní převodník je oproti externímu rychlejší a jeho rozsah je  $\pm 5$  V. Hned vedle na schématu se nachází periférie externího AD převodníku. Do této periférie jsou zapojena čidla polohy ze všech čtyř motorů. Analogová země je zde použita na stínění kabelu vedoucího od motorů. Spojením pinu nRGN\_10V se zemí je přepnutý rozsah převodníku na  $\pm 10$  V. Pod touto periferií se nachází další periférie a to DAC. Zmíněný převodník digitálního signálu na analogový je zapojený na konektor typu header a v tomto schématu bude sloužit pouze k informačním účelům. Lze pomocí něj vyčítat různé typy signálů, třeba na osciloskop a bude použit při oživování a programování řídicí desky a RUMMu. Případně jako záložní možnost výstupu analogových signálů z desky. V horní části schématu se nachází periférie MCU + FPGA I/O sloužící primárně pro digitální vstupní a výstupní signály, ale dané piny lze použít k různým účelům. Programovatelné piny se dělí na GIO a FIO. GIO jsou ovládané přímo z mikrokontroleru a FIO jsou ovládané z FPGA. Na tento blok je připojeno široké spektrum signálů. Jako první je zde vidět pomalý CAN. Dále je výstupní signál sloužící k resetování všech střídačů. Pod ním

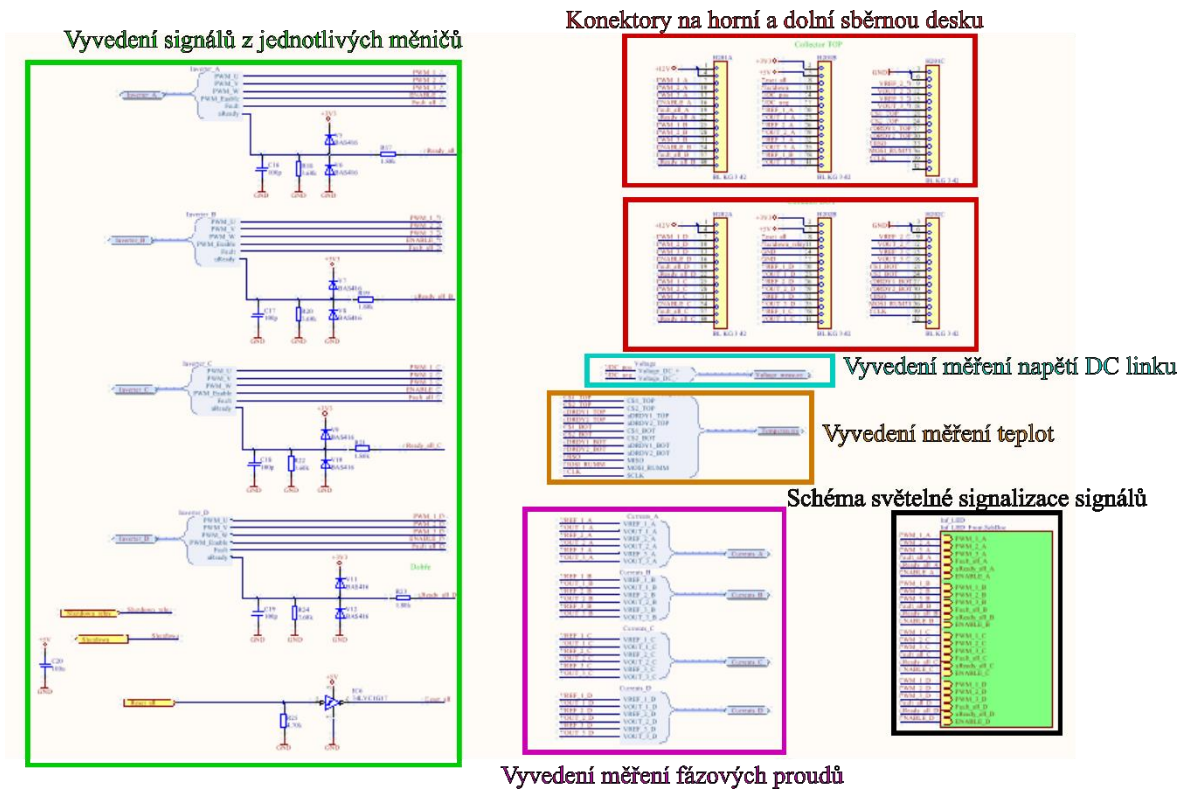
se nachází vstupní signály informující o připravenosti daného střídače. Další dva GIO budou fungovat jako výstupy PWM. Jeden pro napojení zvukového indikátoru pro formulí a druhý univerzální pro možné použití v budoucnu. Signál Shutdown\_relay je výstup sloužící k vybavení centrálního ochranného obvodu formule a vstupní signál Shutdown opatřen přepět'ovou ochranou má za cíl informovat řídicí systém o vybavení shutdown obvodu. Piny FIN18 a FIN19 jsou připojeny na napájení přes odpor, protože je není možné použít, z důvodu použití výstupy PWMA4 a PMW4B, které s nimi sdílí pozici na mikrokontroleru. Další piny jsou použity pro univerzální digitální I/O pro možné použití v budoucnu označené jako BO1-3. Vstupní signály nDRDY nás informují o tom, jestli je daná hodnota z čidla teploty připravená k vyčtení do procesoru pomocí sériové komunikace. Poslední připojené piny slouží jako vstupy informující o teplotách jednotlivých motorů. Pin GND je opět nezapojen ze stejného důvodu jako nezapojené předchozí země. Pin 3V3 lze použít jako výstupní napájení ale zde není použit. Pin CLK\_EXT\_IN je uzemněn, protože nebudeme používat externí hodiny pro řídicí systém, ale jeho vlastní. Další periférií je sériová sběrnice. Periférie poskytuje několik používaných sběrnic jako je třeba CAN nebo SPI. Rychlý CAN je napojen přímo na tuto sběrnici. Na SPI jsou napojeny dílčí SPI umístěné na sběrných deskách a sloužící pro měření teplot výkonových modulů a dalších komponent. Ostatní piny zůstávají nezapojeny z důvodu jejich nevyužití. Poslední periférií je zde periférie vstupů a výstupů napájení. Hlavní napájení bude provedeno přímo z hlavního napájecího konektoru a je závislé na připojeném napětí do desky. Vstupní napájení pro PWM je +5 V a je poskytnuto ze zdrojového dílčího schématu. Zde je celý RUMM napojen na celkovou zem všech ostatních desek. Piny 3V3 je možné použít jako výstupní zdroj z RUMM a jsou použity jako zdroj napětí 3,3 V vedoucí na sběrné desky. Všechny piny jsou zde opatřeny testovacími body pro snadnější diagnostiku a ožívování. Modul RUMM bude připojen do řídicí desky pomocí konektorů typu header které v tomto schématu nejsou zobrazeny, protože je RUMM vložen do programu Altium jako součástka.



Obr. 2.15 Obrázek schématu periférií modulu RUMM

### 2.4.3 Schéma připojení sběrných desek

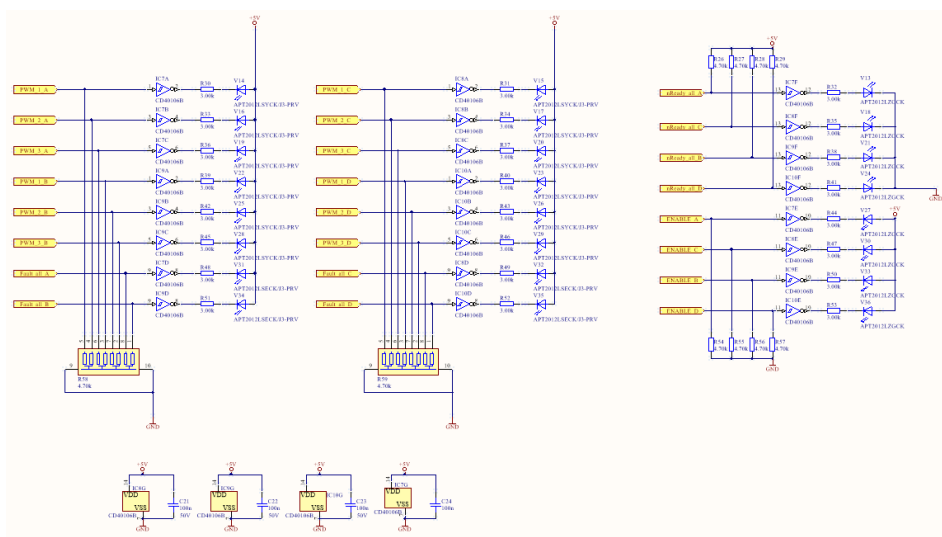
Toto schéma slouží převážně na propojení dvou sběrných desek pomocí dvou třířadých konektorů. Další důležitou částí schématu je rozřídění signálů do správných harnessů které představují určité skupiny signálů. Jedná se o signály k jednotlivým střídačům, signály na měření fázového proudu jednotlivých střídačů, signály na měření teplot a signály z měřeného stejnosměrného napětí. U signálů Ready a Reset bylo nutné přizpůsobení na nižší hladinu a to z 5 V na 3,3 V, protože napěťová hladina digitálních I/O řídicího systému je 3,3 V. Dále se ve schématu nachází další podřadné schéma, a to schéma na LED signalizaci.



Obr. 2.16 Obrázek schématu připojení sběrných desek

### 2.4.4 Schéma světelné signalizace pomocí LED

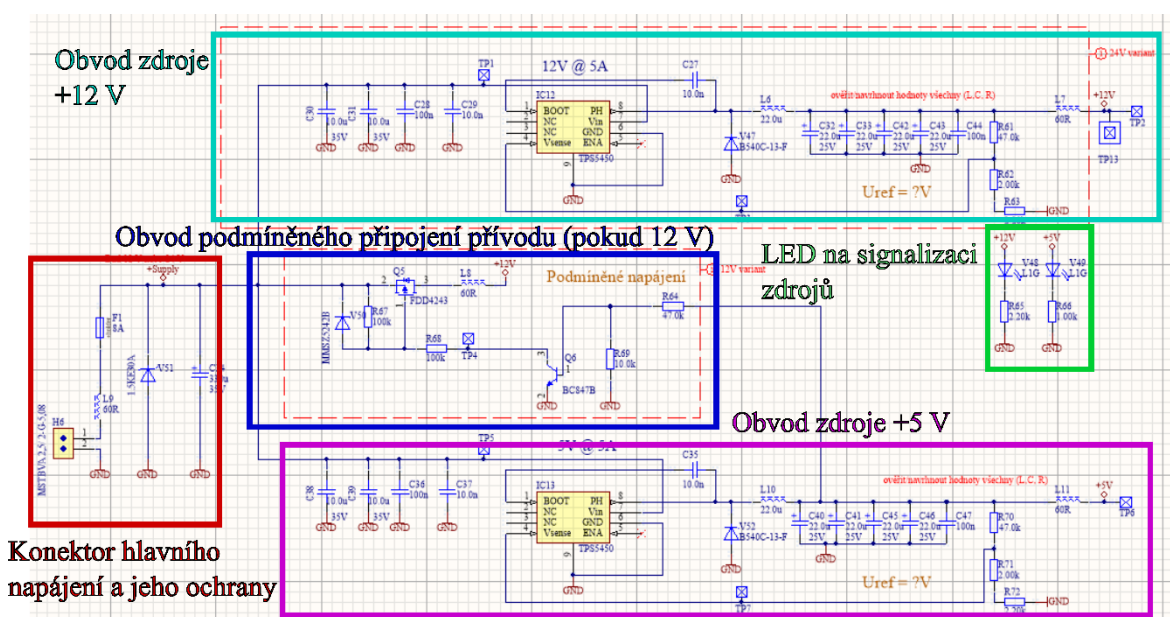
V tomto schématu je vytvořena signalizace pomocí LED daných signálů pro jednotlivé střídače. Jedná se o signály PWM, Fault, Ready a ENABLE. U signálu Ready je zapojení od ostatních odlišné z důvodu toho, že se jedná a negovaný signál.



Obr. 2.17 Obrázek schématu světelné signalizace signálů

### 2.4.5 Schéma zdrojů

V tomto schématu se nachází dva integrované obvody pro napájení celé sestavy, a to 5 a 12 V. Schéma počítá s variantou, že externí napájení bude 12 V a s variantou že externí napájení bude 24 V. Pravděpodobnější je varianta 24 V. Pokud by došlo k variantě napájení 12 V, nebyl by jeden z integrovaných obvodů zajišťující zdroj 12 V osazen. Naopak by byl osazen obvod zajišťující naběhnutí nejdříve 5 V zdroje a poté až napřímo připojení externího 12 V zdroje do systému. V našem případě byla zvolena varianta 24 V pro osazení desky. Tudíž na desce nebude osazen obvod podmíněného napájení a budou osazeny oba integrované obvody TPS5450 reprezentující zdroje. Oba integrované zdroje mají maximální proud 5 A, a jedná se o step-down měniče. Jejich výstupní napětí se nastavuje pomocí odporového děliče, na který je připojený pin Vsense. Na schématu jsou hodnoty odporu u obou obvodů totožné ale na desce se nebudou osazovat a až při ožívování dojde k doladění jejich hodnot, aby výstupní napětí odpovídalo správné hodnotě. Zbytek zapojení zdrojů je proveden podle doporučení ze datasheetu [16]. Připojení externího napájení je opatřeno LC filtrem pro vyhlazení proudových a napěťových špiček, tavnou pojistkou a diodou, sloužící jako ochrana proti přepólování zdroje. Externí napájení bude připojeno konektorem typu MSTBVA. Schéma je vybaveno několika testovacími body, které usnadní ožívování a případnou diagnostiku obvodu. Jako poslední se ve schématu nachází světelná signalizace pro napájení 5 a 12 V.



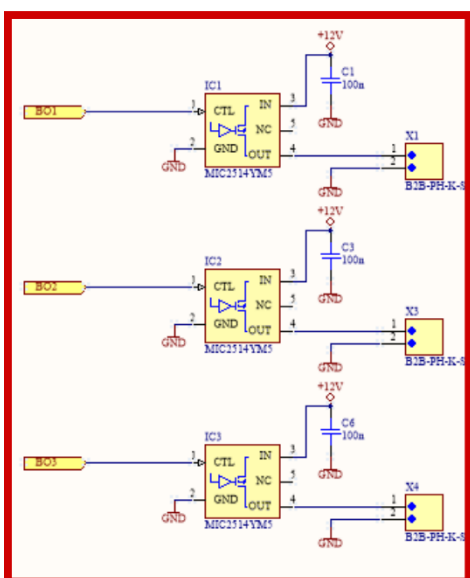
Obr. 2.18 Obrázek schématu zdrojů sestavy



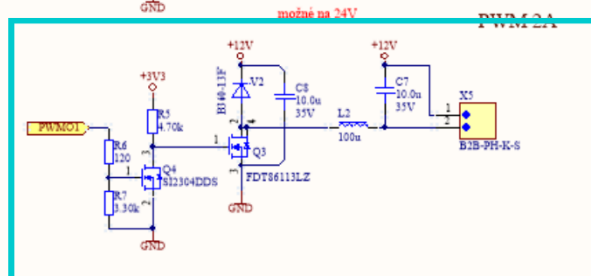
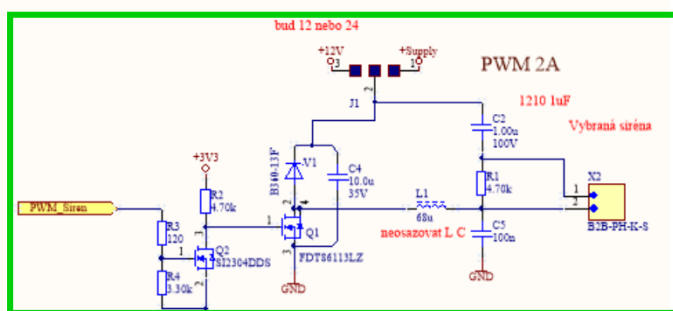
### 2.4.6 Schéma Binary In Out

Toto schéma slouží především pro univerzální připojení dalších nyní neznámých komponent a signálů v případě potřeby. Ve schématu jsou tři obvody pro připojení digitálních signálů a dva obvody pro připojení PWM. Maximální výstupní proud digitálních obvodů je až 1 A při 12 V. Jeden z výstupů PWM bude použit pro připojení reproduktoru pro zvukovou signalizaci celé formule. Výstupní obvod byl patřičně upraven pro připojení reproduktoru a je zde možnost přepnutí napětí mezi 12 V a napětím externího zdroje (24 V). Výstup na reproduktor je opatřen LC filtrem, který se zatím nebude osazovat a jeho hodnoty budou zvoleny až podle vybraného reproduktoru nebo sirény. Na druhý PWM výstup je možné případně připojit nějakou další komponentu.

Univerzální binární I/O obvody



Obvod napájení a řízení sirény pro zvukovou signalizaci

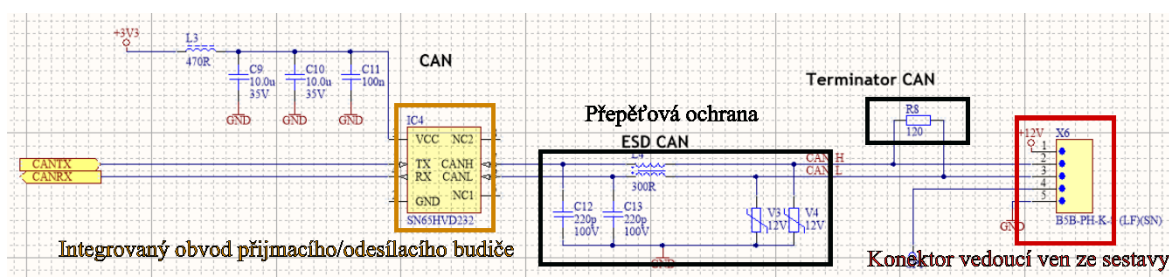


Univerzální obvod s výkonovým PWM výstupem

Obr. 2.19 Obrázek schématu Binary IO

### 2.4.7 Schéma připojení CAN

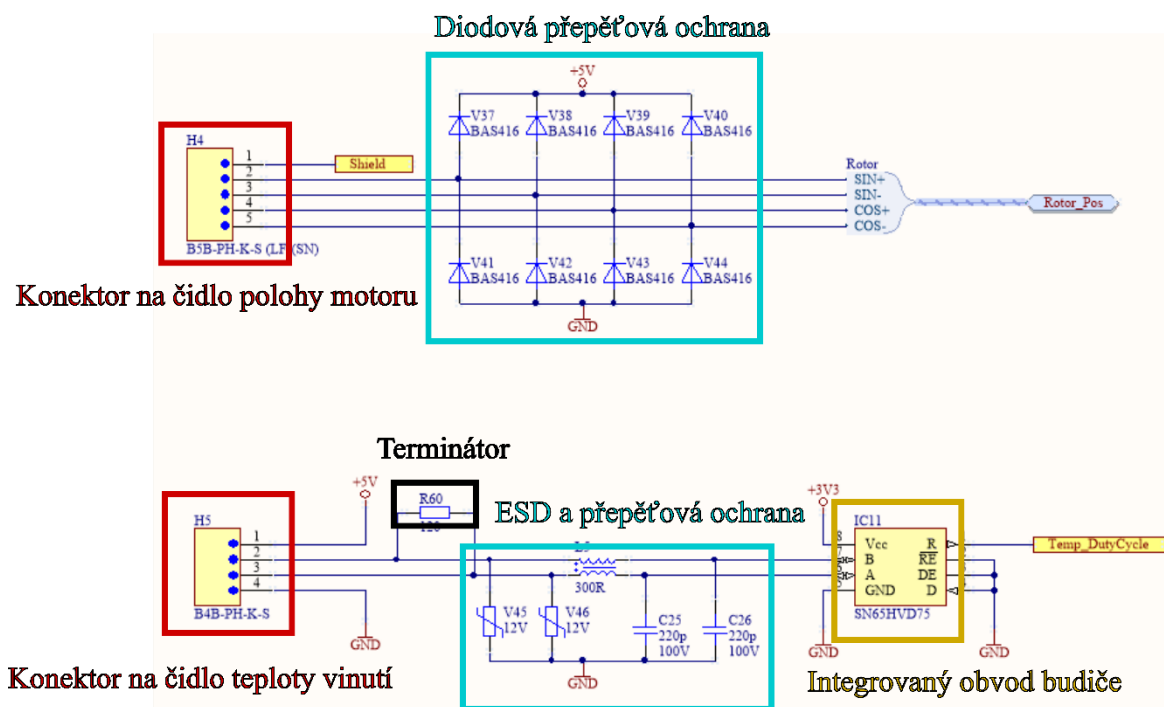
Tato vedlejší schémata jsou v hlavním schématu umístěna dvakrát. Pro pomalý a pro rychlý CAN. Vnitřní zapojení schémat je u obou totožné. Integrovaný obvod budiče SN65VHD232V funguje jako vysílač/přijímač sériové komunikace CAN. Ve schématu se krom integrovaného obvodu pro CAN komunikaci nachází konektor typu JST propojující CAN mezi ostatní komponenty formule. Integrovaný obvod má na napájení umístěné blokovací kondenzátory. Před konektorem se v zapojení nachází přepět'ová ochrana ESD a EMI filtr. Na konektoru je uvažován jeden rezervní pin. [2]



Obr. 2.20 Obrázek schématu zapojení CAN

### 2.4.8 Schéma motorového konektoru

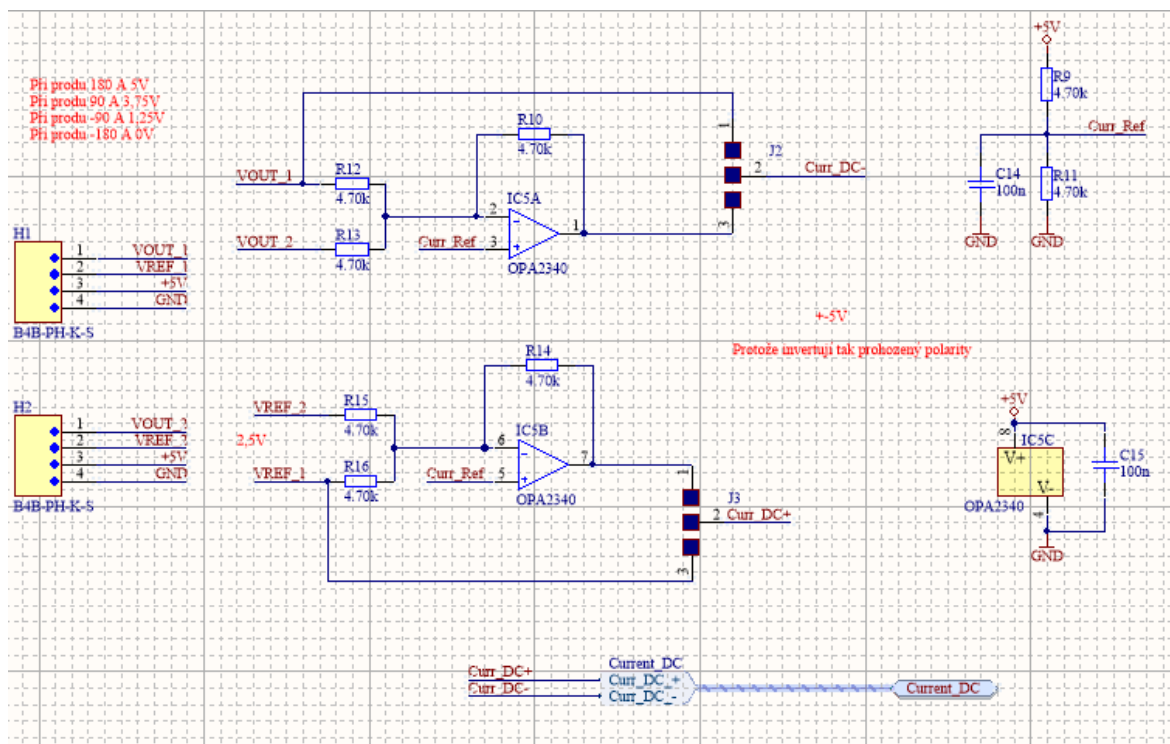
Jak již bylo zmíněno, schémata jsou v hlavním schématu čtyři pro každý motor jedno a všechny jsou opět stejné. Hlavní funkcí tohoto schématu je propojení signálů z čidel motorů do kontrolní desky. Jedná se o čidlo polohy a o čidlo teploty vinutí. Ve schématu jsou dva konektory typu JST, jeden pro každé čidlo. U konektoru čidla polohy je zapojena přepět'ová ochrana v podobě diod. Jedním z pinů konektoru je připojeno stínění kabelu. Přenos signálu teploty motoru je pro zvýšení odolnosti vůči rušení řešen za pomoci budičů RS485 s jednoduchým využitím pouze pomocí PWM signálu. Poměrné sepnutí tedy reprezentuje teplotu motoru. U konektoru na senzor teploty je zapojena přepět'ová ochrana ESD s varistorem a terminátorem. Funkce terminátoru je ta, že zabraňuje signálovým odrazům a zvyšuje odolnost proti rušení. Signál z čidla teploty vede do integrovaného obvodu a z něj do řídicího systému. Integrovaný obvod funguje jako budič. [2]



Obr. 2.21 Obrázek schématu připojení čidel motorů

### 2.4.9 Schéma měření stejnosměrného proudu

Protože máme dvě čidla proudu, která měří proud přivedený do jedné i do druhé desky kondenzátorů a poslední analogový vstup do řídicího systému, tak je nutné tyto dva signály z měření nějakým způsobem spojit. K tomu bylo vytvořeno toto schéma. Jsou zde spojeny oba signály VOUT a VREF pomocí operačních zesilovačů v invertujícím zapojení. Signály jsou přivedeny z desek kondenzátorů opět pomocí konektorů typu JST. Je tu možnost využít variantu pouze jednoho čidla a přemostit část schématu spojující signály pomocí jumperů. Počet čidel je zvolen podle maximálního možného proudu DC linkem. V našem případě byla zvolena dvě čidla s maximálním proudem 180 A pro každé, v součtu tedy 360 A. Tato hodnota byla zvolena, protože předpokládáme vstupní proud a něco vyšší než 180 A.

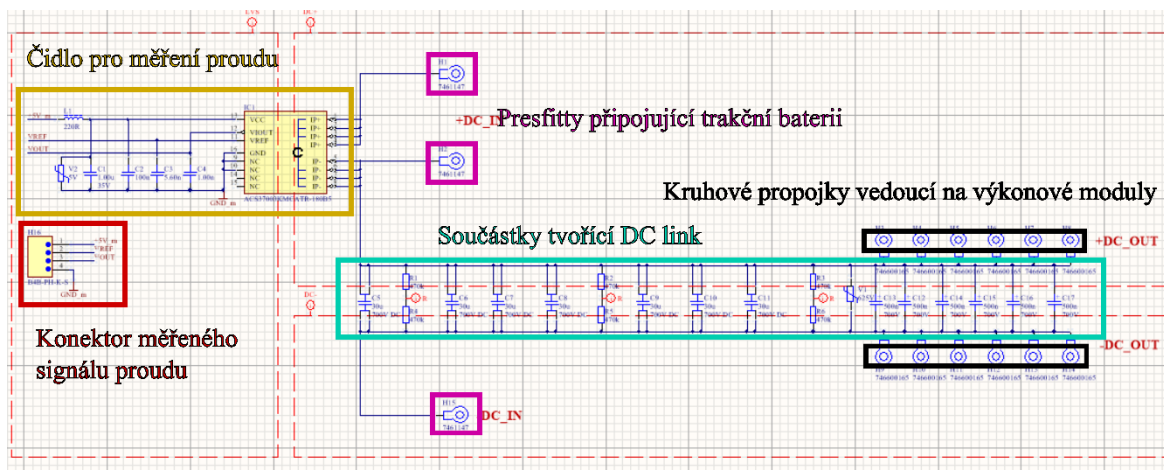


Obr. 2.22 Obrázek schématu připojení změřených proudů z desky kondenzátorů

## 2.5 Schéma horní desky kondenzátorů

Schéma horní desky kondenzátorů je pouze jedno, a to hlavní. V tomto hlavním schématu se nachází již výše zmíněné čidlo proudu a konektor spojující ho s řídicí deskou. Je zde opět vysokonapěťová a nízkonapěťová část. Zapojení čidla je shodné se zapojením proudových čidel na deskách budičů, protože se jedná o ten stejný integrovaný obvod. Proud je přiveden pomocí pressfitu z trakční baterie. Pokud bude zvolena varianta jednoho čidla, na dolní desku povede proud z druhého pressfitu za čidlem na této desce. V našem případě je zvolena varianta první, což znamená, že na spodní desku je přiveden proud z pressfitu před čidlem, teda z toho pressfitu, kam je přiveden proud z baterie. Záporný proudový přívod je přiveden do desky spodní a až z ní do desky horní opět pomocí pressfitů. Touto kombinací přívodních kabelů je zajištěno vyrovnání délky přívodů a tím dosaženo rovnoměrného rozložení proudu. Dále je proud veden na paralelní zapojení speciálních kondenzátorů, vybíjecích odporů a varistoru. Jedná se o 7 svitkových kondenzátorů o celkové kapacitě 210  $\mu\text{F}$  na napětí 700 V. Hodnota vybíjecích rezistorů je zvolena na třikrát 940 kilo ohmů paralelně a slouží k vybití kondenzátorů při odpojení nebo při poruše sepnutí vybíjecího odporu na sběrné desce. Varistor zde funguje jako přepěťová ochrana. Ve schématu jsou zakresleny i další kondenzátory, které jsou také

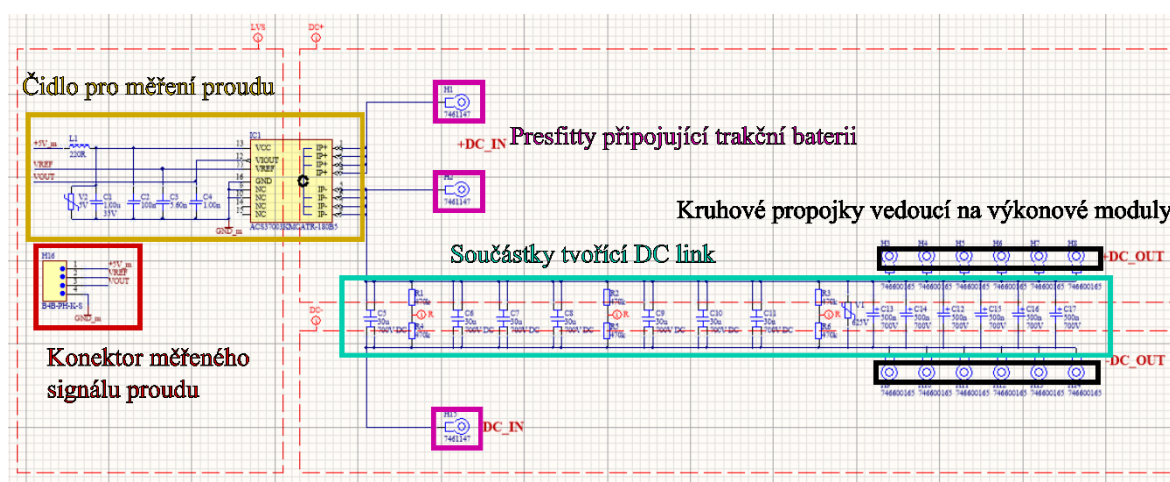
zapojeny paralelně mezi kladným a záporným napětím meziobvodu. Tyto kondenzátory zatím nebudeme osazovat, ale v případě nedostatečné rychlosti a velkého namáhání použitých kondenzátorů, mohou být na tyto pozice doplněny rychlé keramické kondenzátory. Stejnoseměrný meziobvod je dále připojen pomocí kulatých propojek na jednotlivé tranzistorové moduly. Tyto propojky jsou stejné jako propojky mezi modulem a deskou budičů.



Obr. 2.23 Obrázek hlavního schématu horní desky kondenzátorů

## 2.6 Schéma dolní desky kondenzátorů

Schéma horní a dolní desky kondenzátorů je totožné. Jediný rozdíl by nastal při variantě s jedním proudovým čidlem a to ten, že by se na dolní desce neosadilo zapojení čidla proudu a proud by zde byl přiveden druhým pressfitem a vedl by od čidla z horní desky. V našem případě tuto variantu nebudeme realizovat a tím pádem zapojení budou stejná. Další rozdíly budou vidět až přímo na rozvržení desky plošných spojů. Rozdíly mezi deskami vznikly, protože deska bude umístěna zespodu sestavy. Z tohoto důvodu se musí komponenty na desku umístit zrcadlově oproti komponentům umístěným na horní desce.



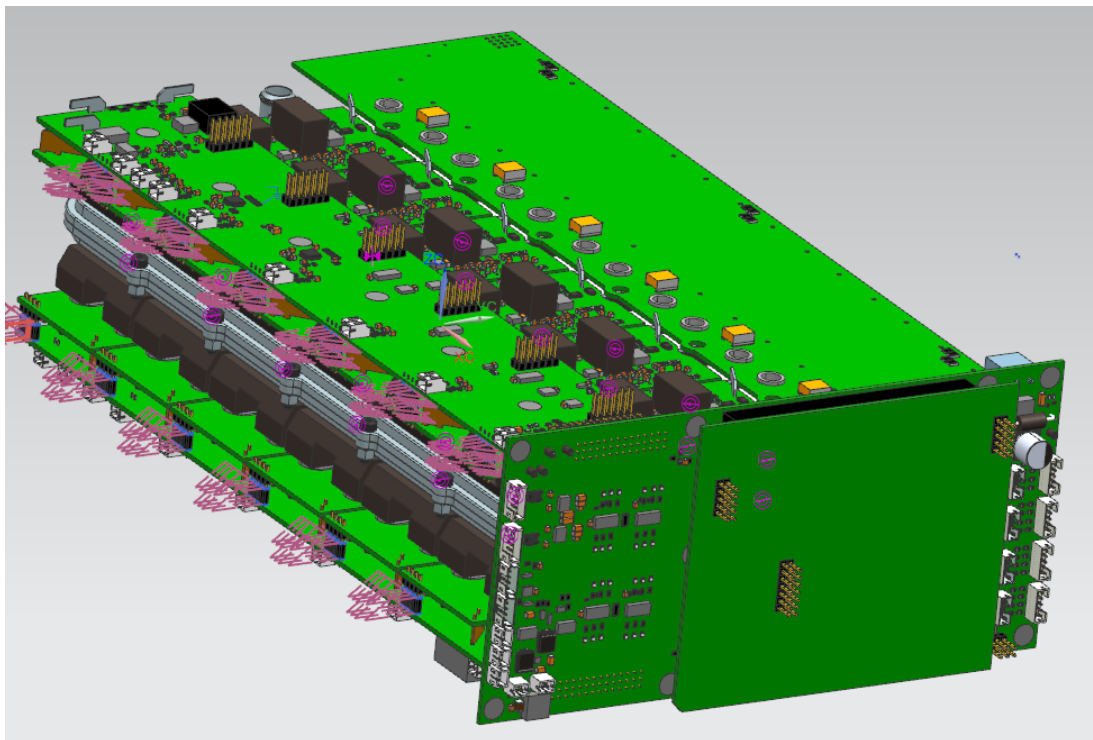
Obr. 2.24 Obrázek hlavního schématu dolní desky kondenzátorů

### 3 Návrh desek plošných spojů

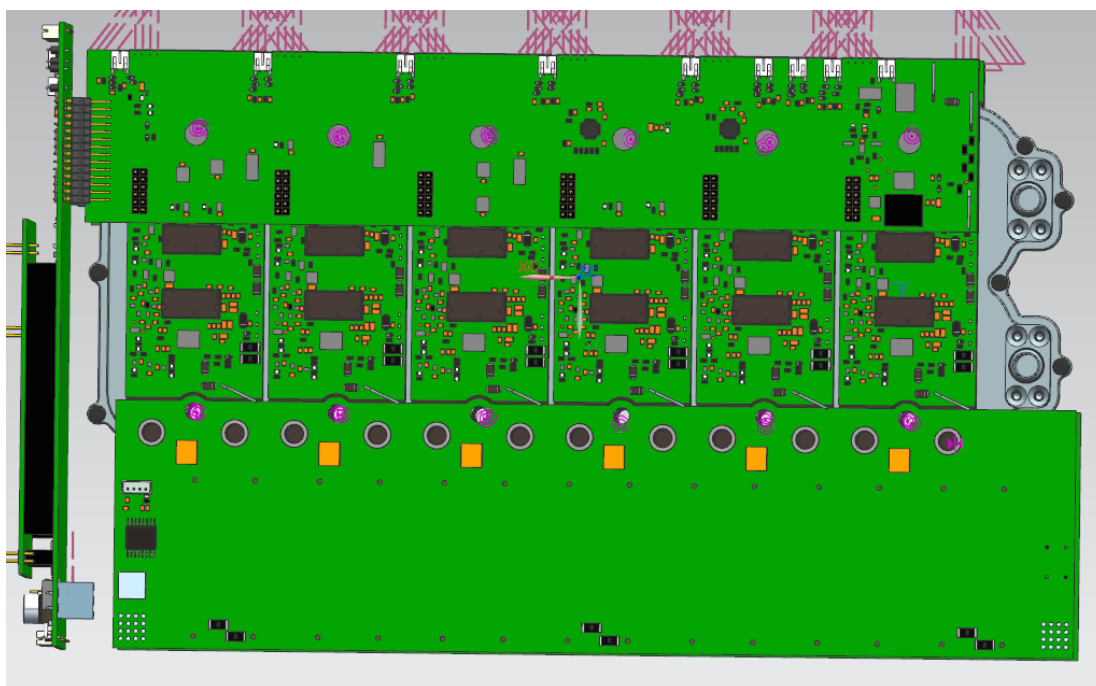
Desky byly navrhovány v programu Altium Designer. Po vytvoření chtěného tvaru desky byly z daného projektu vždy importovány součástky použité ve schématech a pomocí znázorněných propojení se součástky propojovaly manuálně vhodně zvolenými cestami v různých vrstvách desky. Všechny desky byly navrhnuty jako čtyřvrstvé. Při návrhu desek byl kladen důraz na správné rozložení proudových toků patřičně velkými cestami a plochami. Rozmísťování součástek bylo nutné provádět v souladu s oficiálními pravidly formulového závodu [14]. V těchto pravidlech je kladen důraz především na viditelné a dostatečné oddělení vysokonapěťových a nízkonapěťových částí desky. Na některých deskách došlo k oddělení digitální a analogové části. Toto oddělení se provádí především z důvodu potlačení rušení části analogové částí digitální. K rušení dochází konkrétně napěťovými a proudovými pulzy, které mohou ovlivnit analogovou hodnotu a vyskytují se při špičkovém odběru proudu některou z digitálních částí. Při návrhu desek byla snaha o co nejefektivnější rozložení daných komponent v souladu s pravidly, ale také aby byla zaručen co nejefektivnější chod sestavy. U všech desek bylo nutné patřičně rozmístit konektory, aby do sebe celá sestava při konstrukci zapadla.

#### 3.1 Vize sestavy

Při rozmísťování propojovacích konektorů mezi deskami a při celkovém rozmýšlení poskládání sestavy bylo nutné vytvořit 3D model sestavy. Pro tvoření 3D modelu byl použit program Siemens NX. Díky použití 3D modelu a exportu hotových desek do formátu STEP bylo možné si neustále ověřovat, že desky v celé sestavě sedí tak jak mají. Na 3D modelu je názorně vidět rozmístění všech desek v sestavě a propojení mezi nimi. Všechny desky plošných spojů, které se v tomto 3D modelu nachází, jsou níže dopodrobna popsány. Vytvořený model byl také poskytnut dalšímu členovi týmu, který začal pracovat na systému upevnění a umístění celé této sestavy.



Obr. 3.1 Obrázek 3D modelu sestavy pohled se strany



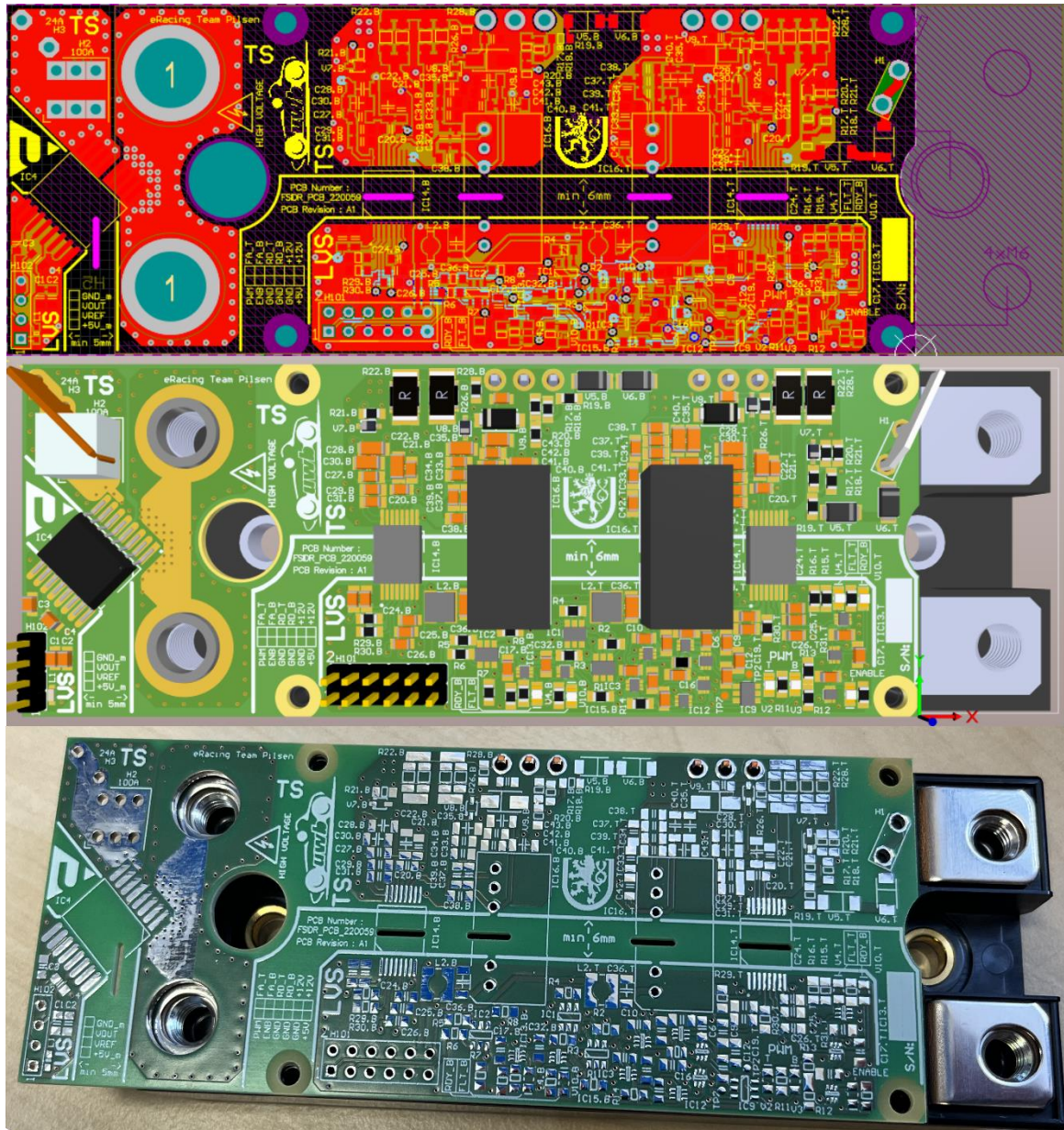
Obr. 3.2 Obrázek 3D modelu sestavy pohled ze shora



### 3.2 Návrh desky driverů

Deska je umístěna a připevněna přímo na tranzistorovém modulu. Tvar desky byl tedy zvolen tak, aby odpovídal tvaru modulu a nedocházelo ke zbytečnému navýšení rozměrů sestavy. Oproti tvaru desky uvažovanému v původním návrhu v méj bakalářské práci [1] byla deska prodloužena z důvodu umístění měření proudu na desce. Výstupní fáze z modulu je zavedena do desky pomocí kruhových propojek a po změření proudu je pomocí fastonu fáze vyvedena na motorový konektor a následně na motor. Tato deska se dělí na čtyři hlavní části. Tři vysokonapěťové a dvě nízkonapěťové. Dvě nízkonapěťové se dále dělí na digitální a analogovou část. Vysokonapěťové části jsou označeny jako TS a nízkonapěťové jako LVS. Mezi TS a LVS musí být viditelná bariéra, jejíž rozměry jsou předepsány v pravidlech formule [14]. V našem případě se jedná o minimálně 6 mm a deska se musí ještě zalakovat. Pod součástkami, které zasahují do TS i LVS, byla navíc ještě vyfrézována drážka pro prodloužení této bariéry, protože pod nimi není možné desku zalakovat. Jedná se o budiče, zdroje pro buzení a o integrovaný obvod pro měření proudu. Dvě části TS mají mezi sebou také izolační bariéru, která už ale není vyznačena na desce. Jedná se o izolační vzdálenost mezi budícím a ochranným obvodem horního a dolního tranzistoru. Tato bariéra je nejméně 4 mm. Třetí TS část desky obsahuje pouze vstup a výstup z čidla měření proudu, včetně přivedení tohoto proudu z desky a odvedení pomocí fastonu nebo případně pressfitu na motor. Analogová část LVS se nachází také u čidla měření proudu, a to u jeho výstupních signálů. Tato část má svůj vlastní konektor vedoucí na sběrnou desku. Tento konektor mimo vyvedení signálů poskytuje analogovou zem a analogové napájení této části desky. Druhá digitální část LVS obsahuje veškerou logiku, světelnou signalizaci a také nízkonapěťovou část budičů a budících zdrojů. V této části je umístěny konektor vedoucí opět na sběrnou desku. Na konektoru se mimo vstupní a výstupní signály nachází piny pro přivedení napětí 12 a 5 V. V jednotlivých vrstvách desky jsou vylité měděné plochy s různými hladinami. U digitální LVS je v horní a dolní vrstvě vylita zem a v prostředních vrstvách napětí +5 a +12 V. V budících částech TS je opět v horní a dolní vrstvě vylita zem a v prostředních vrstvách kladné a záporné napětí zdroje pro buzení. U analogové části LVS je ve všech vrstvách vylita analogová zem. U TS části měřící proud je pomocí všech vrstev provedeno propojení vstupního a výstupního proudu do čidla. Jednotlivé vrstvy jsou propojovány pomocí via, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení tekoucího proudu všemi vrstvami. Pomocí popisků na desce jsou označeny jednotlivé piny obou konektorů, popsány skoro všechny součástky a označeny LED,

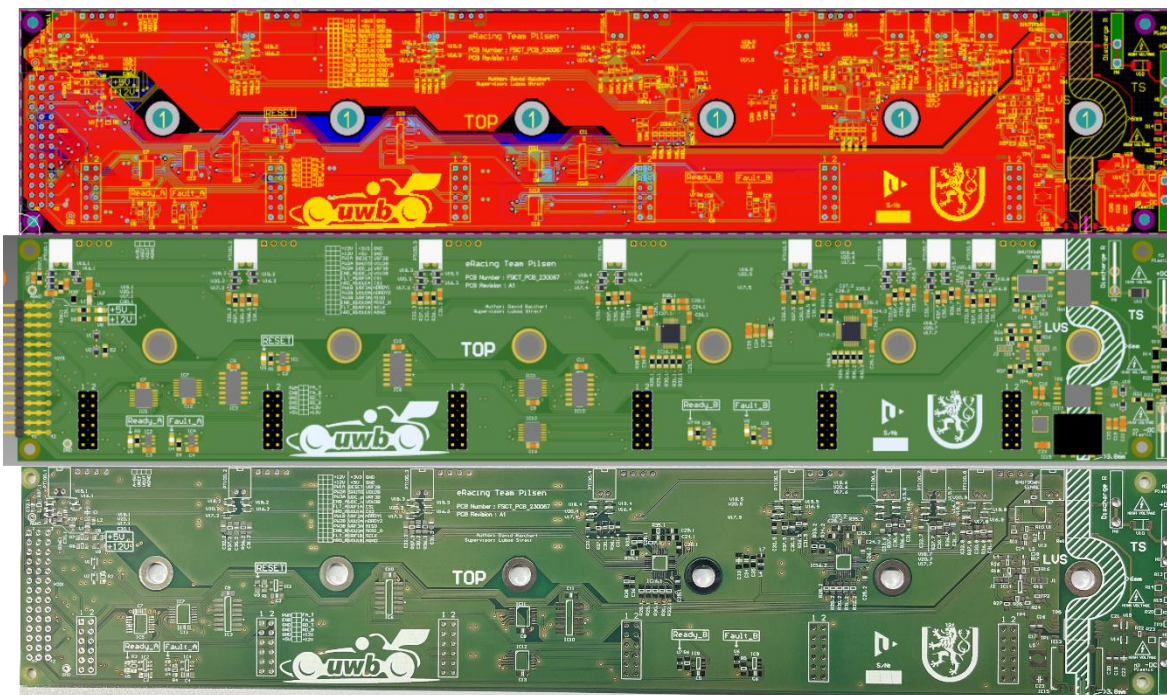
signály, které reprezentují. Deska je opatřena upevňovacími otvory, do kterých patří plastové šrouby spojující desku s modulem. Kruhové propojky vedoucí na desku musely být speciálně upraveny frézou pro dosažení požadované výšky desky od modulu.



Obr. 3.3 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené desky budičů s modulem

### 3.3 Návrh horní sběrné desky

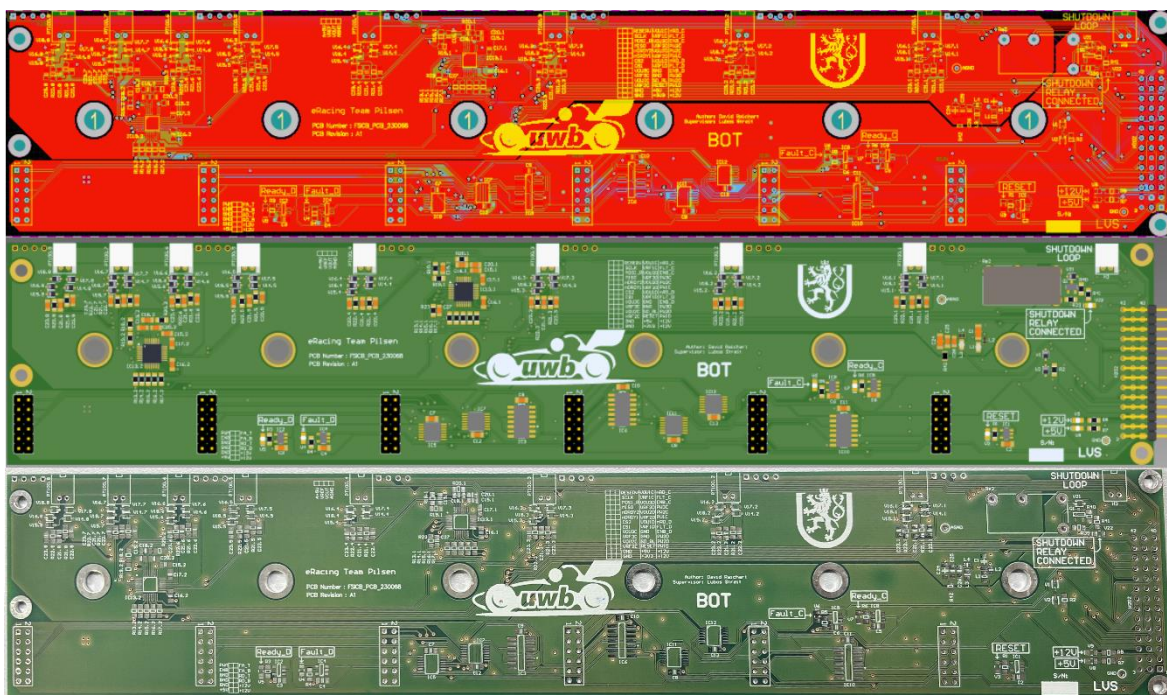
Tato deska bude umístěna přímo na konektorech dohromady šesti desek budičů. Její tvar je adekvátně zvolen tak, aby bylo možné připojit šest modulů vedle sebe a zároveň aby svojí tloušťkou nezasáhla do nejvyšší součástky na desce budičů, kterou jsou zdroje buzení. Její délka činí 30 cm a tloušťka 5,8 cm. Na desce musí být opět viditelně oddělena bariéra mezi TS a LVS částí. U této desky se jedná o minimální vzdálenost 3.8 mm s frézováním a 6 mm bez frézování s lakováním. Deska je rozdělena na tři části. Část TS, ve které se nachází obvody pro měření napětí DC linku. Dále se v TS části nachází obvod pro vybíjení DC linku. V této části umístěné fastony, vedoucí na vybíjecí rezistor a na DC link, mají mezi sebou opět zachovanou izolační vzdálenost. Další částí desky je digitální část LVS. V této části se nacházejí hlavní propojovací konektory na budiče, spolu s logikou určenou ke spojování signálů a její světelnou signalizací pomocí LED. Dále se zde nachází nízkonapěťové části obvodů, jejichž druhá část tvoří TS část. U LVS části vybíjecího obvodu se nachází JST konektor vedoucí na shutdown formule. Použitý konektor také funguje pro získání informací o shutdown obvodu, které jsou pomocí signálu dovedeny do řídicí desky. Z tohoto důvodu je na desce označen jako Shutdown sense. V této části desky se nachází také pravoúhlý konektor, vedoucí do řídicí desky, u kterého je umístěna ještě světelná signalizace napájení 5 a 12 V. Poslední částí desky je analogová LVS. Analogová a digitální část jsou mezi sebou propojeny. Země analogová a digitální jsou spojeny pomocí nulového rezistoru v jednom bodě a už dále nesmí dojít k jejich spojení nikde jinde. Analogové napětí A+3V3 a A+5V je odděleno pomocí filtru. V analogové části se nachází konektory z budičů pro měření proudu. Dále se zde nachází obvody pro měření teploty spolu s konektory na připojení čidel PT100. V analogové části je v horní a dolní ploše vylita analogová zem, v prostředních vrstvách je vylito analogové napětí A+3V3 a A+5V. V digitální části LVS je opět v horní a dolní ploše vylita zem a v prostředních plochách je vylito napětí +5V a +12V. V TS se nachází pouze malá vylitá ploška a všechny její vrstvy jsou vylity pomocí -DC, což zde nahrazuje zem. Na desce jsou pomocí popisků označeny piny všech konektorů, součástky a jednotlivé LED. Deska bude spojena s deskou budičů a modulem pomocí šroubů umístěných v průchozích dírách ve středu desky. Na desce jsou dále umístěny další menší díry, přes které bude deska spojena s řídicí deskou a s rámem.



Obr. 3.4 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené horní sběrné desky

### 3.4 Návrh dolní sběrné desky

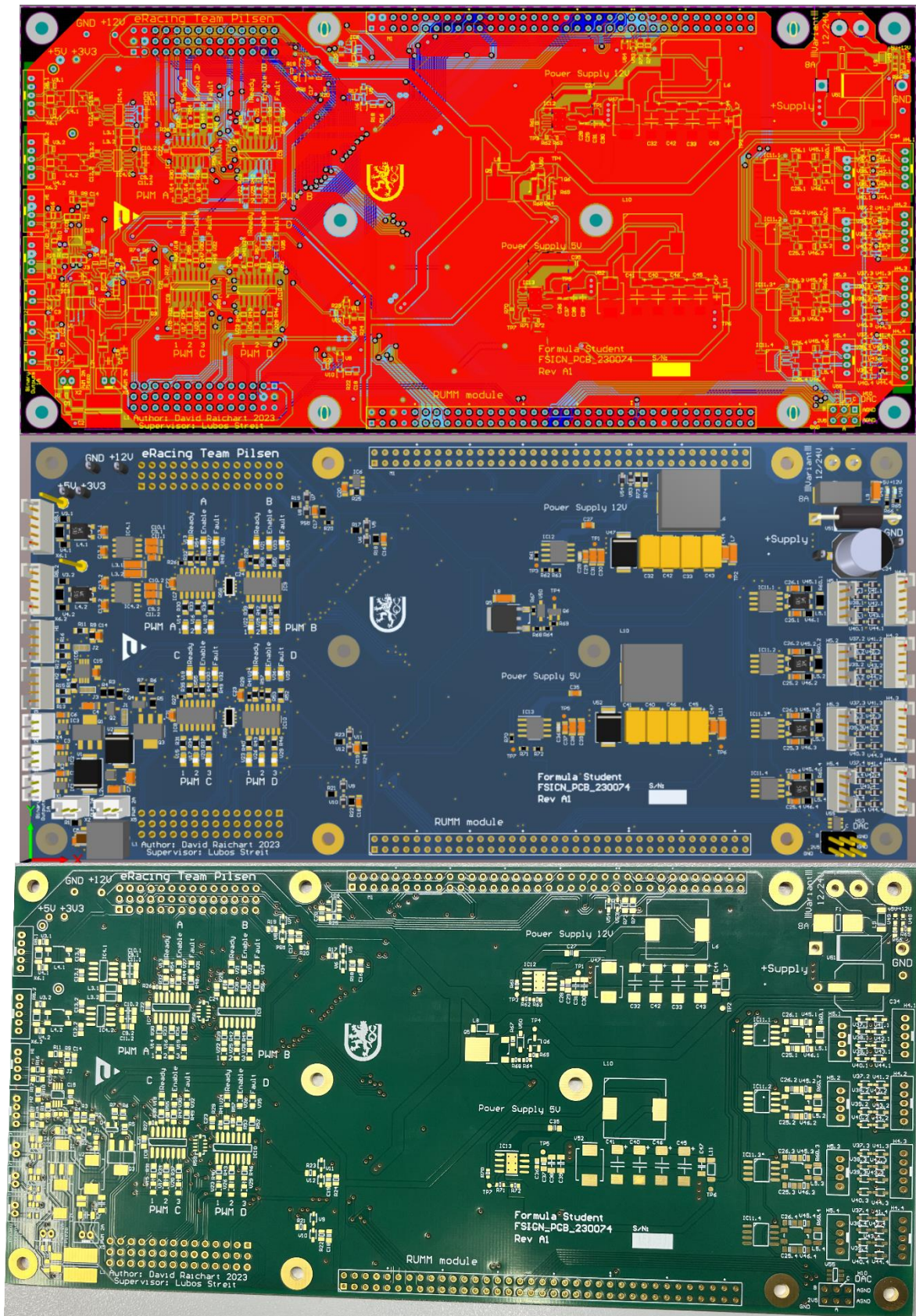
Jedná se o velmi podobnou desku jako je horní sběrná deska. Její název vypovídá, že bude umístěna zespodu. Bylo tedy nutné celou desku předělat tak aby byla zrcadlově prohozena oproti její horní variantě. Další změnou je zde to, že se na této desce nenachází žádná TS část a obvody s touto částí spojené. Na desce tedy není žádná izolační bariéra. Její rozměry byly zachovány stejné jako u horní desky z důvodu jednoduššího spojování a upevňování sestavy. Deska se tedy dělí pouze na analogovou a digitální část. Rozvržení desky a komponenty jsou téměř totožné, když neuvažujeme zrcadlení. Jediná věc, která na desce přibyla, je obvod pro rozpojování shutdown obvodu, vybaven poměrně velkým relé a opět konektorem na vstup a výstup shutdown obvodu. Vylité plochy, popisky a upevňující otvory opět odpovídají desce horní.



Obr. 3.5 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené dolní sběrné desky

### 3.5 Návrh řídicí desky

U volby tvaru této desky se u šířky vycházelo z potřebné vzdálenosti mezi konektory ze sběrných desek a rumu. U délky se vycházelo z předpokládané šířky celé sestavy. Šířka byla stanovena na 10 cm a délka na 21 cm. Tato deska opět neobsahuje žádnou TS část, tudíž se zde nemusíme zabývat izolační bariérou. Na desce je umístěno velké množství konektorů. Hlavní konektory jsou na připojení modulu RUMM a na připojení sběrných desek. Zbytek konektorů vedoucích k ostatním periferiím musí být umístěn mimo RUMM, aby bylo možné do konektorů napojit kabely. Jedná se tedy o okraje desky. V horní pravé části desky se nachází přívod hlavního napájení, opatřený patřičnými ochrannými obvody a konektorem. Konektor je umístěn z druhé strany desky a bude na něj připojen centrální 24 V zdroj pro ovládací obvody formule. Z tohoto přívodu je přiveden proud do dalších zdrojů umístěných pod RUMMem, které vytváří napětí 12 a 5 V pro celou sestavu. U těchto zdrojů je rozmístění součástek provedeno podle datasheetu těchto zdrojů [16]. Je zde i vylita plocha doporučeným způsobem opět podle datasheetu [16], toto zapojení je provedeno z důvodu zajištění co nejefektivnějšího uzavření toku proudu v obvodu zdrojů. Funkčnost těchto dvou zdrojů je signalizována LED, které jsou umístěné blízko přívodu napájení. Pod přívodem napájení se nachází obvody s konektory pro měření polohy a teploty motorů. Světelná signalizace musí být také umístěna mimo RUMM, aby bylo na LED vidět. Nachází se na druhém okraji desky mezi konektory na collectory. Všechny LED jsou opatřeny popisky. U světelné signalizace se nachází zbytek konektorů a jejich obvodů, které jsou popsány z druhé strany desky. Na celé desce je v horní a dolní vrstvě vylita zem a v prostředních vrstvách napětí 3,3 V a 5 V. Napětí 12 V je vedeno pouze cestami, protože je na této desce využito zřídka. Jednotlivé konektory jsou označeny popisky na druhé straně desky.

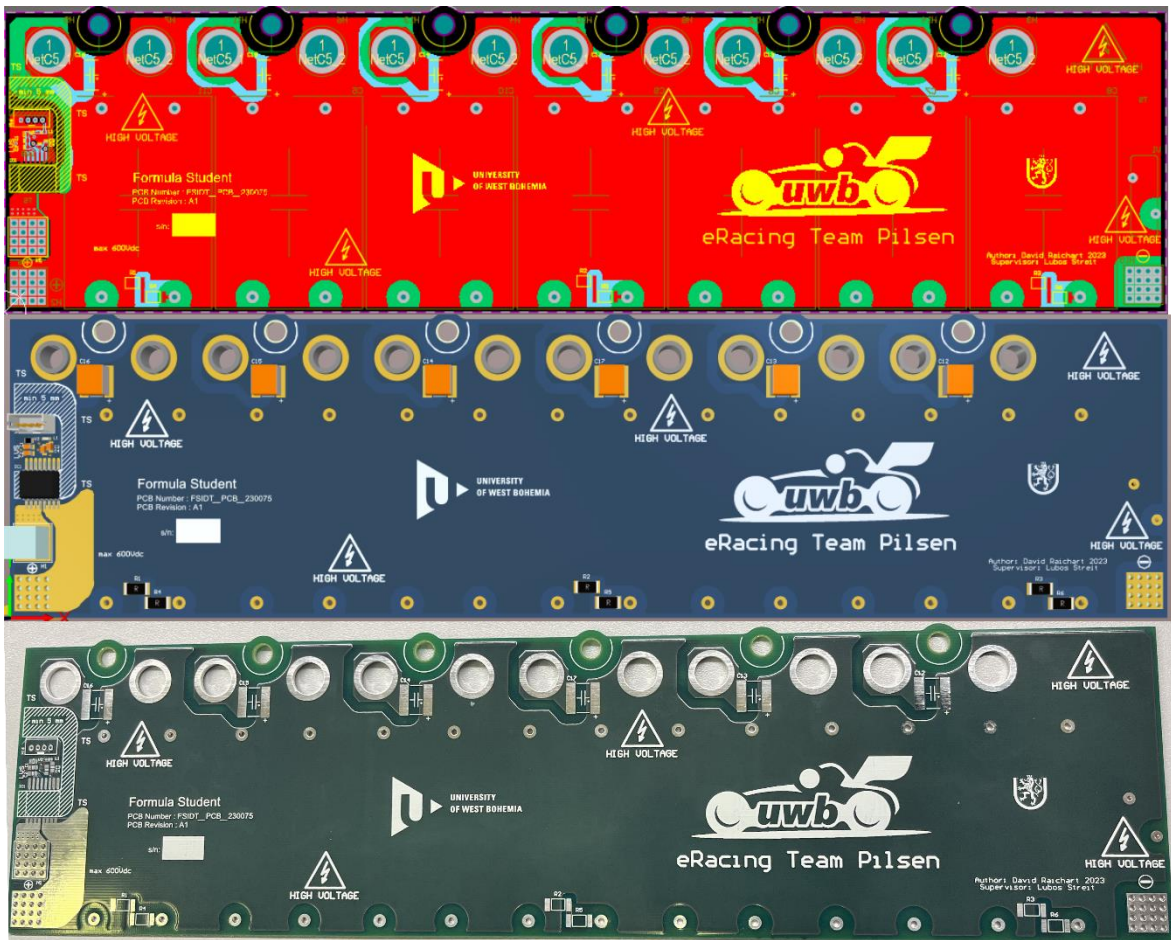


Obr. 3.6 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené řídicí desky

### 3.6 Návrh horní desky kondenzátorů

Tvar této desky vychází opět z rozmístění modulů. Její šířka byla zvolena především podle délky použitých kondenzátorů. Na délku má 32,3 cm a na šířku 8 cm. Opět se zde nachází TS a LVS část. Nízkonapěťovou část tvoří signálová část čidla proudu a její konektor vedoucí na řídicí desku. Opět je zde nutno dodržet viditelnou izolační bariéru, a to minimálně 5 mm s lakováním desky. Zbývá TS část se dělí na část s kladným a záporným napětím. Tyto části mají mezi sebou udržovanou pracovní izolační bariéru, a to minimálně 3 mm. Moduly tranzistorů jsou do desky připojeny stejnými kruhovými propojkami jako jsou na desce budičů. Přivedení proudu z trakční baterie je provedeno pomocí pressfitů, umístěných na okraji desky u čidla proudu. Přiváděný proud je po přivedení do desky změřen a poté dále rozveden po desce. Na druhém kraji desky je umístěn varistor a je zde připojen záporný přívod z trakční baterie. Aby bylo zaručeno rovnoměrné rozložení proudu mezi horní a dolní deskou, tak z trakční baterie bude plus přiveden na horní desku a z horní desky na spodní pomocí propojky a mínus bude přiveden na spodní desku a ze spodní desky na horní pomocí propojky. Přenos proudu je po desce proveden vylitými plochami. Ve dvou vrchních vrstvách je vylita plocha kladná, přivádějící proud a ve dvou spodních vrstvách desky je vylita plocha záporná, odvádějící proud. Rozložení proudu není ideální především z toho důvodu, že se nepodařilo kondenzátory otočit z prostorových důvodů tak, aby kladný pin byl stejně daleko jako záporný a tím došlo k ideálnějšímu rozložení toku proudu mezi střídači a DC linkem. Kondenzátory jsou v tuto chvíli umístěny tak že kladné piny mají blíže k modulům než záporné.

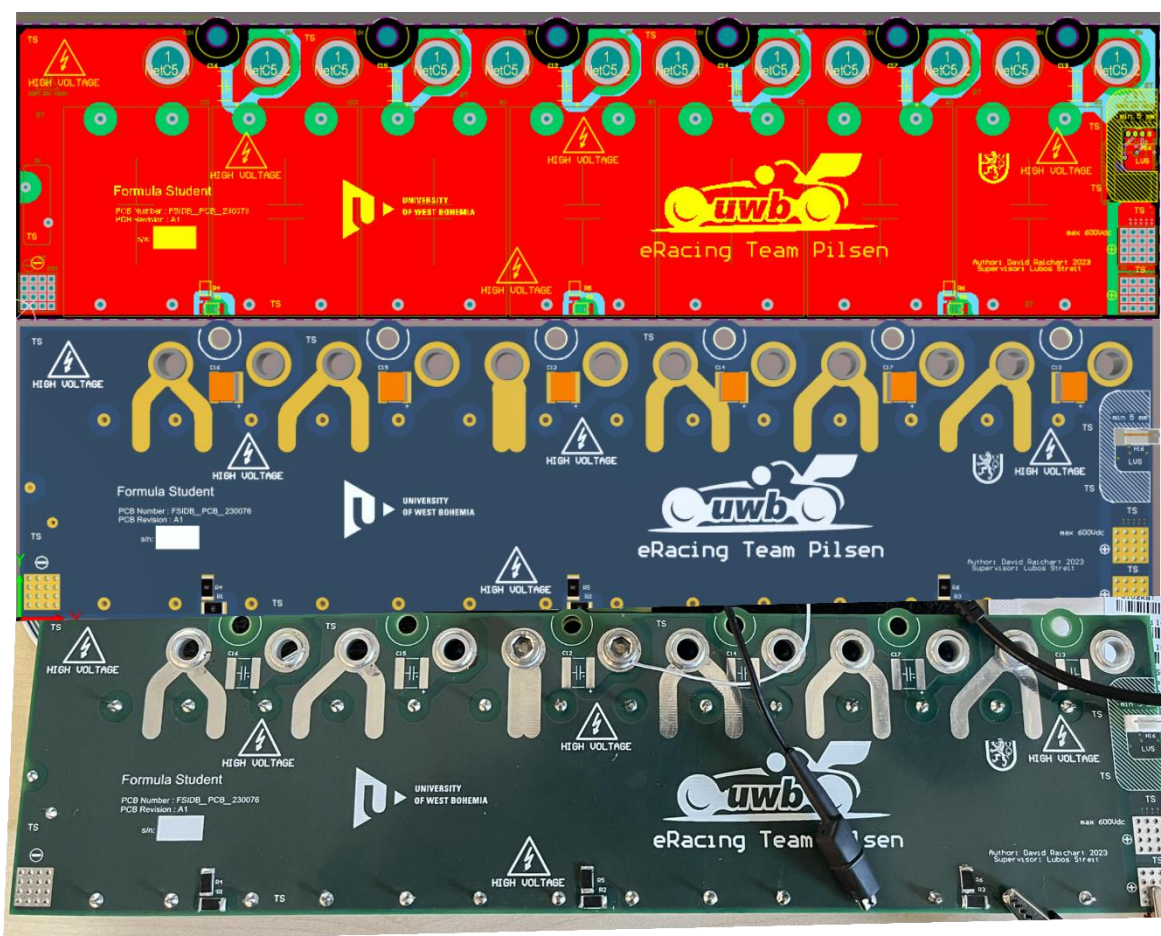




Obr. 3.7 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené horní kondenzátorové desky

### 3.7 Návrh spodní desky kondenzátorů

Jedná se o téměř totožnou desku jako je její horní alternativa. Opět bude tato deska umístěna zespodu sestavy, tudíž musí dojít k zrcadlovému otočení všech komponent. Další změnou je to, že zde díky zrcadlení došlo k tomu, že je výhodnější prohodit i vrstvy vylitých ploch. Dvě horní vrstvy budou mít vylité záporné napětí -DC, a dvě spodní vrstvy desky budou mít kladné +DC. Měřicí obvod proudu je z důvodu prohození vrstev umístěn zespodu desky i s jeho LVS částí. Stejnoseměrné napětí v DC linku je u obou desek uvažováno na maximálně 600 V.



Obr. 3.8 Obrázek 2D návrhu desky, 3D modelu a vyrobené dolní kondenzátorové desky

## 4 Osazení a oživení navrhnutých desek

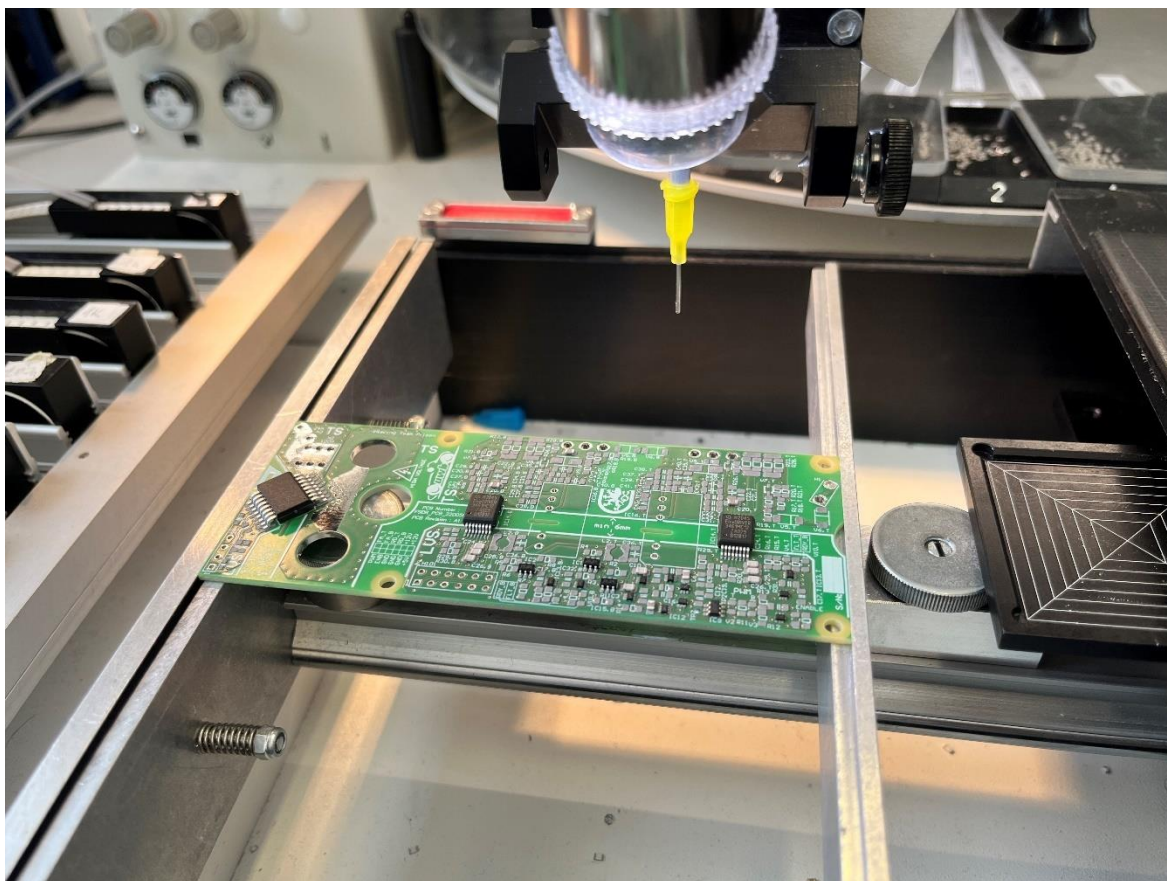
Po dokončení návrhu desek byly vygenerovány výrobní podklady a seznamy součástek. Výrobní podklady byly zaslány do firmy specializované na výrobu desek plošných spojů. Ze seznamu součástek se vytvořil nákupní seznam a součástky byly objednávány z různých obchodů, kde byla nalezena součástka skladem. Po doručení všech desek bylo nutné počkat na doručení všech součástek. Jakmile byly součástky doručeny, tak se zaznamenaly do nákupního seznamu dané desky. Po obdržení všeho materiálu se připravil karusel poloautomatického osazovacího zařízení, kam se rozmístily nejpočetnější součástky. Nyní bylo možné zahájit osazování desek. Osazování bylo prováděno ručně pomocí poloautomatické osazovačky Obr. 4.1 Fotografie poloautomatického osazovacího zařízení s připravenou deskou budičů. Nejprve byla na desku nanесena pájecí pasta rozetřením přes šablonu dodanou s deskou. Po nanесení pasty byla deska umístěna do svěráku v osazovacím zařízení. Součástky byly osazovány ručně manipulací ramenem osazovacího přístroje. Na tomto rameni byla umístěna mikroskopická kamera pro lepší viditelnost při osazování a vakuová jehla, která sloužila pro uchycení i těch nejmenších součástek. Při osazování se nejprve osadily integrované obvody a následně zbytek součástek. Po osazení byla deska umístěna do průběžné pájecí pece, kde se pájecí pasta přetavila a zaručila vodivé spojení součástek na jejich místo dané návrhem desky. Součástky THT zatím nebyly osazovány. Touto metodou byly osazovány pouze součástky SMD. Po dokončení zapečení SMD součástek bylo nutné součástky THT včetně konektorů zapájet do desky ručně pomocí páječky. Po kompletním osazení desek byly desky vyčištěny pomocí izopropylalkoholu a proběhla u nich pečlivá vizuální kontrola. Pokud na desce byla zjištěna kontrolou chyba, bylo nutné tyto chyby opravit. Na deskách nejčastěji docházelo ke špatnému zapečení a nepropojení kondenzátorů anebo také ke spojení vývodů integrovaných obvodů. Kondenzátory stačí ručně zapájet, ale odstranit propojení blízkých vývodů integrovaných obvodů může být značně složité. Tato závada byla odstraňována pomocí zahřátí odsávací licny, přiložené na vývody. Často docházelo ke spojení těch nejmenších vývodů, proto bylo nutné pracovat velice opatrně. Pokud deska byla kompletně osazena a následně opravena, bylo možné přejít k jejímu oživení. Nepodařilo se oživit všechny desky, především z důvodu nemožnosti kompletního osazení. Některé součástky se nepodařilo sehnat včas, a bude nutné je osadit dodatečně až budou skladem a následně oživit dané desky.



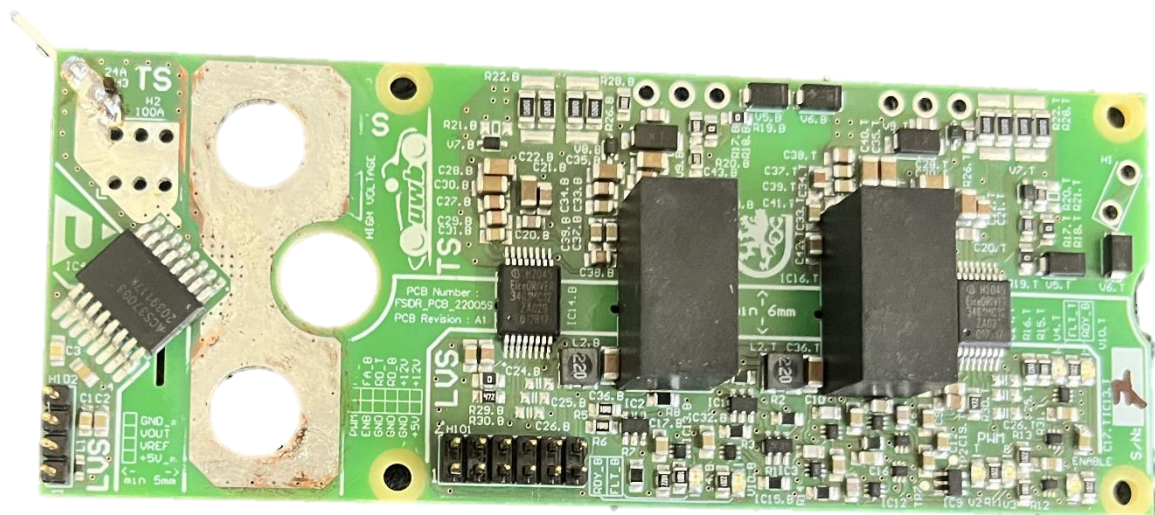
Obr. 4.1 Fotografie poloautomatického osazovacího zařízení s připravenou deskou budičů

#### 4.1 Desky driverů

Osazování desek budičů bylo ze všech nejsložitější. Bylo nutné osadit těchto desek dohromady 13 kusů. Pro každý ze čtyř střídačů tři desky a jednu náhradní. Protože se tato deska osazovala tolikrát, mělo cenu rozřídít součástky do karuselu, aby se zrychlil proces osazování. Při osazování bylo nutné pamatovat na správnou polaritu integrovaných obvodů a diod. Některé součástky neměly být účelně osazeny. Osazování bylo velmi časově náročné, takže byla nutná pomoc od další členů týmu formule. Pomocníkům musel být postup podrobně vysvětlen a museli být seznámeni s tím, jaké součástky nemají osazovat a podle čeho mají poznat polaritu součástek. Tato pomoc byla velice užitečná, ale vzniklo při ní množství chyb, které se následně musely ručně opravovat. Po osazení a opravě se do každé desky musely ručně zapájet konektory a zdroje pro buzení.



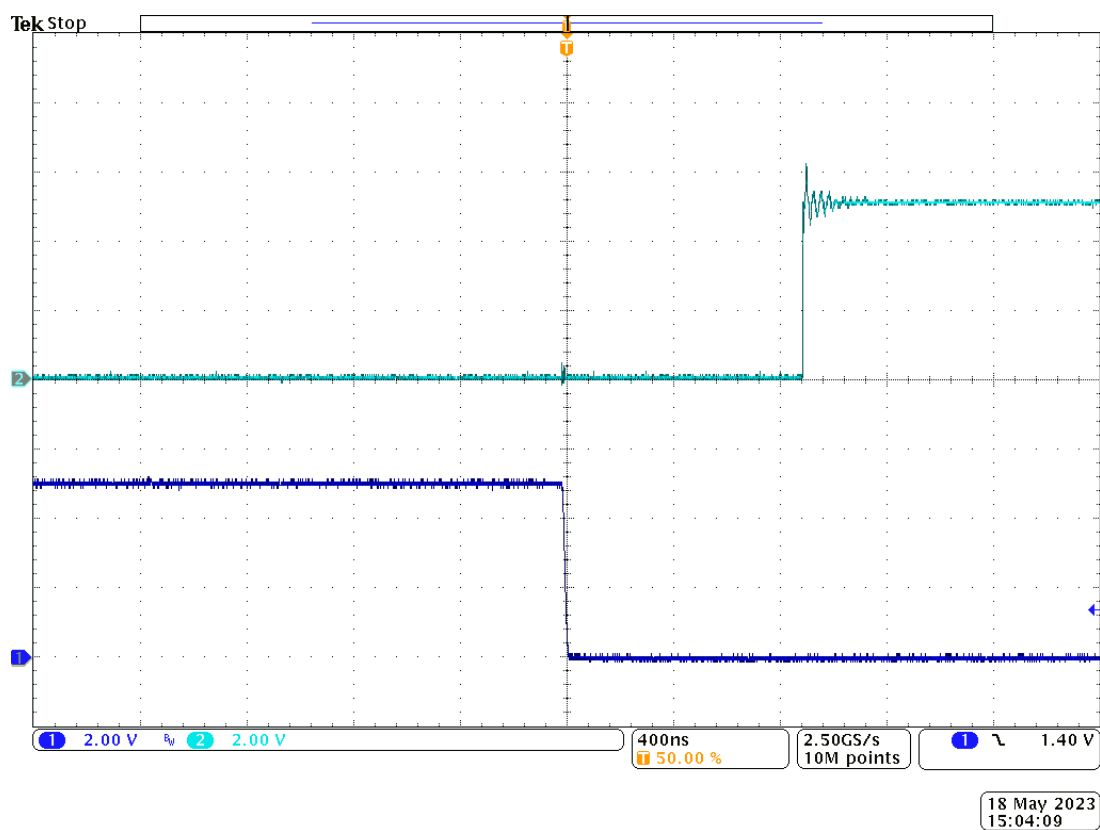
Obr. 4.2 Fotografie z průběhu osazování desky budičů



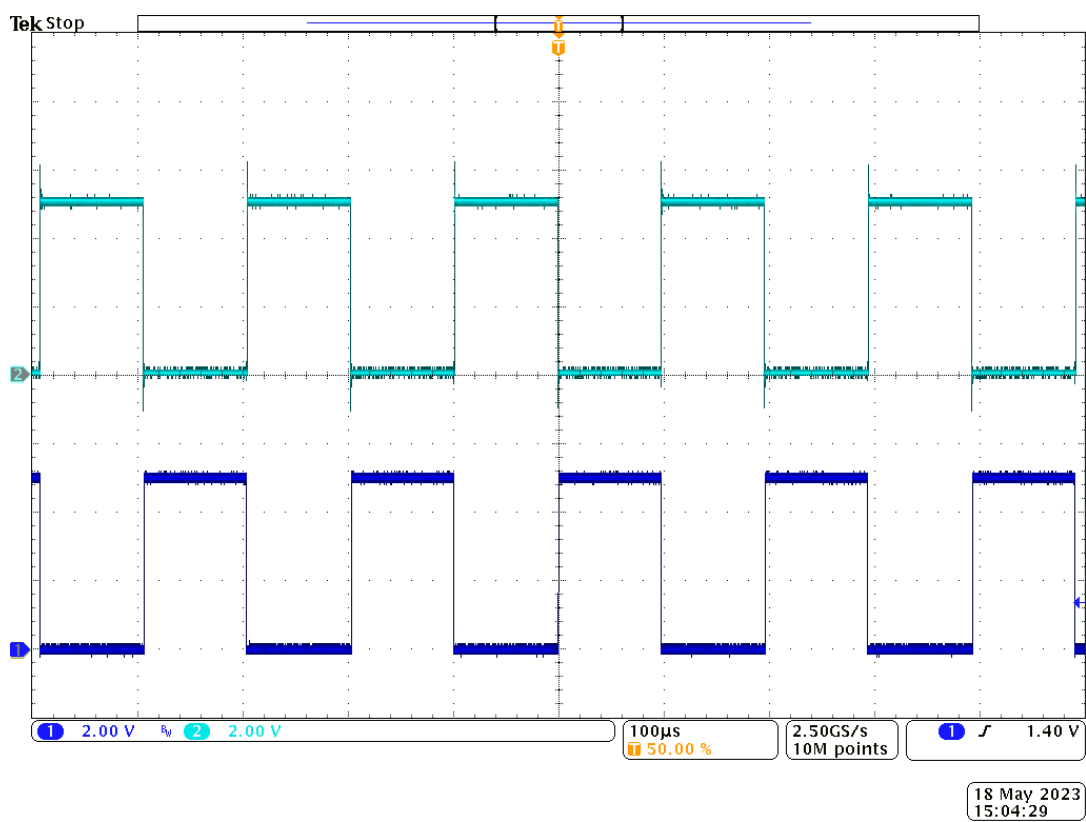
Obr. 4.3 Fotografie již plně osazené desky budičů

Před použitím střídače se musí postupně oživit všechny desky, ale pro otestování funkčnosti návrhu stačí pouze jedna. Po kompletaci desek byla vybrána jedna z nich na oživení. Byla zvolena deska číslo 9. Při oživování bylo nejprve ozkoušeno připojení zdroje 5 V na konektor desky. Nedošlo k rozsvícení žádné LED a odebíraný proud byl nízký. Poté

bylo vyzkoušeno na signál ENABLE připojit napětí. Signalizační LED tohoto signálu se rozsvítila. Následně bylo vyzkoušeno připojení napětí 5 V na vstup PWM. LED horní a dolní PWM se rozsvítily, ale nedošlo k rozsvícení LED Ready. Budič nebyl připraven z toho důvodu, že driver nebyl napájen ze zdroje pro driver a tím pádem nemohl vytvořit budící signál pro tranzistor. Následně byla deska připojena i na napájení 12 V. Po připojení 12 V došlo k rozsvícení LED Ready, čímž budič oznámil svoji připravenost ke spínání tranzistoru. Na vstup PWM byl připojen generátor signálů vysílající obdélníkový signál. Tím došlo opět k aktivaci LED signalizujících připojení PWM. Po jeho připojení ale došlo k rozsvícení chybové diody Faultů. Zahlášení chyby bylo očekávané, protože nebyl připojen tranzistor a budič vyhodnotil větší úbytek způsobený vnitřním zdrojem budiče, než je nastavená hranice úbytku v nadproudové ochraně. Pomocí osciloskopu bylo zkontrolováno, jestli obdélníkový signál vstupuje do budiče a také jestli funguje obvod na mrtvé časy. Změřené průběhy jsou vidět na obrázcích 4.4 a 4.5 níže. Dále bylo vyzkoušeno odpojení PWM a uzemnění obou signálů Ready. Tímto krokem mělo dojít k resetu budičů a ke zhasnutí LED signálů Fault což se úspěšně povedlo.

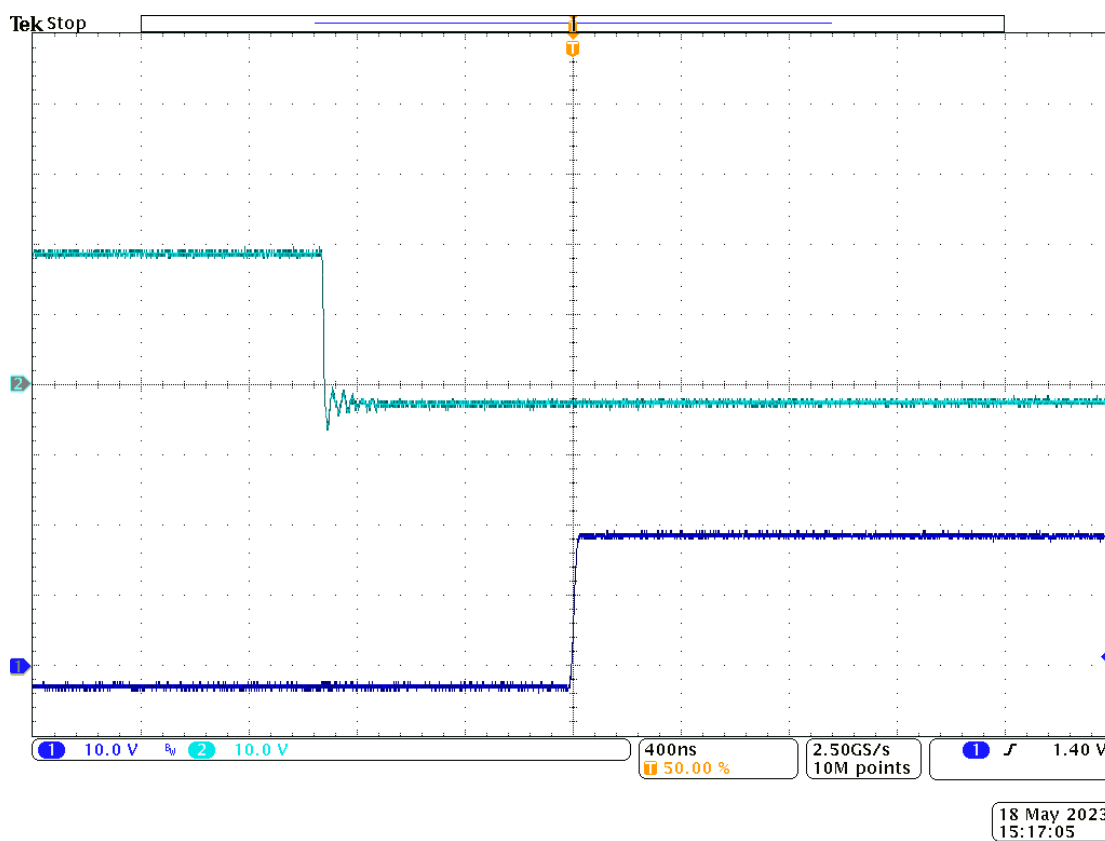


Obr. 4.4 Průběh ověření funkčnosti obvodu na mrtvé časy na vstupu do budičů



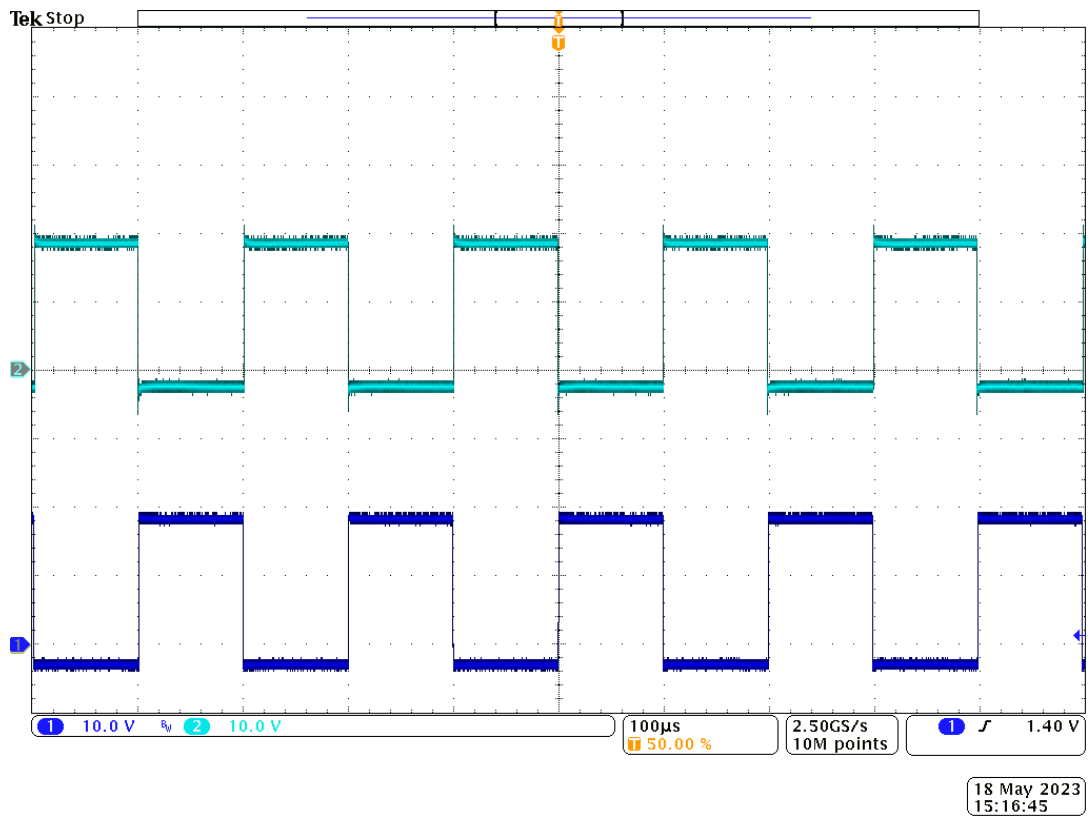
Obr. 4.5 Průběh z generátoru signálů na vstupu do budičů

Po ověření této funkce bylo pomocí drátků vytvořeno spojení simulující tranzistor, aby nedošlo k vybavení nadproudové ochrany tranzistoru a rozsvícení Faultu. Nyní nedošlo při zapojení generátoru signálů k rozsvícení Faultu což bylo předpokládáno. Tentokrát byl osciloskop připojen na výstup z budiče na tranzistor. Opět bylo ověřeno, že budiče fungují změřením průběhů na Obr. 4.7 Průběh řídicího napětí horního a dolního tranzistoru. U tohoto průběhu je vidět zvolené budící napětí od -2,5 do 18 V, které je tvořeno zdroji na desce. Mrtvé časy jsou zde také viditelné na Obr. 4.6 Průběh ověření funkčnosti obvodu na mrtvé časy na výstupu budičů. Po úspěšném otestování se dá deska považovat za oživenou. K podrobnějšímu ověření funkčnosti dojde po smontování soustavy a po vytvoření softwaru do řídicí jednotky.

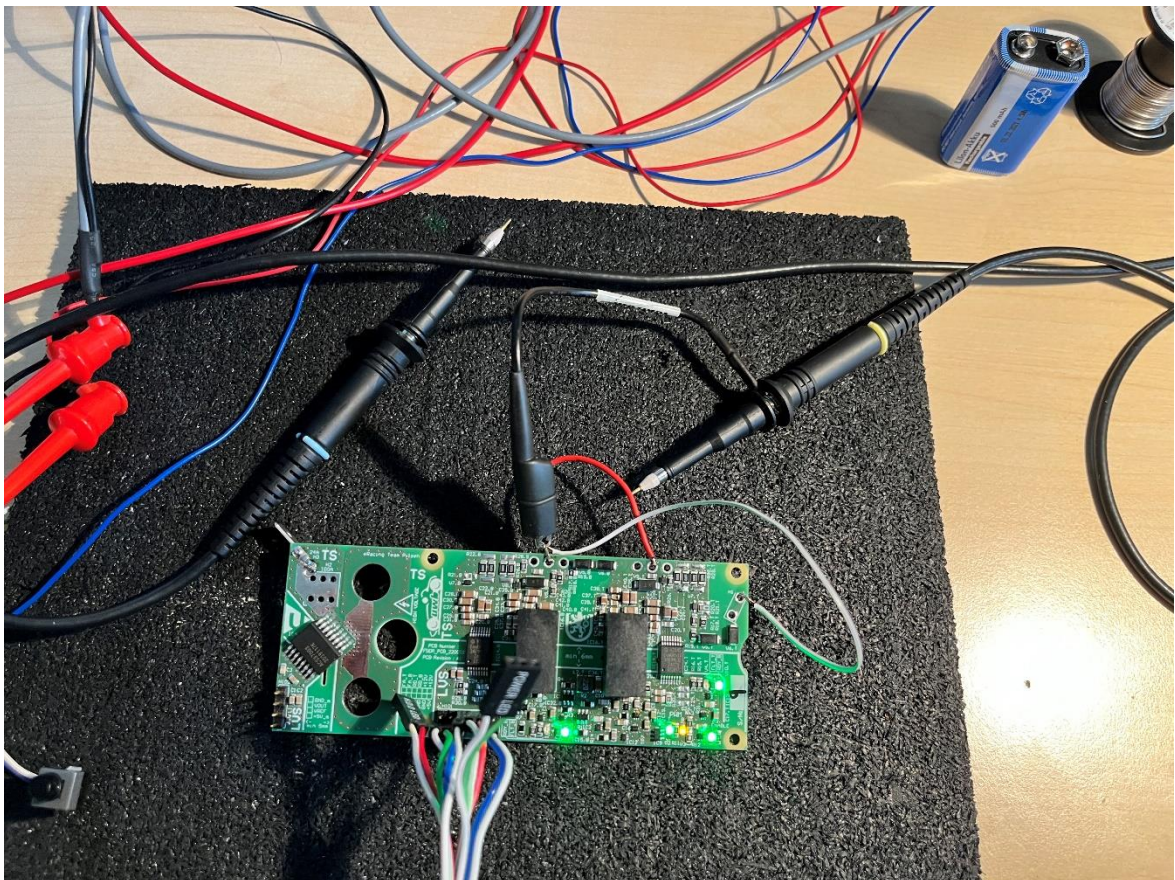


Obr. 4.6 Průběh ověření funkčnosti obvodu na mrtvé časy na výstupu budičů





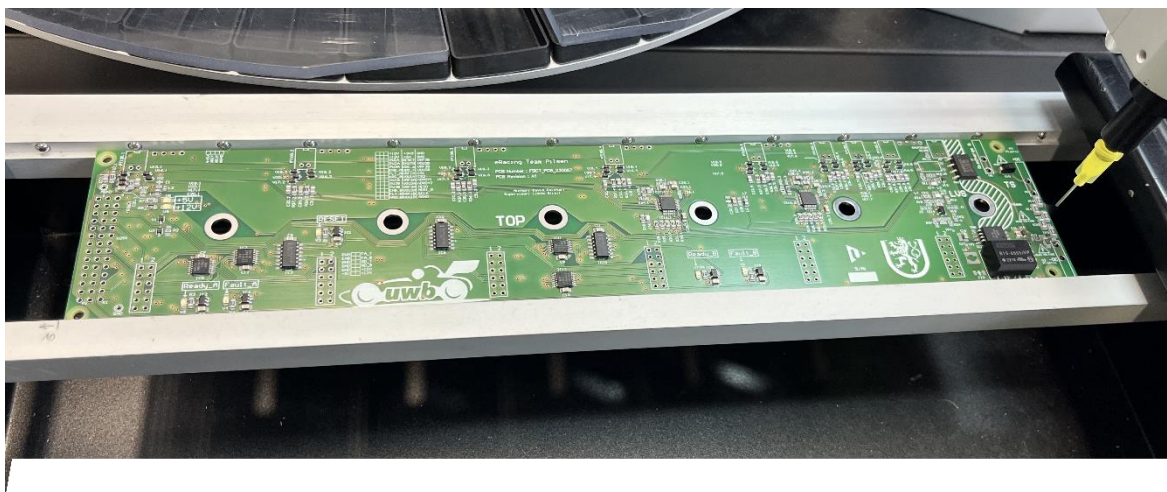
Obr. 4.7 Průběh řídicího napětí horního a dolního tranzistoru



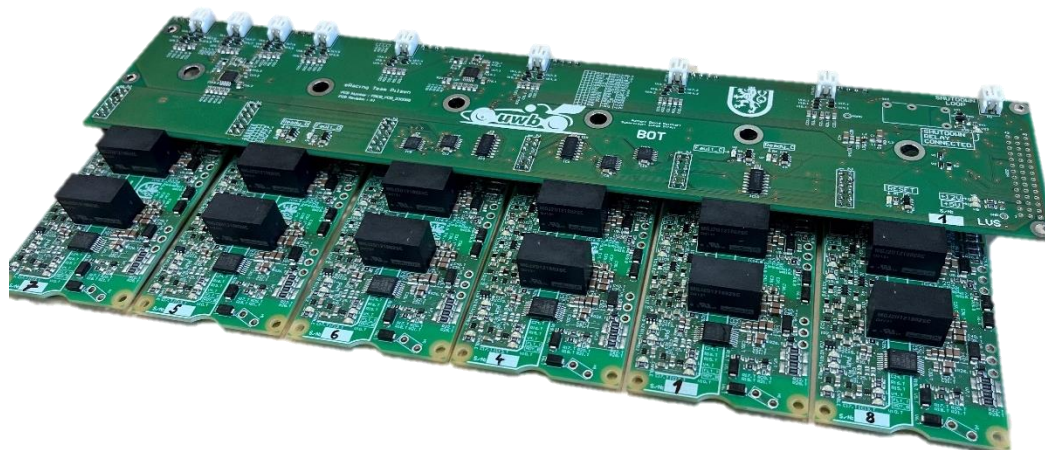
Obr. 4.8 Fotografie z průběhu ožívování desky budičů

## 4.2 Sběrné desky

Při osazování těchto desek by bylo zbytečné používat karusel, protože se každá z nich osazovala pouze jednou. Osazování opět probíhalo pomocí osazovačky. Po osazení desek byly opět vizuálně zkontrolovány a případně opraveny. Při osazování těchto desek nevzniklo mnoho chyb, takže oprava nebyla náročná. Po osazení součástek typu SMD bylo nutné ještě ručně doosadit zbylé THT součástky které převážně tvořily konektory.



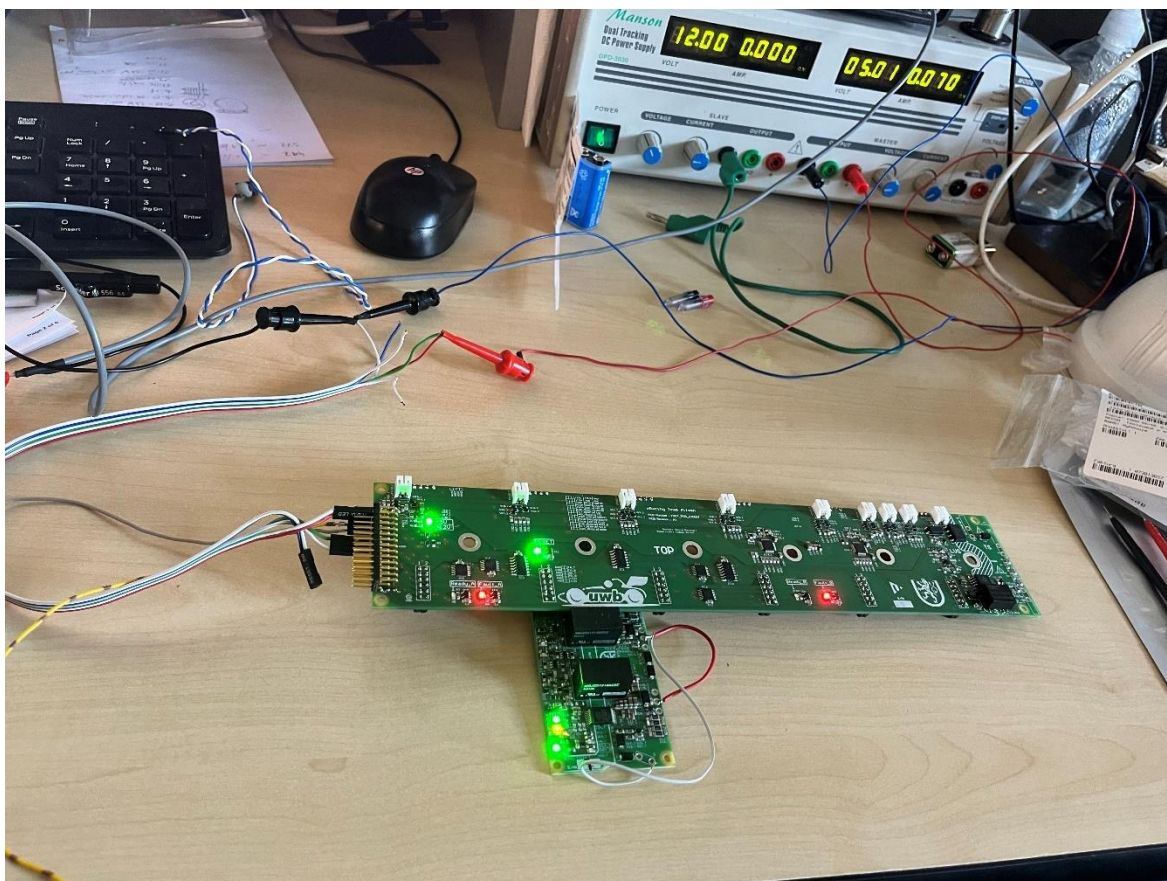
Obr. 4.9 Fotografie sběrné desky v průběhu osazování



Obr. 4.10 Fotografie plně osazené sběrné desky s připojenými deskami budičů

Při osazování byl postup podobný jako u desek budičů. Nejprve byl připojen zdroj 5 V a bylo sledováno, jestli deska neodebírá větší než očekávaný proud. Poté byla připojena již

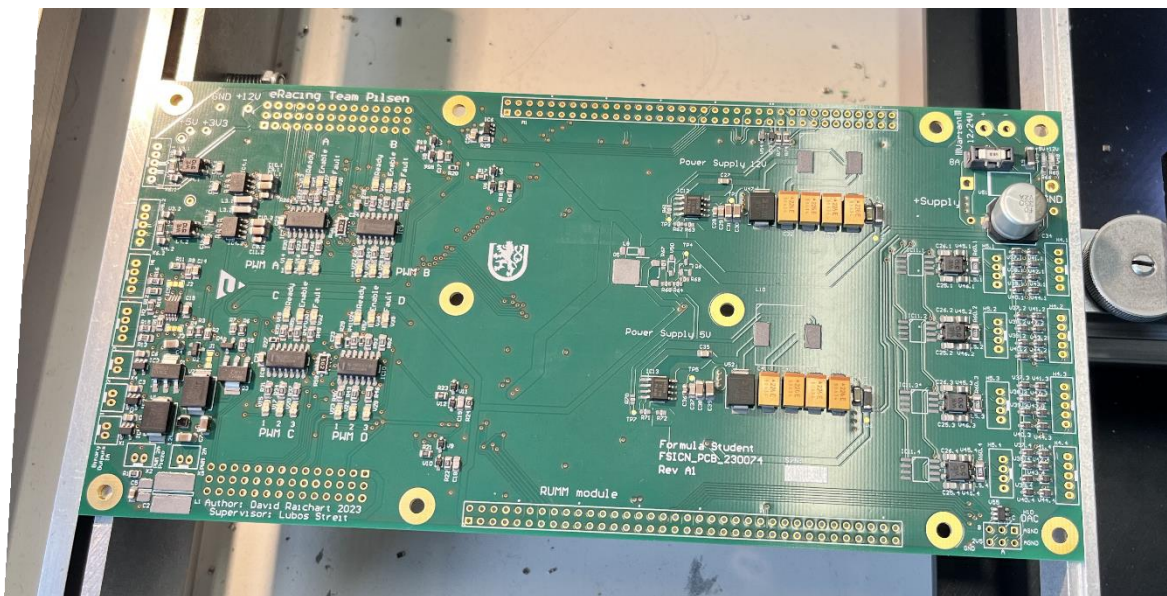
oživená deska budičů a bylo sledováno chování LED obvodů pro spojování signálů a také LED na připojené desce budičů. Další postup probíhal tak, že bylo zkoušeno pomocí sběrné desky provádět úkony, které byly prováděny přímo na samostatné desce budičů. Podařilo se všechny tyto úkony ověřit a deska se dá tedy považovat za oživenou. Další otestování funkcí bude možné po oživení a připojení všech desek budičů a po sestavení celé sestavy.



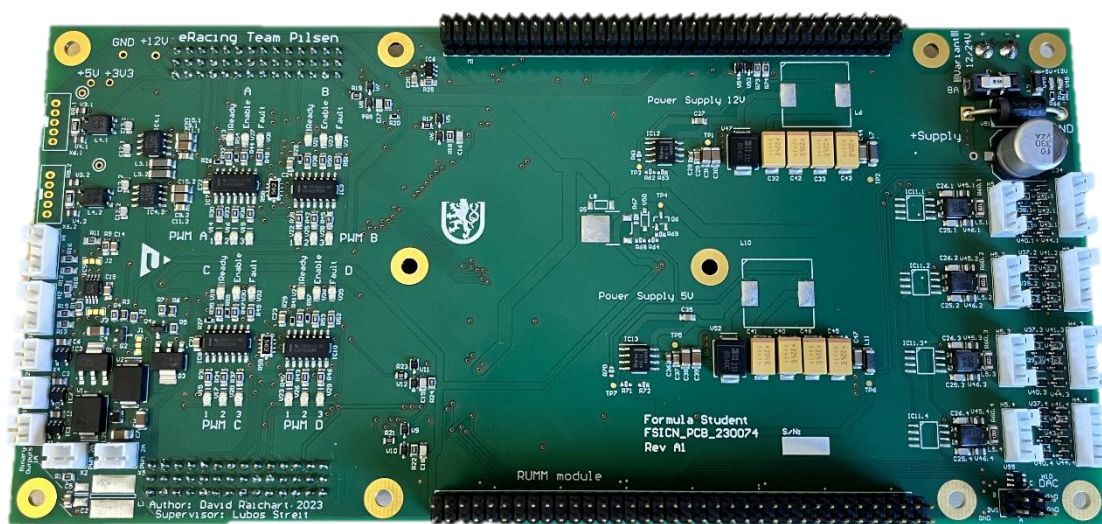
Obr. 4.11 Fotografie z průběhu ožívování sběrné desky

### 4.3 Řídicí deska

Postup osazování této desky byl podobný jako u sběrných desek, protože se opět jednalo o jeden kus, tak nebylo zapotřebí třídit součástky do karuselu. Na této desce při osazování a zapékání nevznikly téměř žádné chyby a bylo nutné pouze ručně zapájet součástky THT, které byly opět z větší části konektory.



Obr. 4.12 Fotografie z průběhu osazování řídicí desky



Obr. 4.13 Fotografie plně osazené řídicí desky

Tuto desku nebylo možné oživit z důvodu několika chybějících součástek a také proto, že by k jejímu oživení bylo potřeba vytvořit software, který nebyl předmětem této práce.

#### 4.4 Desky kondenzátorů

Osazování těchto desek bylo ze všech nejjednodušší, protože obsahují kromě čidla proudu pouze součástky typu THT. Toto osazování bylo provedeno celé ručně a nebyla zapotřebí ani osazovačka. Na konci osazování se do desek ještě zapájely kruhové propojky pro připojení na výkonové moduly.



Obr. 4.14 Fotografie plně osazené desky kondenzátorů



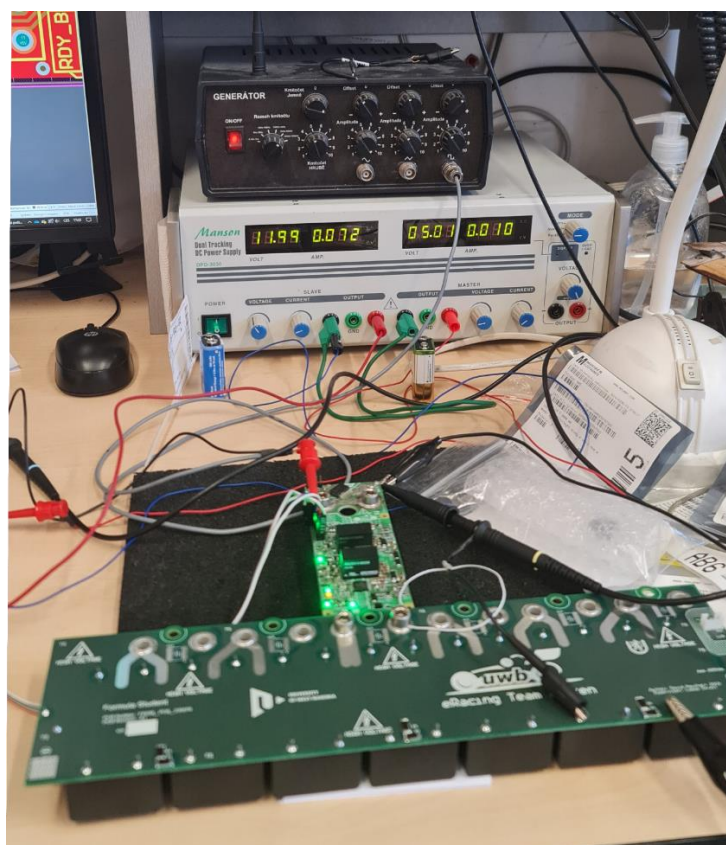
Obr. 4.15 Fotografie obou plně osazených desek kondenzátorů

Tyto desky také nebyly oživované, a to z důvodu toho, že jediná část desky, která by se dala otestovat, je proudové čidlo, a to není možné otestovat, pokud není sestavená celá sestava.

## 5 Experimentální ověření funkce se silovou částí trakčního strídače

### 5.1 Experimentální ověření funkce

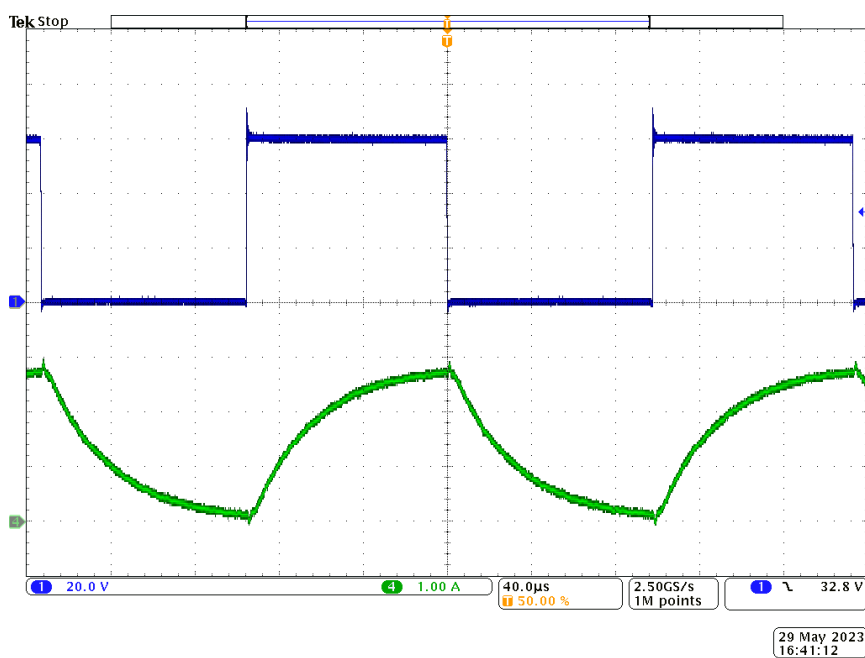
Experimentální ověření funkce bylo provedeno připojením již oživené desky budičů na výkonový modul. Jeden modul byl připojen na kondenzátorovou desku DC linku. DC link byl připojen na zdroj stejnosměrného napětí, který sloužil jako simulace trakční baterie. Deska budičů byla připevněna a připájena na výkonový modul a pomocí generátoru signálů bylo vyzkoušeno, že tranzistor úspěšně spínal do odporové zátěže simulující fázi motoru viz Obr. 5.2. Napětí na DC linku bylo zvoleno na 60 V a odporová zátěž byla zvolena na 20  $\Omega$ .



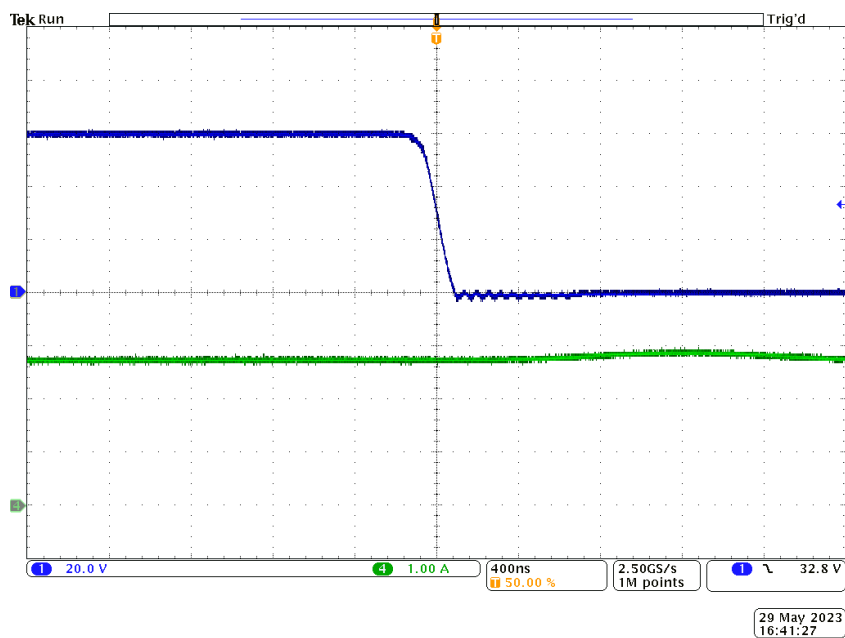
Obr. 5.1 Fotografie desky budičů a DC linku pořízená při experimentálním ověřování funkce strídače

Při ověřování funkčnosti byly pomocí osciloskopu naměřeny průběhy znázorněné na obrázcích níže. Kanál CH1 (modrý) na obrázcích představuje napětí na výstupu modulu proti mínusu, tedy napětí na zátěži. Kanál CH2 (zelený) představuje proud odporovou zátěží. Byly ověřeny i detaily vypnutí a sepnutí na Obr. 5.3 a Obr. 5.4.

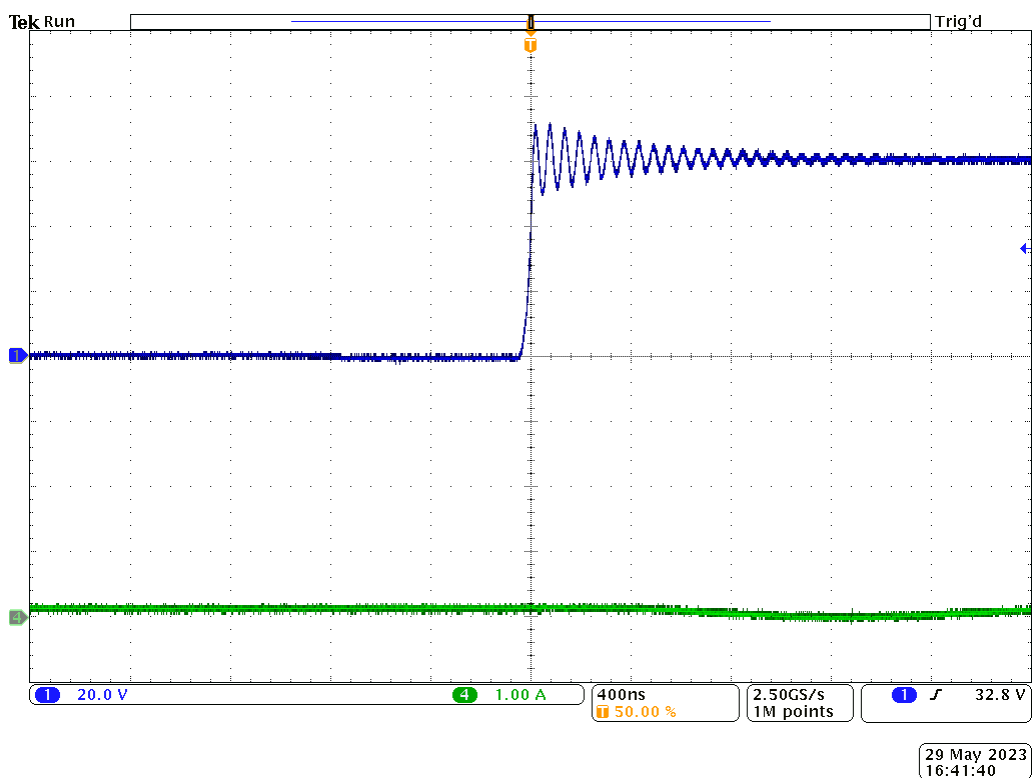
Byla ozkoušena funkce střídačů i při cílové spínací frekvenci 20 kHz viz Obr. 5.5. Pro plné otestování měniče je zapotřebí provést oteplovací zkoušku při plném výkonu, což nebylo cílem této práce.



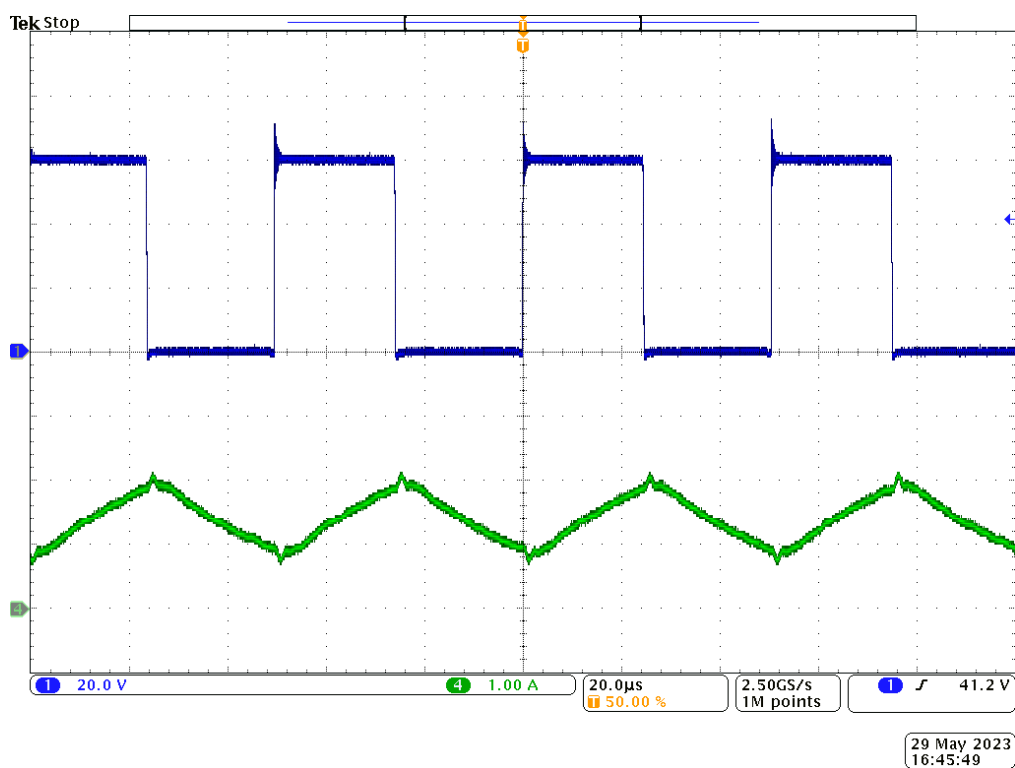
Obr. 5.2 Průběh při spínání s nižší spínací frekvencí



Obr. 5.3 Průběh detailu přepětí



Obr. 5.4 Průběh detailu přepětí



Obr. 5.5 Průběh při spínání se spínací frekvencí 20 kHz



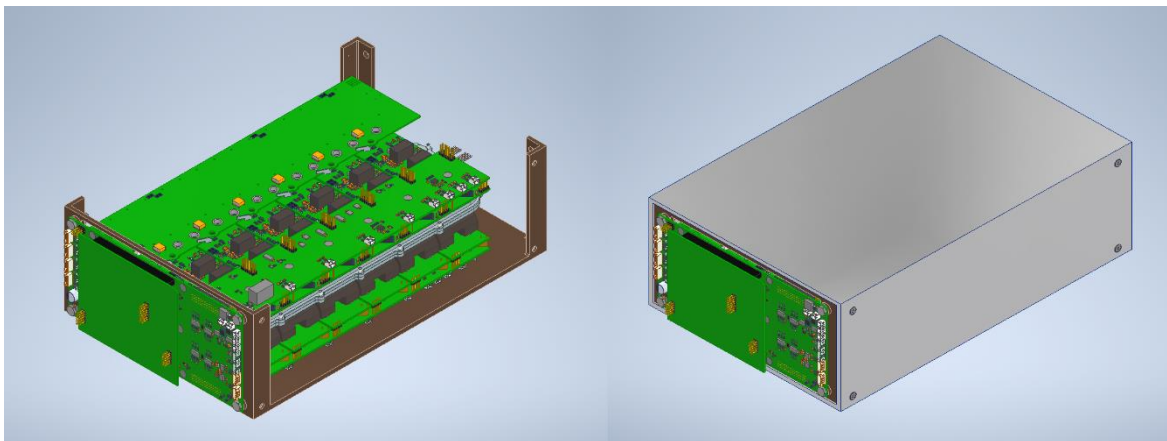
## 5.2 Experimentální sestavení celé sestavy

Pro ověření úspěšnosti návrhu všech desek bylo potřeba ověřit také to, jestli byly správně zvoleny pozice konektorů a velikosti všech desek. Zhotovení celé sestavy bylo provedeno až jako poslední úkon především z důvodu opoždění výroby chladiče. Pro experimentální sestavení byly použity pouze čtyři průchozí závitové tyče místo uvažovaných dvanácti. Na všechny výkonové moduly byly pomocí šroubů M6 a plastových šroubů M2.5 připevněny desky budičů. Dva moduly se připevnily pomocí závitových tyčí k chladiči. Poté byly na chladič položeny zbylé moduly s deskami a všechny desky se propojily konektory na sběrných deskách. Sběrné desky byly připevněny na závitové tyče a tím došlo ke stažení i nepřipevněných modulů s deskami. Posledním krokem bylo připojení řídicí desky na konektory sběrných desek. Celá sestava je vyobrazena na Obr. 5.6.



Obr. 5.6 Fotografie celé sestavené sestavy

Při umístění sestavy do formule bude vytvořen speciální kontejner pro celou sestavu. Kontejner bude rozdělen na dvě části. První částí bude hliníková konstrukce, do které budou připevněny všechny desky, spolu s průchozími tyčemi. Druhou částí bude hliníkový kryt, do kterého se tato konstrukce bude zasouvat. Návrh na toto upevnění je rozpracován dalším členem týmu formule. Prvotní verze návrhu je vidět na Obr. 5.7.



Obr. 5.7 Návrh krytu a ukotvení sestavy

## Zhodnocení a závěr

Výsledkem práce je zhotovená sestava střídačů s řídicím systémem, připraveným k vytváření softwaru pro jízdu formule. Sestavu se podařilo navrhnout v kompaktním řešení, které je pro závodní formule velmi důležité. Funkčnost navržených desek byla také částečně ověřena, ale kvůli pozdnímu dodání chladiče a některých součástí s delší dodací lhůtou, bylo možné sestavu smontovat až na poslední chvíli a tím pádem nemohla být otestována kompletní sestava, ale pouze některé její části. Získání specifikace měniče závisí na návrhu okolních jednotek jak z mechanického, tak z elektrického pohledu. Z tohoto důvodu je návrh měniče náročný, i když není tak viditelný jako vlastní realizace.

V průběhu návrhu sestavy, započatého mojí bakalářskou prací, došlo k velkému množství změn. Velká část těchto změn byla způsobena nedostatkem dříve vybraných součástí na trhu. Další změny byly způsobeny rozmyšlením lepších a efektivnějších topologií celé sestavy v průběhu celého návrhu. Celkově je tento návrh třetí verze střídačové sestavy pro formuli. Ovšem jediný tento návrh byl ve výsledku zkonstruován a prohlášen za finální. Výkonové moduly použité v této práci, jsou navrženy s výkonovou rezervou, protože v začátku návrhu nebylo jasné, jaké konkrétní motory budou zvoleny. V průběhu budoucích závodů budou sbírána měřená data a další verze střídačů již bude optimalizována na konkrétní očekávané zatížení.

Na příští rok je plánován vývoj software, který umožní kompletní otestování střídačů a poté osazení do formule. Po úspěšném otestování ve formuli je plánovaná účast formule na závodech konaných příští rok v létě.

Diplomová práce popisuje konstrukci střídače od zadání po finální sestavení včetně experimentálního otestování a tím byly splněny všechny body zadání.

## Literatura

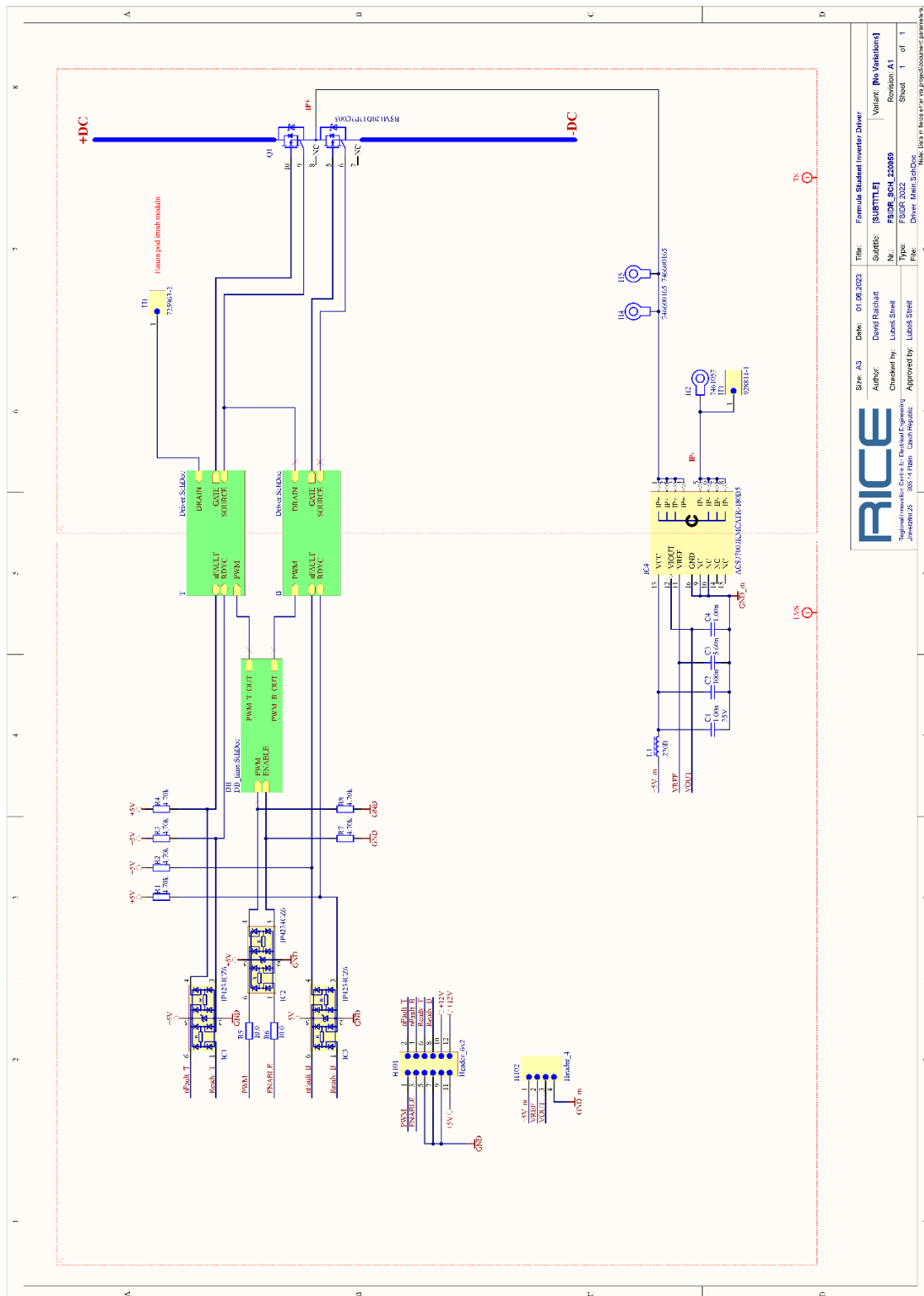
- [1] Raichart, David. Návrh silového obvodu střídače pro eFormuli. Plzeň, 2021. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Luboš Streit. (accessed May 17, 2023)
- [2] Blažek, Ondřej. Interface řídicí jednotky střídače pro eFormuli. Plzeň, 2021. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Luboš Streit. (accessed May 17, 2023)
- [3] Firma ROHM, Datasheet výkonového modulu BSM120D12P2C005. [https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/power\\_module/bsm120d12p2c005-e.pdf](https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/power_module/bsm120d12p2c005-e.pdf) (accessed May 19, 2023)
- [4] Firma Infineon, Datasheet budiče 1ED3461MC12M. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED34x1Mx12M-DataSheet-v01\\_10-EN.pdf?fileId=5546d46274cf54d50174d97c2fb71f62](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED34x1Mx12M-DataSheet-v01_10-EN.pdf?fileId=5546d46274cf54d50174d97c2fb71f62) (accessed May 20, 2023)
- [5] Z. Kehl, T. Glasberger and L. Streit, "Design of universal H-bridge converter for cascaded multilevel topologies", 2021 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, 2021, pp. 1-4. (accessed May 20, 2023)
- [6] Firma Murata, Datasheet zdroje pro budič MGJ2D121802SC. <https://www.murata.com/products/productdata/8807029997598/kdc-mgj2.pdf?1681356619000> (accessed May 20, 2023).
- [7] Firma Allegro MicroSystems, Datasheet čidla proudu ACS37003KMCATR-180B5. [https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs37003mc-datasheet.pdf?sc\\_lang=en](https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs37003mc-datasheet.pdf?sc_lang=en) (accessed May 20, 2023).
- [8] Firma Nexperia, Datasheet osmivstupového NAND 74AHC30PW. [https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74AHC\\_AHCT30.pdf](https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74AHC_AHCT30.pdf) (accessed May 20, 2023).
- [9] Firma Ixysic, Datasheet optronu PLB171P. [https://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/PLB171.pdf/\\$file/PLB171.pdf](https://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/PLB171.pdf/$file/PLB171.pdf) (accessed May 20, 2023).
- [10] Firma Texas Instruments, Datasheet čidla pro měření napětí AMC1311B. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1311.pdf?ts=1685495890254&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1311.pdf?ts=1685495890254&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (accessed May 20, 2023).
- [11] Firma Texas Instruments, Datasheet ADC ADS114S08IPBSR. <https://www.ti.com/lit/gpn/ADS114S08> (accessed May 20, 2023).
- [12] KOŠAN Tomáš. RUMM – Rice Univerzal Microcontroller Module: Hardwarová specifikace a uživatelská příručka. [online], Plzeň, 2019 Dostupné z: <https://riceproject.fel.zcu.cz> Regionální inovační centrum elektrotechniky, Fakulta elektrotechnická, Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D. (accessed May 20, 2023).

- [13] Firma Vishay, Datasheet kondenzátoru MKP1848S.  
<https://www.vishay.com/docs/26010/mkp1848sdclink.pdf> (accessed May 20, 2023).
- [14] Formula Student Rules Germany, Pravidla závodu formula student.  
[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf) (accessed May 22, 2023).
- [15] Schmid, Prokop. Měřicí karta pro testování elektrických pohonů. Plzeň, 2021. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Štěpánek Jan (accessed May 17, 2023)
- [16] Firma Texas Instruments, Datasheet zdroje TPS5450.  
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5450.pdf> (accessed May 22, 2023).

# Přílohy

## Příloha A: Schémata driveru

### Hlavní schéma driverů

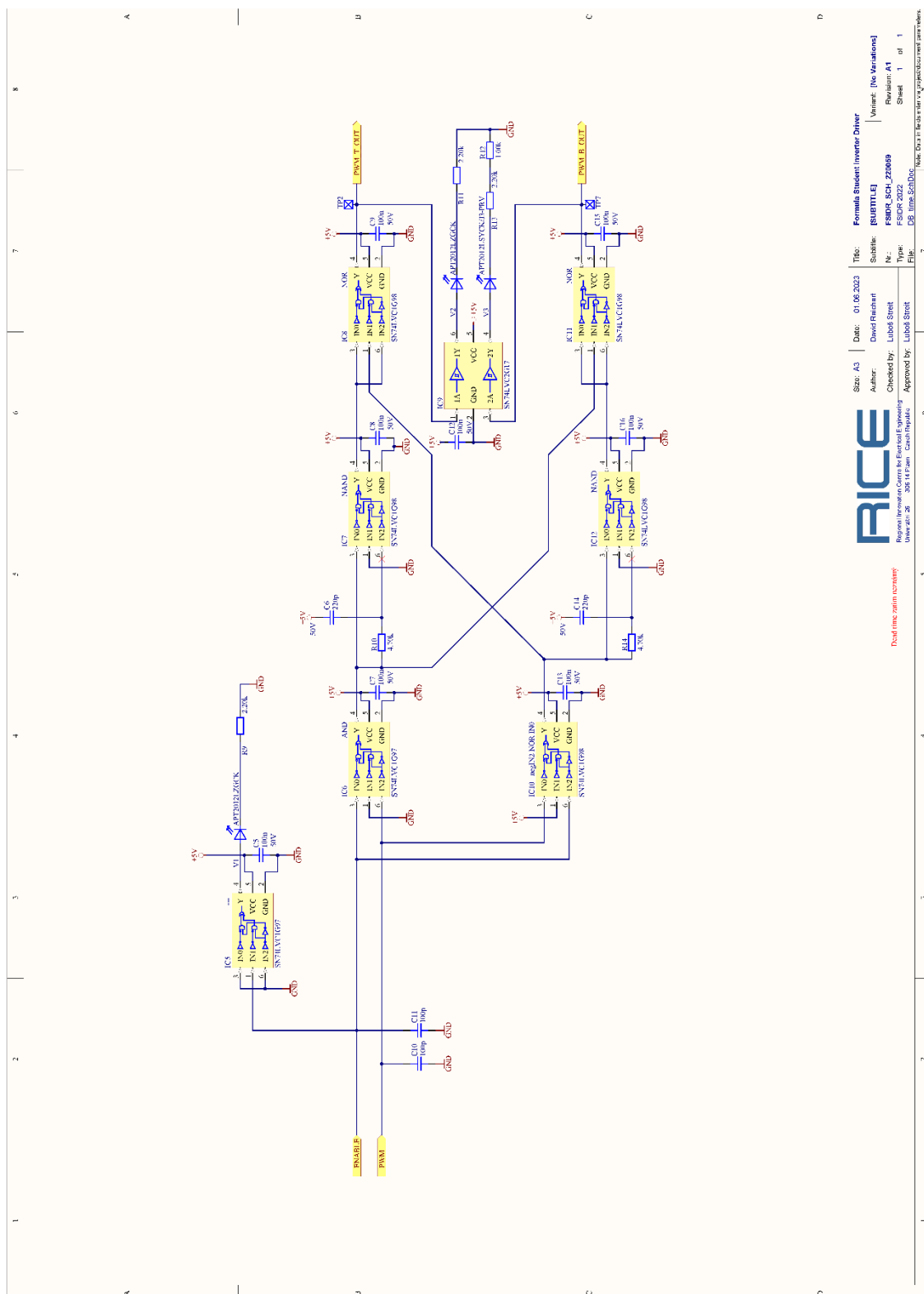


Size: A3	Date: 01.06.2023	Title: Fomale Student Inverter Driver
Author: David Rádcliff	Subject: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Lukáš Štěrba	Nr.: FSJDR 2022	Revision: A1
Approved by: Lukáš Štěrba	Type: FSJDR 2022	Sheet: 1 of 1
File: Driver_Main_SchDoc		Note: This is a schematic representation of a physical component.





Schéma obvodu pro zajištění mrtvých časů

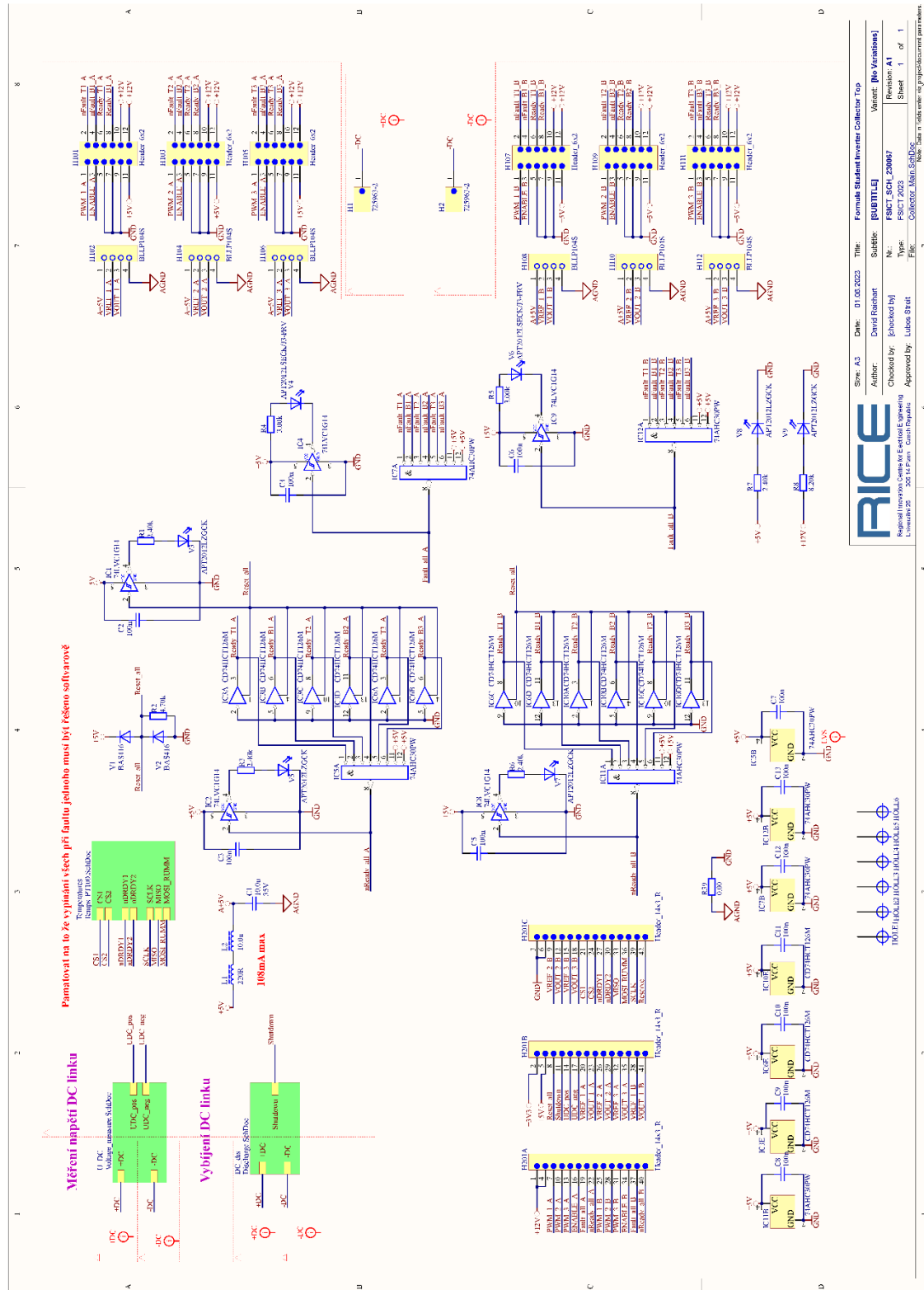


Size: A3 | Date: 01.06.2022 | Title: Formula Student Inverter Driver  
 Author: David Růžička | Subtitle: RUIPTTLEJ | Variant: (No Variations)  
 Checked by: Luboš Štecl | No.: FSKOR\_SCH\_220609 | Realizator: A1  
 Approved by: Luboš Štecl | Type: FSKOR-2022 | Sheet: 1 of 1  
 File: 08\_11mcs106



# Příloha B: Schémata horního Collectoru

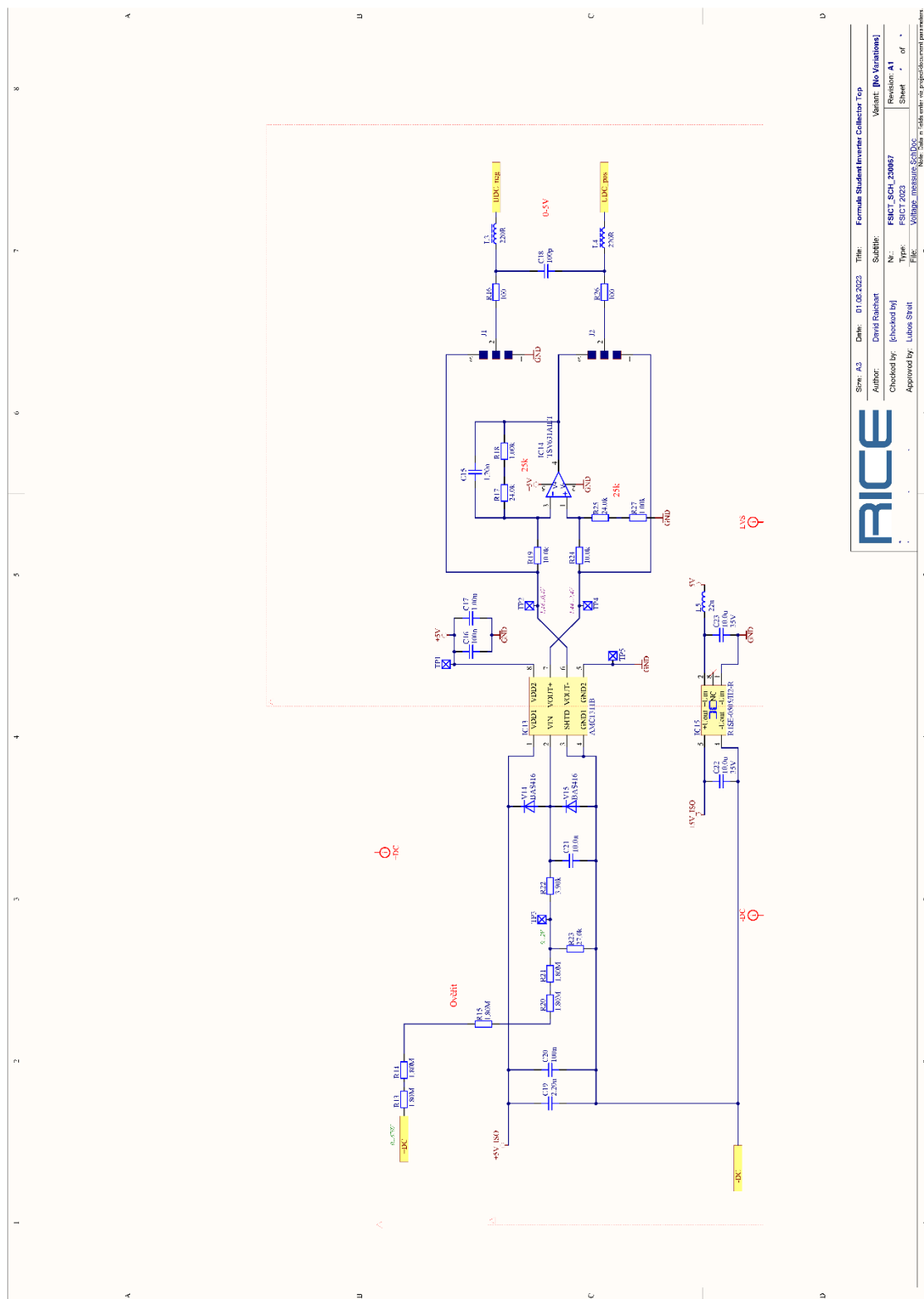
## Hlavní schéma horního Collectoru



**PRICE**  
 Reginald Innovation Centre for Electrical Engineering  
 University of South Bohemia  
 305 43 Písek  
 Czech Republic  
 Phone: +420 378 508 200  
 Email: info@price.upj.cz  
 Web: www.price.upj.cz

Size: A3	Date: 01.06.2023	Title: Formule Student Inverter Collector Top
Author: David Raichart	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: [checked by]	Nr.: FSCCT_SCH_20067	Revision: A1
Approved by: Lubos Strul	Type: FSCCT 2023	Sheet: 1 of 1
	File: Collector_Main_SchDoc	

# Schéma pro měření napětí DC linku

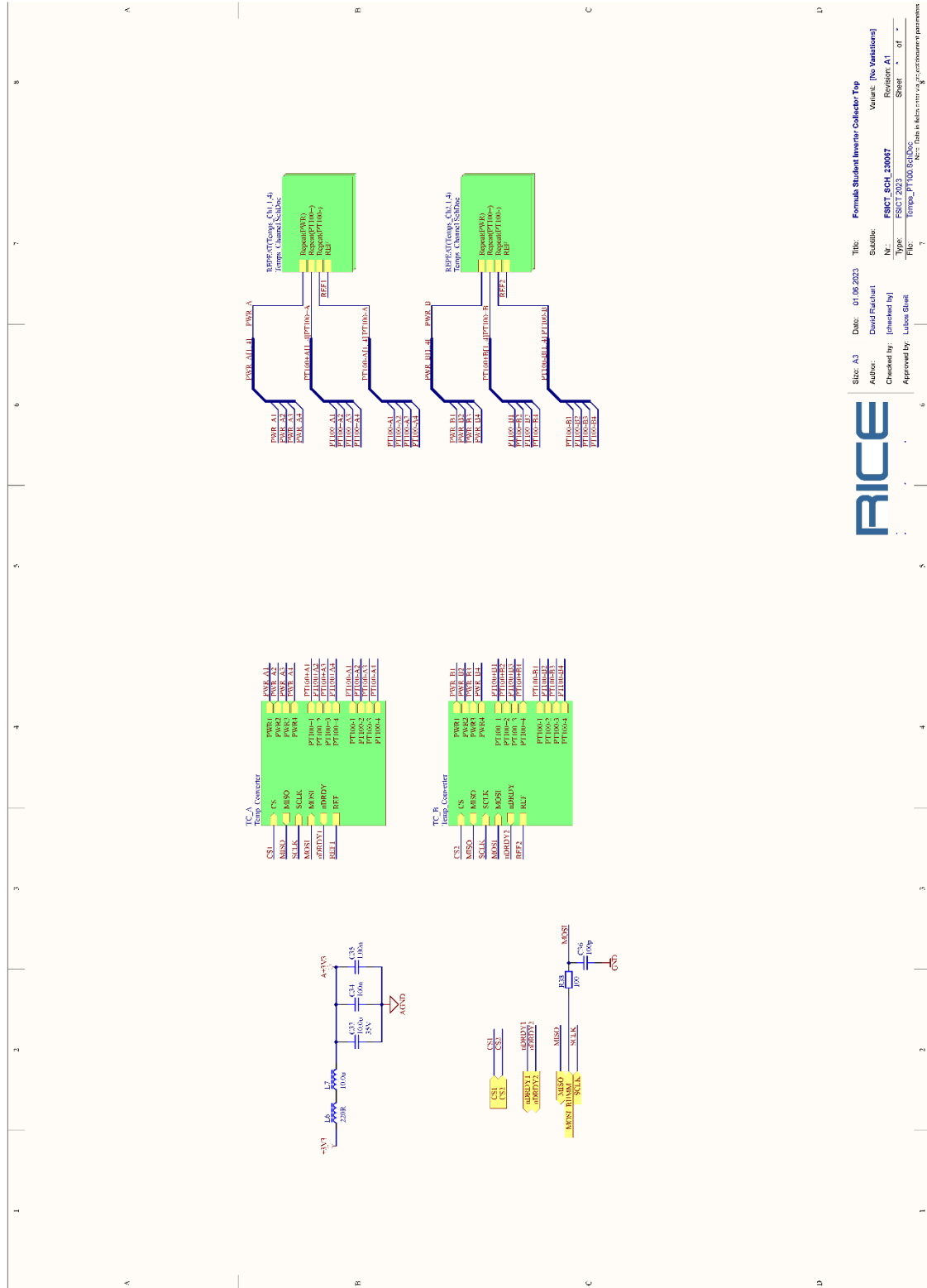


Size: A3	Date: 01.08.2023	Title: Formula Student Inverter Collector Top
Author: David Reinhart	Subtitle: Variant: [No Variations]	
Checked by: [checked by]	Nr.: FSICT_SCH_200027	Revision: A1
Approved by: Lukas Strahl	Type: FSICT 2023	Sheet: 1 of 1
	File: Voltage_Measuring_Sch_Collector_Top	



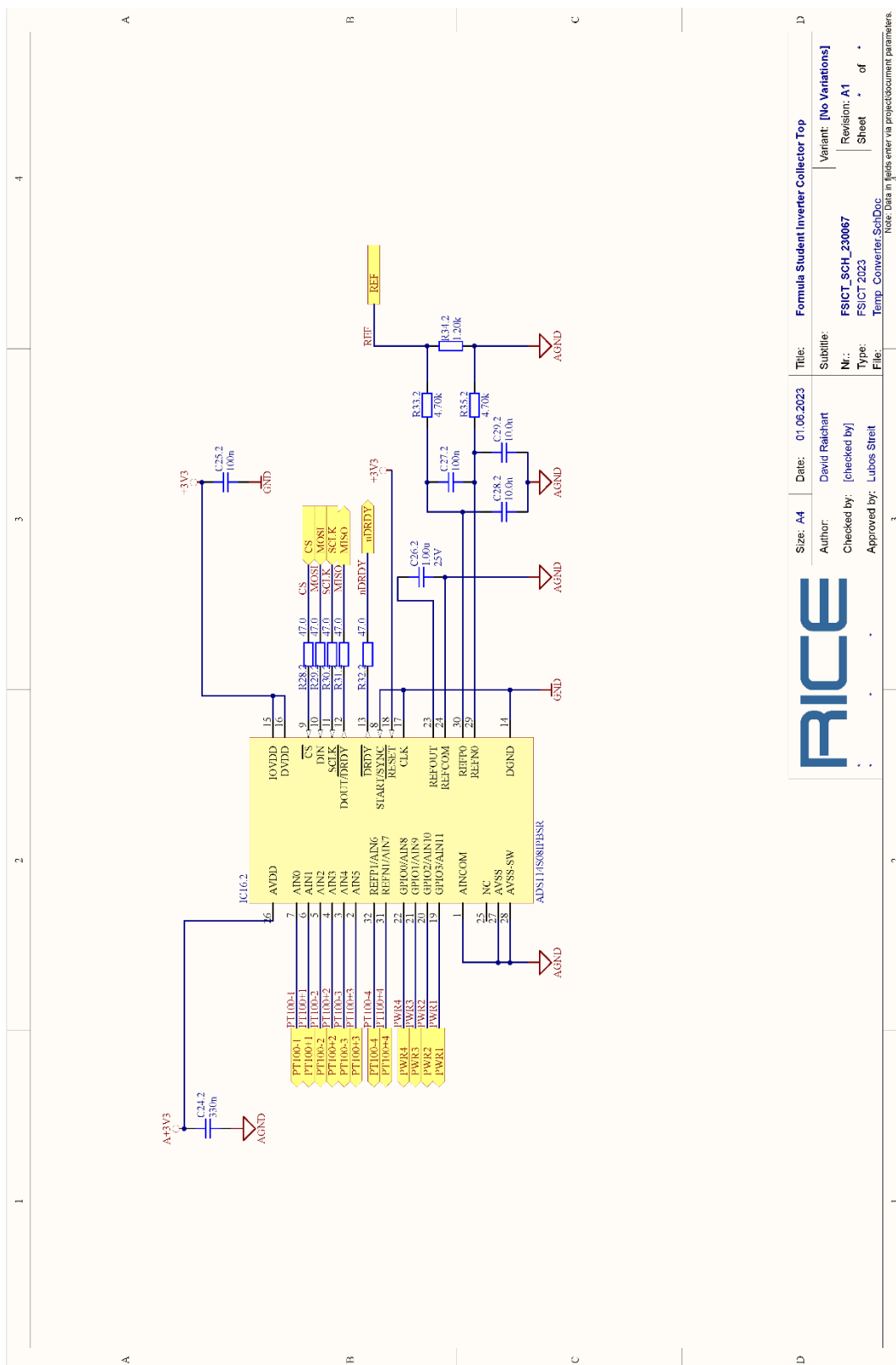


# Schéma pro měření teplot



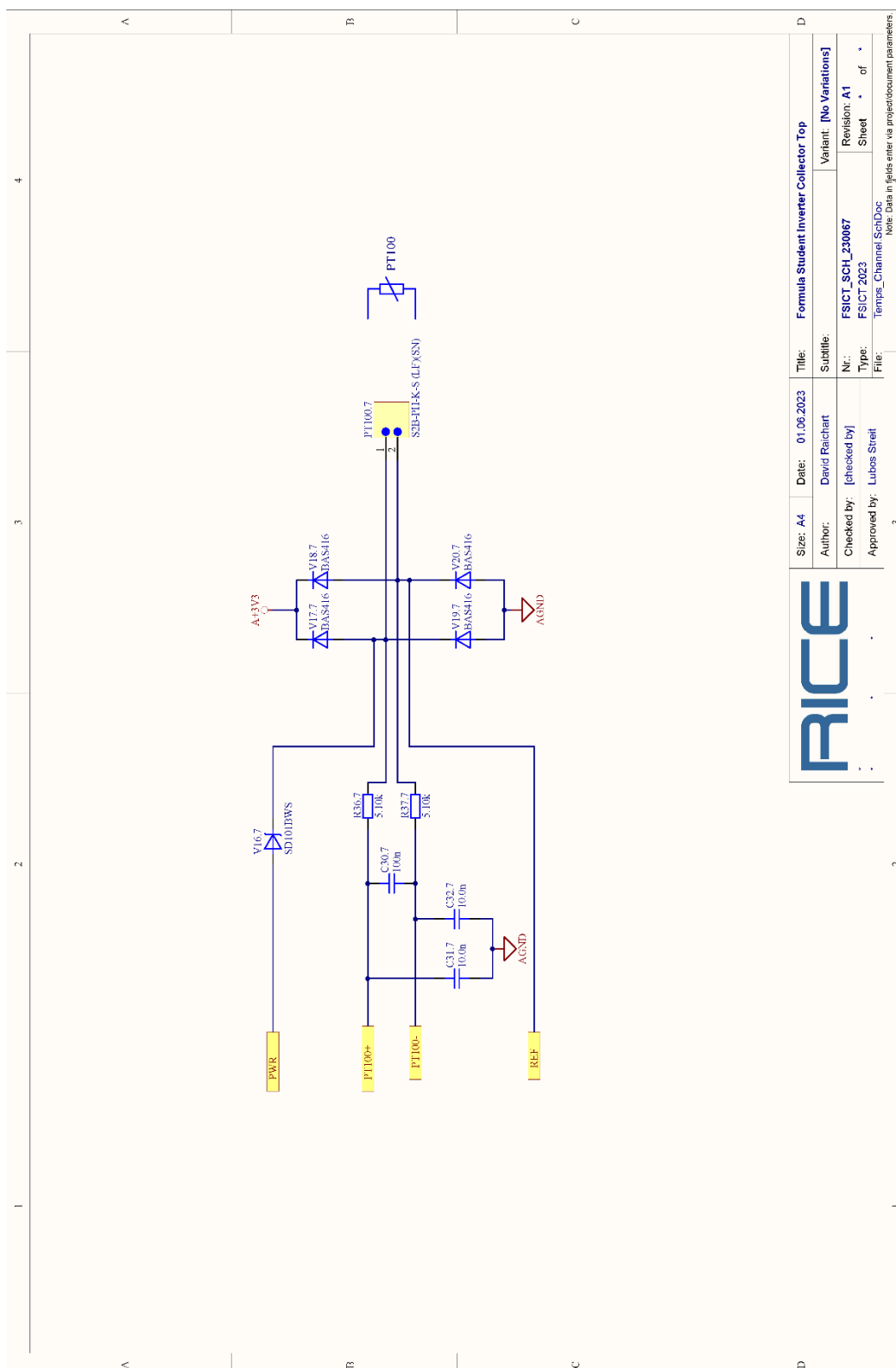
Size: A3	Date: 01.06.2023	Title: Femina Student Inverter Calculator Top
Author: David Fialich	Status:	Variant: [No Variations]
Checked by: [blank]	Approved by: Lukáš Štáhl	Revision: A1
No: PSIC_T_SCH_23007		Sheet: 1 of 1
File: Temp_PT100_SCH.SCH		Sheet: 1 of 1

## Schéma obvodu pro přepínání hodnot z teplotních čidel



Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Collector Top	Variant: [No Variations]
Author: David Ralchart	Checked by: [checked by]	Subtitle: FSICT_SCH_230067	Revision: A1
Approved by: Lubos Streit		Type: FSICT 2023	Sheet . of .
		File: Temp_Converter_SchDoc	Note: Data in fields enter via project document parameters.

## Schéma obvodu teplotných čidel

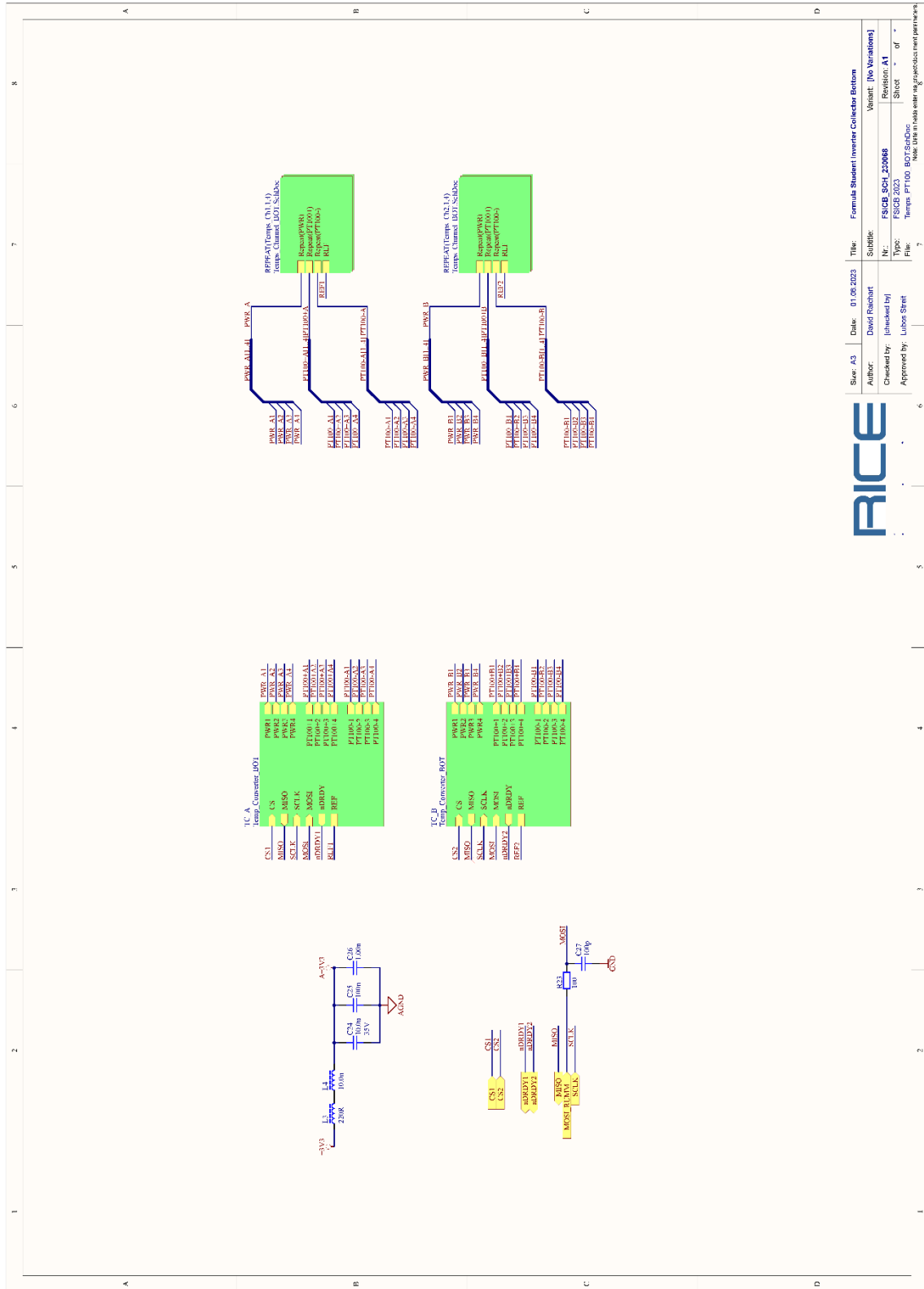


Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Collector Top
Author: David Raichart	SubTitle: Variant: [No Variations]	
Checked by: [checked by]	Nr.: FSICT_SCH_230087	Revision: A1
Approved by: Lubos Streit	Type: FSICT 2023	Sheet . of .
	File: Temps_Channel SchDoc	

Note: Data in fields enter via project document parameters



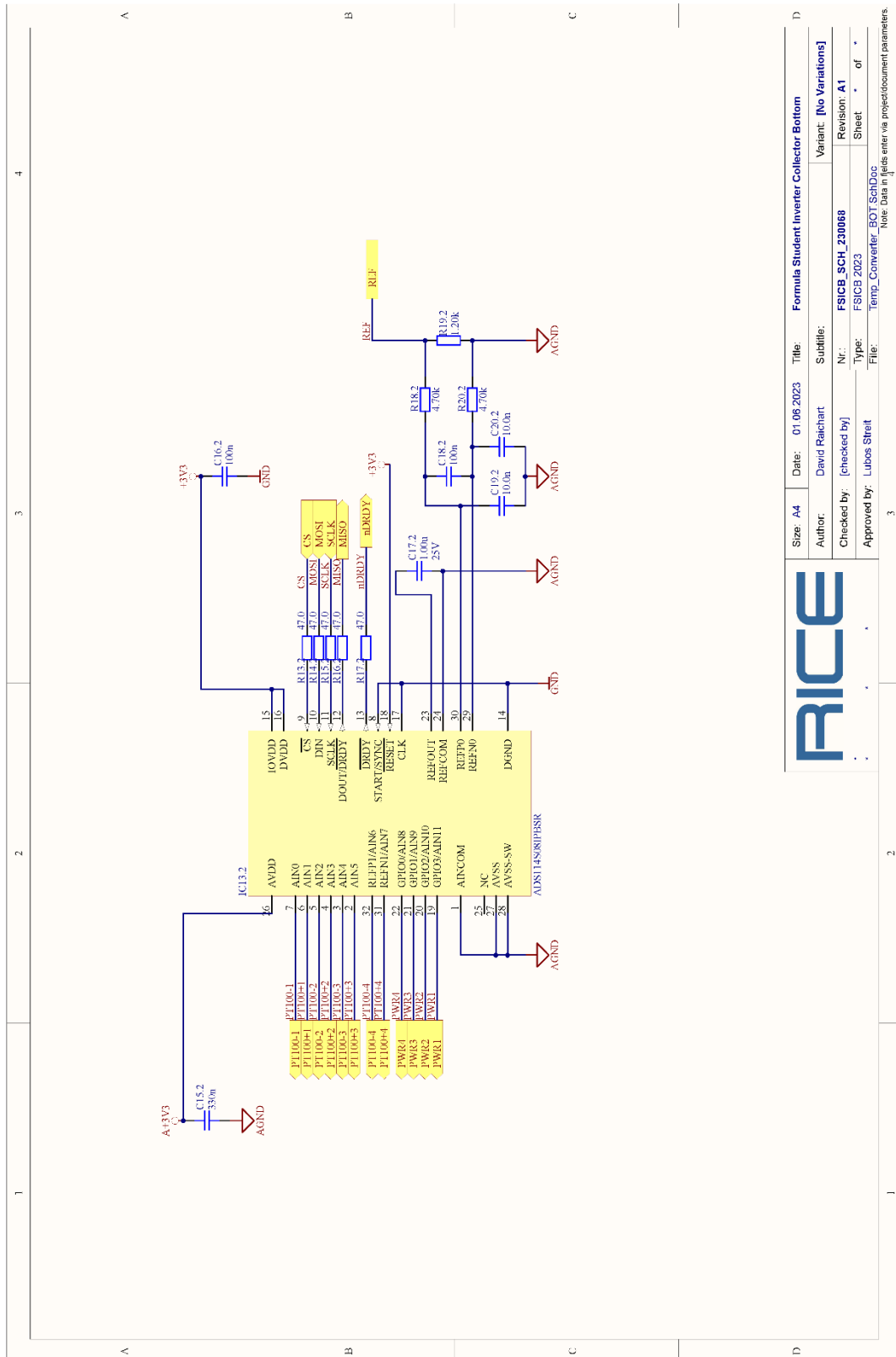
# Schéma pro měření teplot



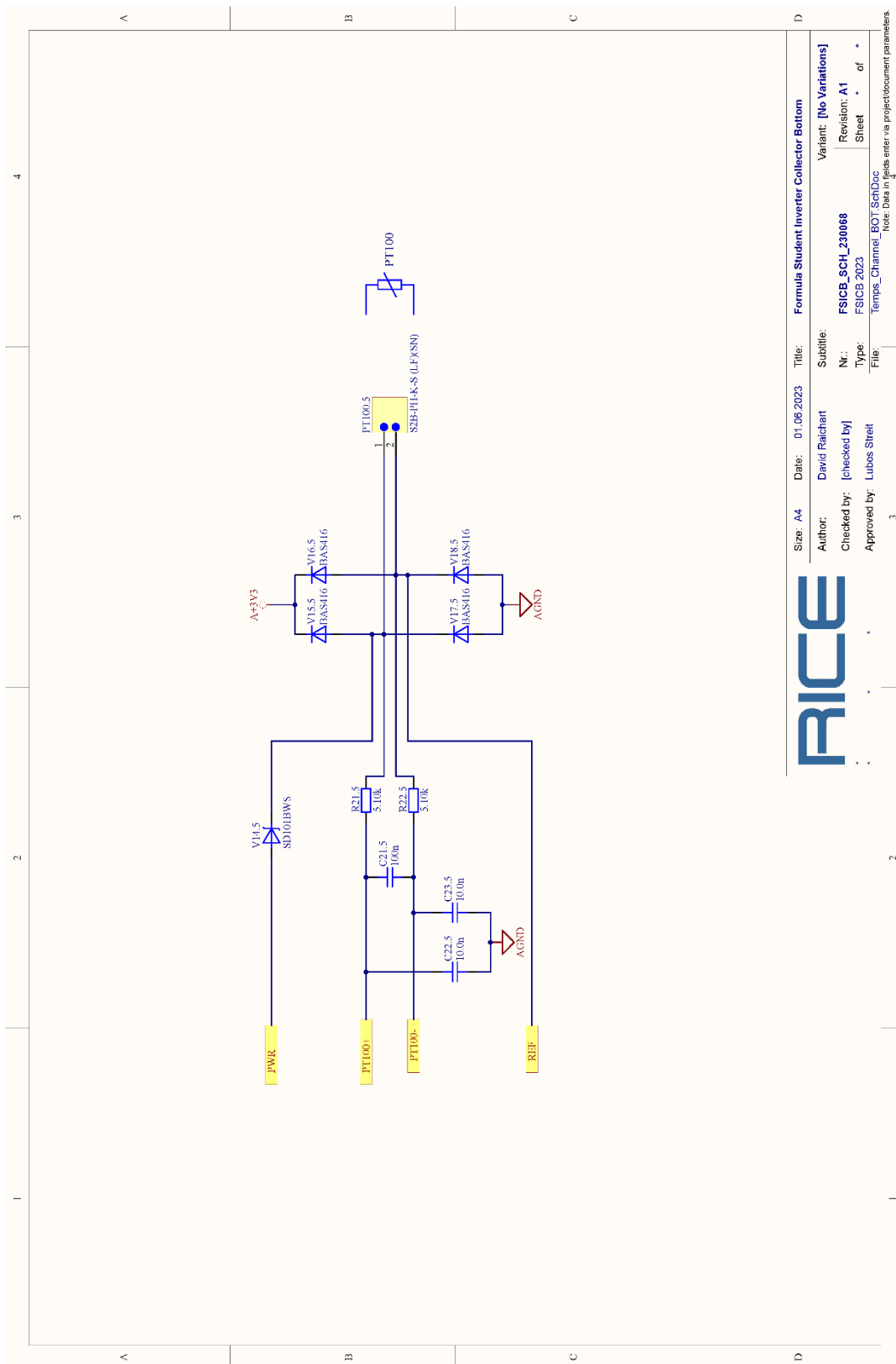
Sheet: A3	Date: 01.08.2023	Title: Formula Student Investor Calculator Buttons
Author: David Reichert	Subtitle: Variant: [No Variations]	
Checked by: [blank]	Nr.: FSIGB_SCHL_230008	Revision: A1
Approved by: Lubos Stret	Type: FSIGB 2023	Sheet: - of -
	File: Temp_PTI00_Buttons.kicad_pcb	



## Schéma obvodu pro přepínání hodnot z teplotních čidel



### Schéma obvodu teplotných čidel

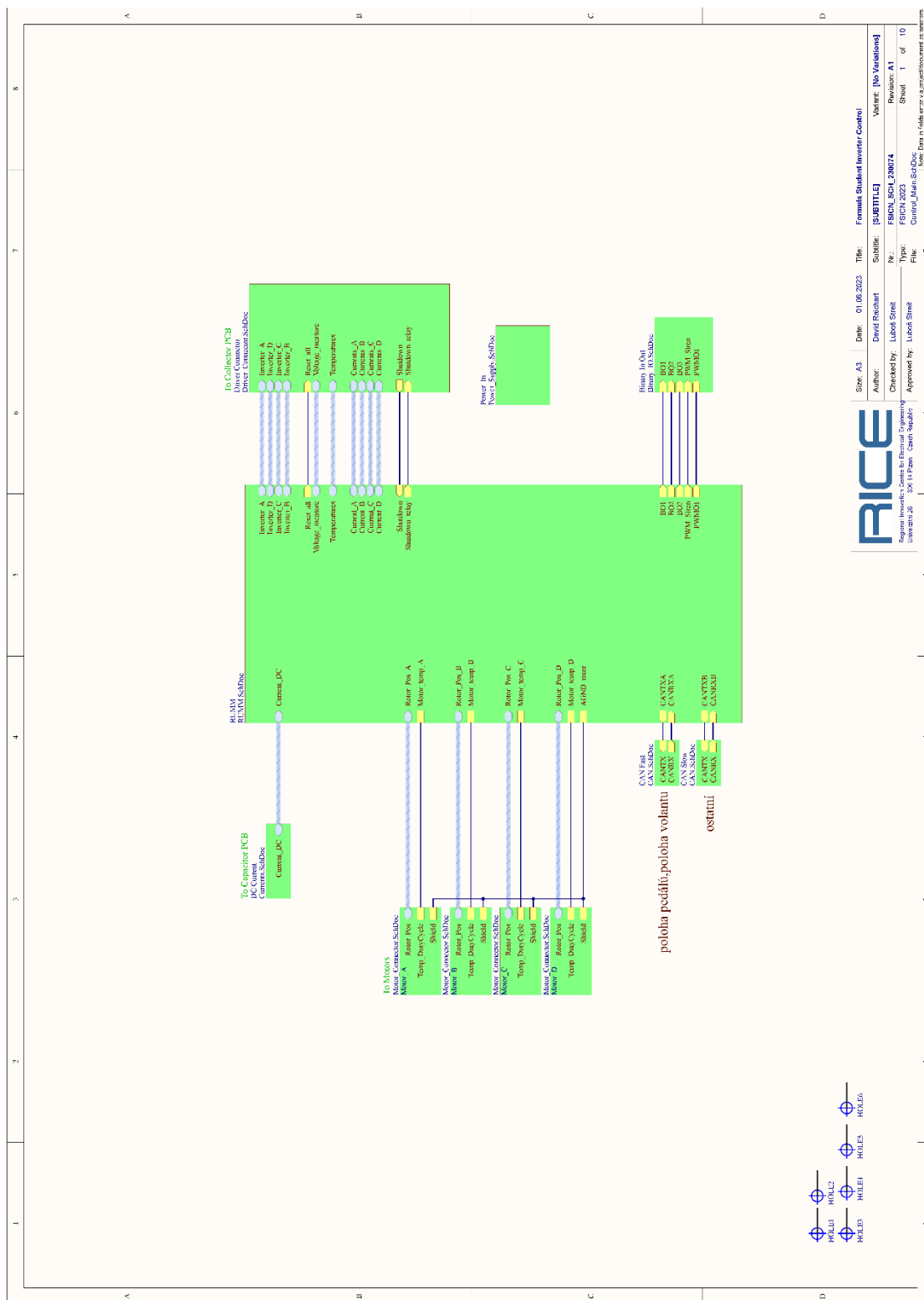


Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Collector Bottom
Author: David Raichart	SubTitle: Variant: [No Variations]	
Checked by: [checked by]	Nr.: FS/CB_SCH_230068	Revision: A1
Approved by: Lubos Streit	Type: FS/CB 2023	Sheet . of *
	File: Temps_Channel_EOT_SchDoc	

Note: Data in fields enter via projectdocument parameters.

# Příloha D: Schémata řídicí desky Control

## Hlavní schéma řídicí desky

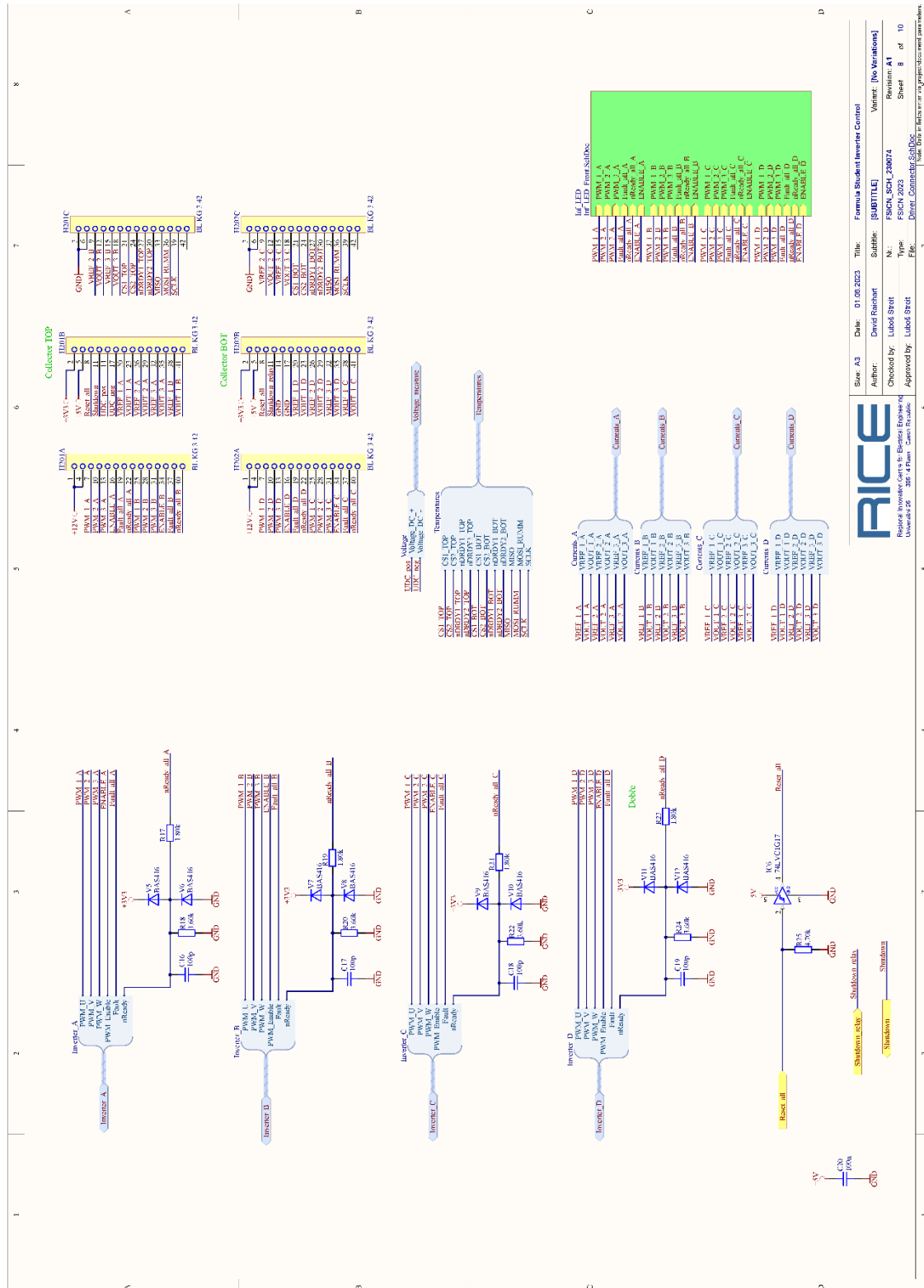


Size: A3	Date: 01.06.2023	Title: Formita Student Inverter Control
Author: David Fruchart	SubTitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Štránský	No.: FSCN_SCH_20074	Position: A1
University: 301 14 Považská	Type: FSCN_2023	Sheet: 1 of 10
Approved by: Luboš Štránský	File: Control_Main_Sch.Doc	How: Data is valid error in your presentation software

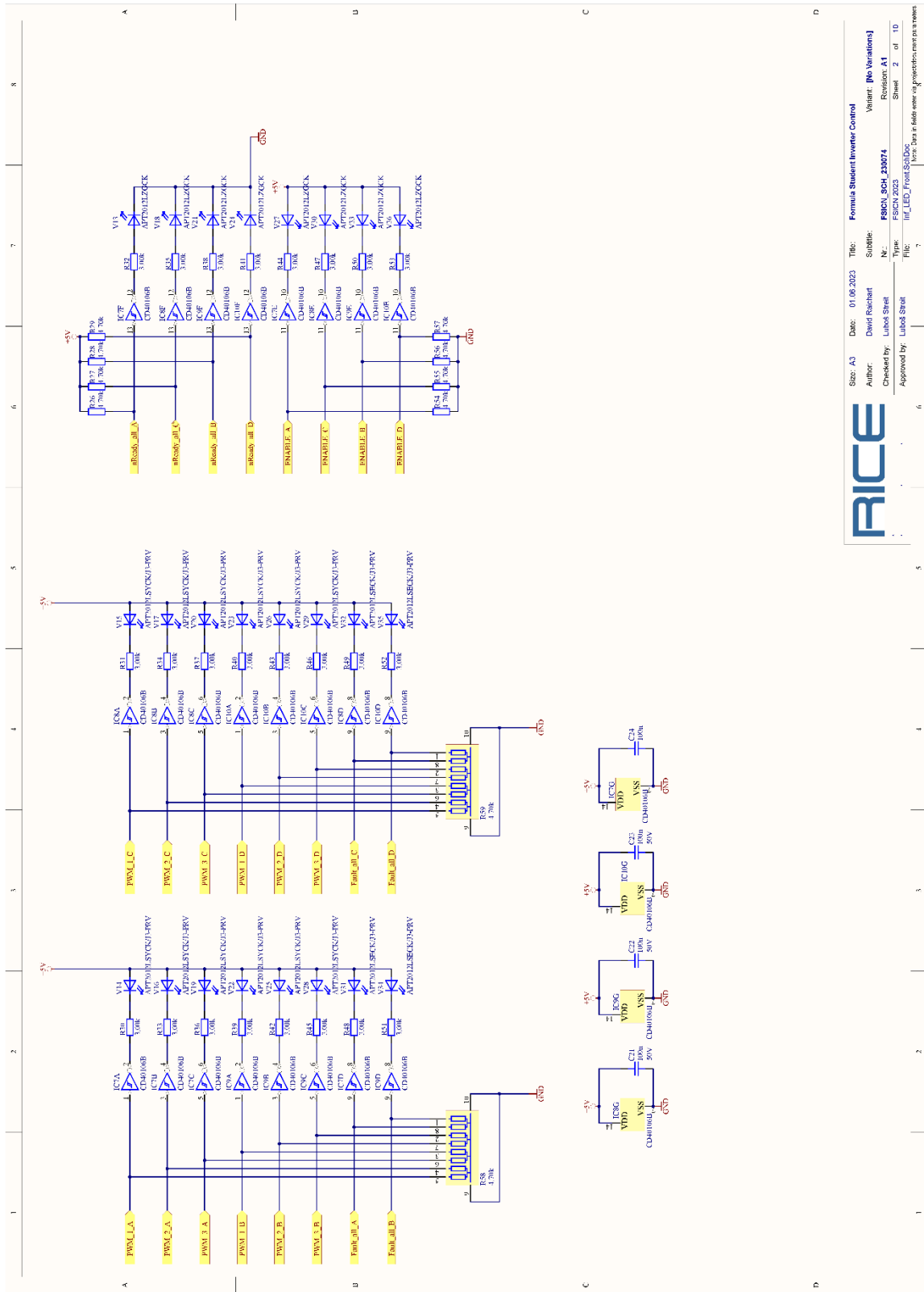




Schéma zapojení sběrných desek

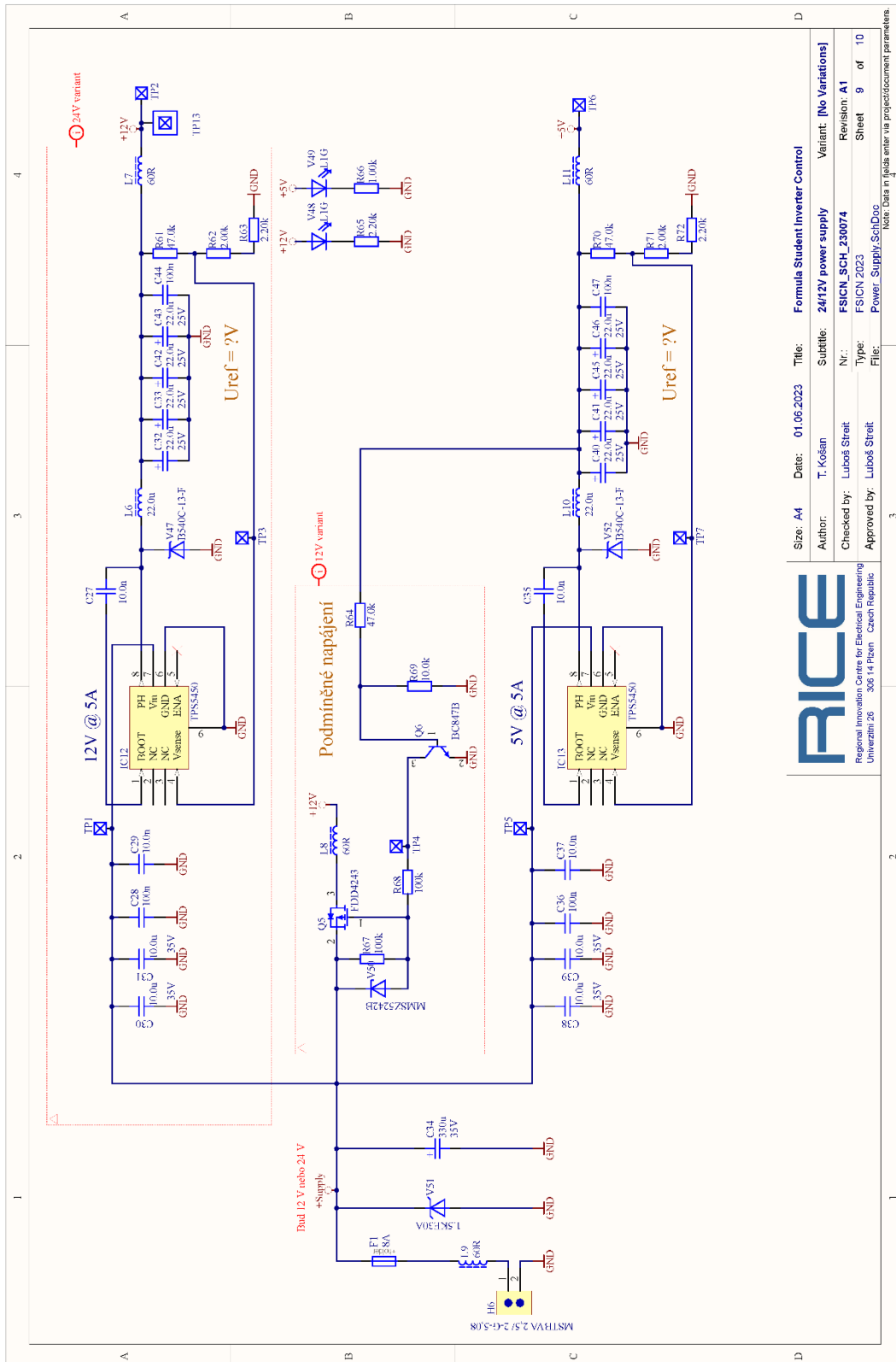


# Schéma světelné signalizace pomocí LED



Str. A3	Date: 01.09.2023	Titel: Formát Student Inverter Control	Verzi: [No Variations]
Author: David Reichart	Subtitle: FSKCN_SCH_230074	Checked by: Luboš Štepl	Revision: A1
Approved by: Luboš Štepl	Type: InT_LED_Print_SchES	Sheet: 2 of 10	

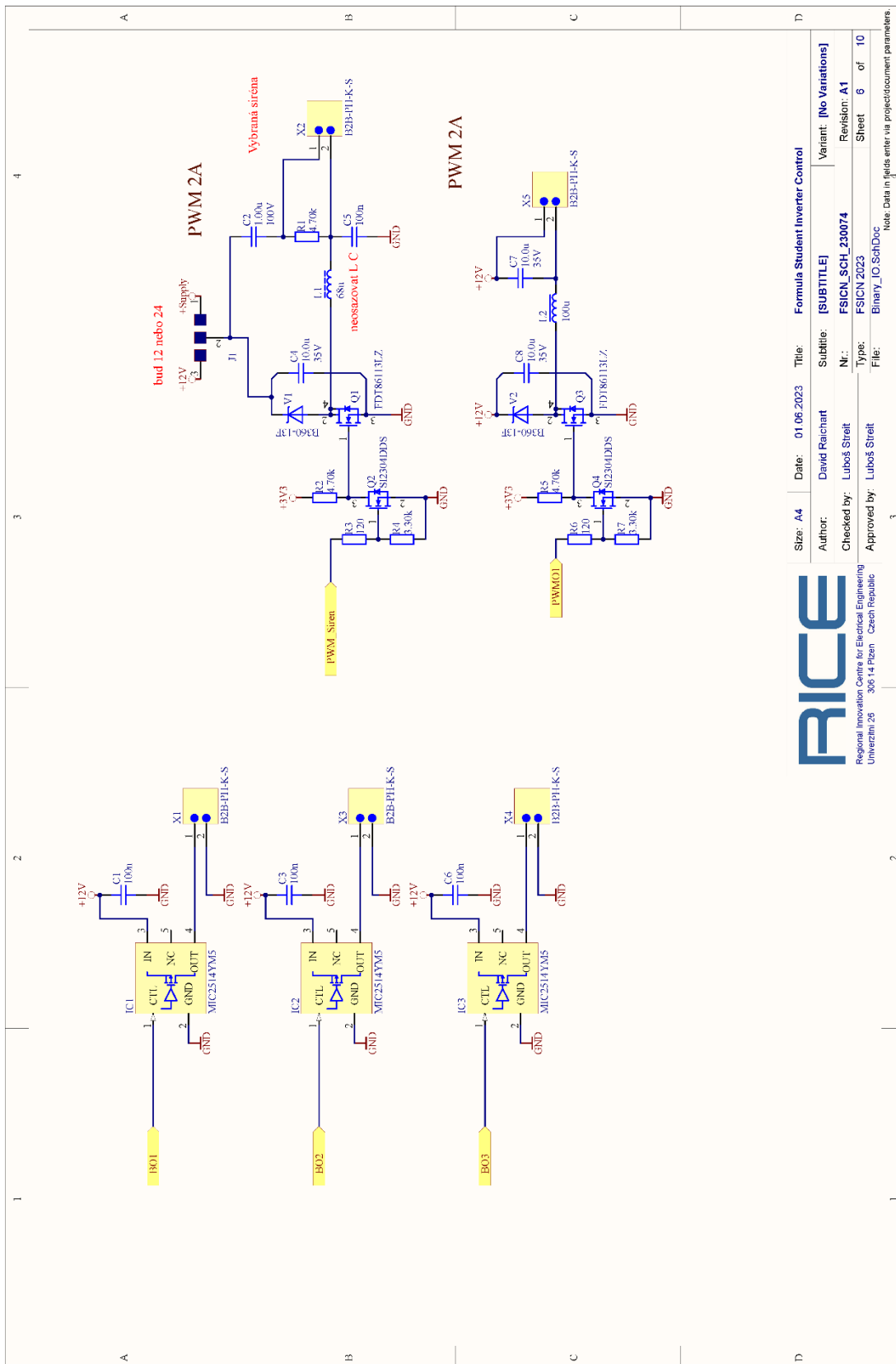
Schéma zdrojů



Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Control
Author: T. Kóšan	SubTitle: 2412V power supply	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Štréit	Nr.: FSICN_SCH_230074	Revision: A1
Approved by: Luboš Štréit	Type: FSICN 2023	Sheet 9 of 10
Regional Innovation Centre for Electrical Engineering Univerzity 26 306 14 Písek Czech Republic	File: Power_Supply_Sch.Dwg	Note: Data in table enter via project document parameters.



Schéma Binary In Out

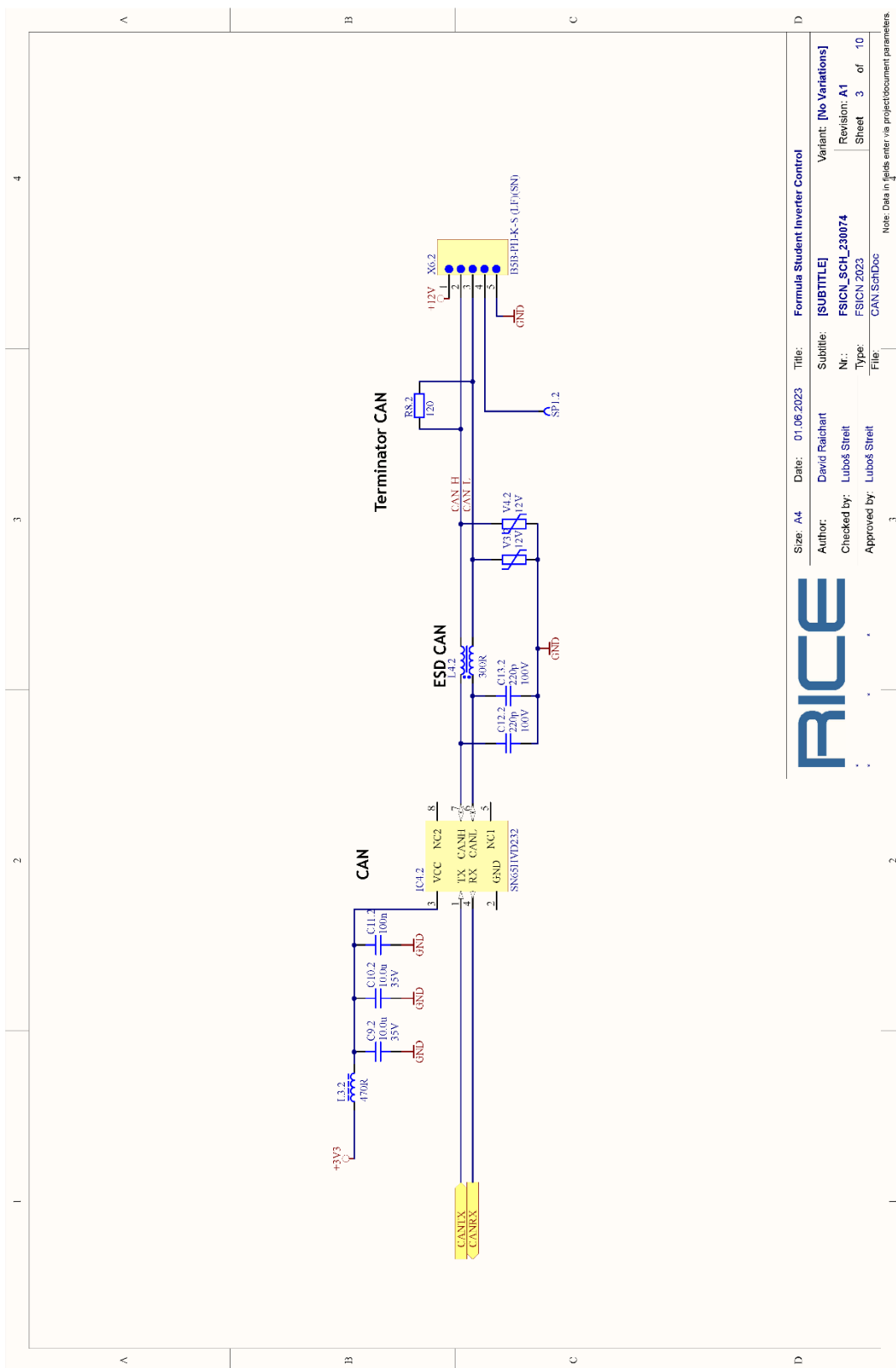


Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Control
Author: David Raichart	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Štreit	Nr.: FSICN_SCH_230074	Revision: A1
Approved by: Luboš Štreit	Type: FSICN 2023	Sheet 6 of 10
	File: Binary_IO_Sch.Doc	Note: Data in fields enter via projectdocument parameters.





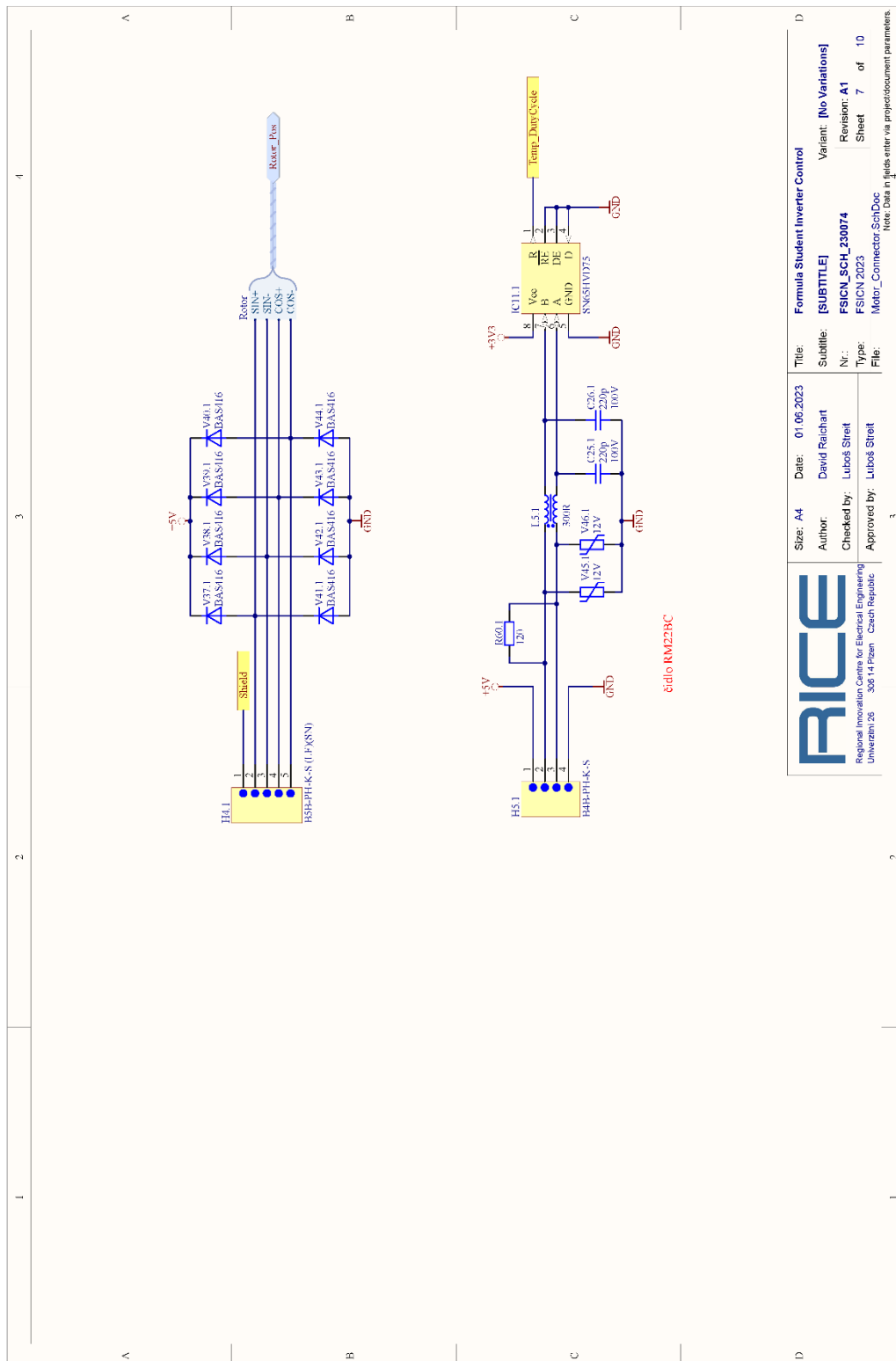
# Schéma připojení CAN



Size: A4	Date: 01.06.2023	Title: Formula Student Inverter Control
Author: David Raichart	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Strelt	Nr.: FSICN_SCH_230074	Revision: A1
Approved by: Luboš Strelt	Type: FSICN_2023	Sheet 3 of 10
	File: CAN_SchDoc	

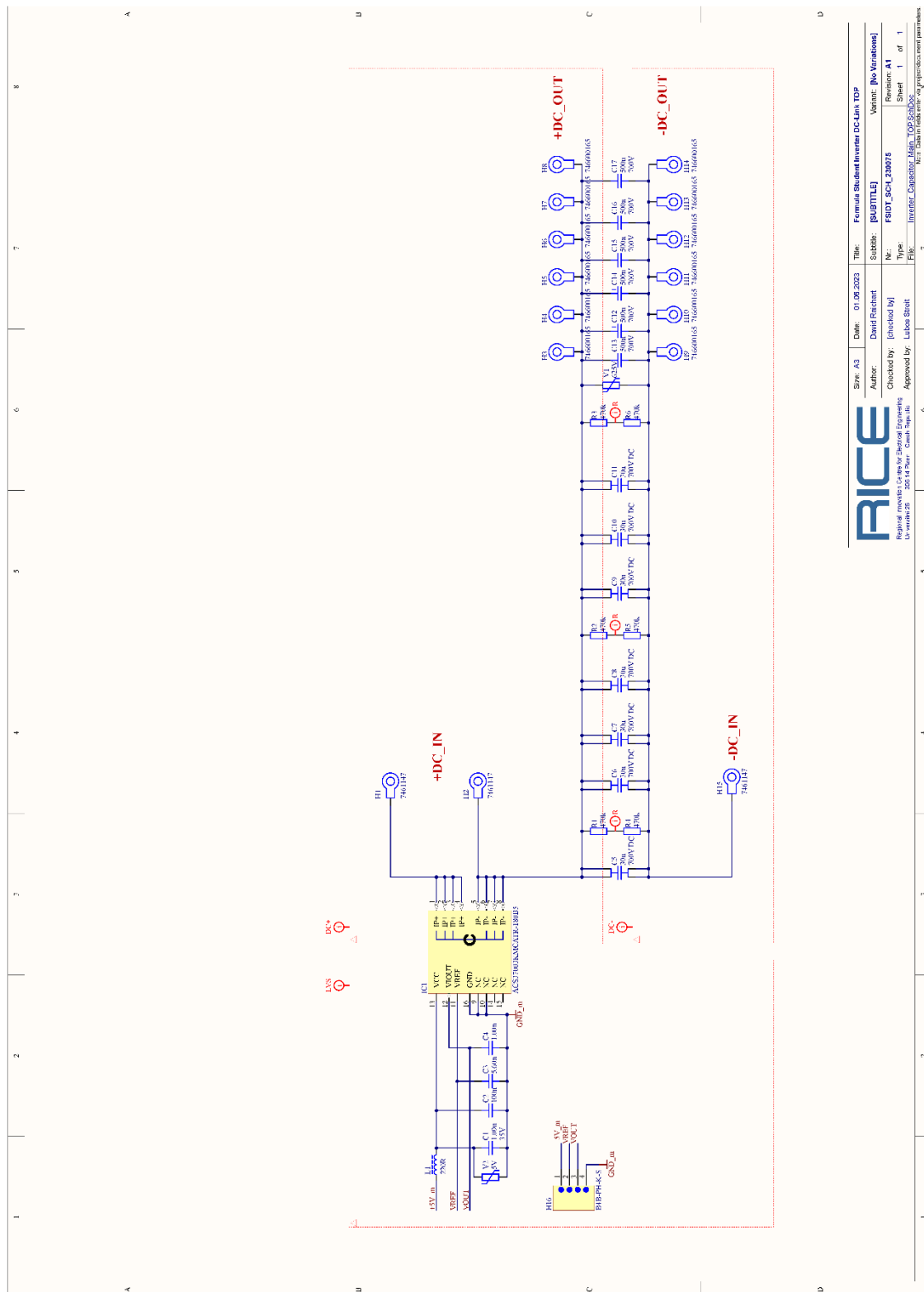
Note: Data in fields enter via projectdocument parameters

### Schéma motorového konektoru





# Příloha E: Schéma horní desky kondenzátorů



# Příloha F: Schéma dolní desky kondenzátorů

