

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh silového obvodu střídače pro eFormuli

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David RAICHART**
Osobní číslo: **E18B0093P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Návrh silového obvodu střídače pro eFormuli**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Vyberte klíčové komponenty střídače.
2. Navrhněte schéma střídače včetně budičů.
3. Navrhněte desku plošných spojů.
4. Zkonstruuje navržený střídač.
5. Experimentálně ověřte funkci střídače.

Dodatek k zadání Diplomové práce

Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Body 1.-3. zůstávají v plném rozsahu.

Bod 4.: Zkonstruujte navržený střídač

je změněn na:

4. Připravte dokumentaci pro výrobu

Bod 5.: Experimentálně ověřte funkci střídače

je změněn na:

5. Navrhněte postup ožiování a měření výsledných parametrů

V Plzni dne 12.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Luboš Streit, Ph.D.

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne

Student: David Raichart

V Plzni dne

prof. Ing.
Zdeněk
Peroutka, Ph.D.

Digitálně podepsal
prof. Ing. Zdeněk
Peroutka, Ph.D.
Datum: 2021.05.18
14:12:21 +02'00'

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena především na návrh výkonové části měniče pro pohon elektrické formule Západočeské univerzity v Plzni. Nachází se zde výběr základních komponent pro uskutečnění návrhu. Dále se práce zabývá návrhem schémat a desek plošných spojů. Popsán je zde návrh desky budiče a návrh sběrné desky pro spojení desek budičů a propojení s řídicí jednotkou. Návrh desek je zakončen popsáním a vygenerováním výrobních a konstrukčních dokumentů pro úspěšnou výrobu a následné osazení desky. Práce je zakončena popisem vhodného postupu při ožívování a ověřování parametrů již sestavené desky.

Klíčová slova

E-formule, měnič, budič, sběrná deska, vybíjecí obvod, měřicí obvod, výkonový tranzistorový modul, schéma, deska plošných spojů

Abstract

The bachelor's thesis is focused mainly on the design of the power part of the converter for the drive of the electric formula of the University of West Bohemia in Pilsen. There is a selection of basic components for the design. Furthermore, the work deals with the design of diagrams and printed circuit boards. The design of the driver board and the design of the collecting board for the connection of the driver boards and the connection to the control unit are described here. The design of the boards ends with the description and generation of production and construction documents for the successful construction and component placement of the board. The work ends with a description of a suitable procedure for reviving and verifying the parameters of an already assembled board.

Key words

E-formula, inverter, driver, collecting board, discharging circuit, measuring circuit, power transistor module, scheme, printed circuit board

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.


.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2021

David Raichart

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 Ing. Janu Štěpánkovi Ph.D. za sestrojení kompletního 3D modelu sestavy měničů a jejich periférií a Ing. Martinu Mrázkovi za sestrojení chladiče pro sestavu měničů.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VÝBĚR KLÍČOVÝCH KOMPONENTŮ STŘÍDAČE	11
1.1 TRANZISTOROVÝ MODUL	12
1.2 BUDIČ	14
1.3 KONDENZÁTOR	15
1.4 VYBÍJENÍ DC-LINKU.....	16
1.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ DC-LINKU	17
2 NÁVRH SCHÉMAT STŘÍDAČE VČETNĚ BUDIČŮ.....	18
2.1 HLAVNÍ SCHÉMA DESKY BUDIČE	19
2.2 SCHÉMA VLASTNÍHO BUDIČE.....	21
2.3 SCHÉMA MRTVÝCH ČASŮ	23
2.4 HLAVNÍ SCHÉMA SBĚRNÉ DESKY	24
2.5 SCHÉMA MĚŘENÍ NAPĚTÍ V DC-LINKU	25
2.6 SCHÉMA VYBÍJENÍ DC-LINKU.....	27
3 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	28
3.1 NÁVRH DESKY BUDIČE	29
3.2 NÁVRH SBĚRNÉ DESKY	31
3.3 PŘEDBĚŽNÝ 3D MODEL KOMPLETNÍHO MĚNIČE A JEHO PERIFERÍ	34
4 PŘÍPRAVA DOKUMENTACE PRO VÝROBU DESKY	36
5 NÁVRH POSTUPU OŽIVOVÁNÍ A MĚŘENÍ PARAMETRŮ DESEK.....	37
5.1 BODY POSTUPU OŽIVOVÁNÍ DESKY.....	37
6 ZÁVĚR.....	39
7 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	40
8 PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A: GERBER DESKY BUDIČE VŠECHNY VRSTVY	1
PŘÍLOHA B: GERBER SBĚRNÉ DESKY VŠECHNY VRSTVY	2
PŘÍLOHA C: BOM DESKY BUDIČE	3
PŘÍLOHA D: BOM SBĚRNÉ DESKY	4
PŘÍLOHA E: HLAVNÍ SCHÉMA DESKY BUDIČŮ	5
PŘÍLOHA F: SCHÉMA VLASTNÍHO BUDIČE	6
PŘÍLOHA G: SCHÉMA OBVODU MRTVÝCH ČASŮ	7
PŘÍLOHA H: HLAVNÍ SCHÉMA SBĚRNÉ DESKY	8
PŘÍLOHA I: SCHÉMA MĚŘENÍ DC-LINKU	9
PŘÍLOHA J: SCHÉMA VYBÍJENÍ DC-LINKU	10

Úvod

Elektrická formule je konstruována týmem Západočeské univerzity v Plzni. Tento tým UWB Racing Pilsen je zapojen do mezinárodní soutěže Formule SAE, v této soutěži mezi sebou soutěží studenti z univerzit z celého světa v různých disciplínách. V soutěži se testují vlastnosti formule jako je rychlost, výdrž, provedení, konstrukce ale hlavně bezpečnost. Prozatím se západočeská univerzita účastnila pouze soutěže s formulí se spalovacím motorem.

Snahou je zkonstruovat formuli naopak elektrickou abychom se mohli s týmem účastnit závodů s formulí elektrickými. Na zkonstruování celé elektrické formule bude potřeba vytvořit spoustu bakalářských a diplomových prací nejen od studentů z fakulty elektrotechnické ale i z fakulty stojní.

Tato práce je zaměřena na kompletní návrh a popis konstrukce výkonových částí samotných měničů, které budou použity na správné řízení motorů pohánějící budoucí elektrickou formuli. Tyto měniče složené vždy ze tří výkonových modulů budou dohromady čtyři. Celý návrh jak schématu, tak plošného spoje se musí řídit podle oficiálních pravidel. [1] Důraz je kladen na bezpečnost, rychlou a snadnou diagnostiku a maximální využití energie z baterií.

Seznam symbolů a zkratek

DPS.....Deska plošného spoje

MOSFET.....Metal oxide semiconductor field effect transistor (polem řízený tranzistor s izolovaným hradlem)

IGBT.....Insulated gate bipolar transistor (polem řízený bipolární tranzistor)

SAE.....Society of automobile engineers (Společnost automobilních inženýrů)

DC.....Direct current (stejnoseměrný proud)

TS.....Tractive systém (vysokonapěťová část)

LVS.....Low voltage system (Nízkonapěťová část)

NO.....Normally open (Za normálního stavu je prvek rozpojený)

NC.....Normally closed (Za normálního stavu je prvek sepnutý)

PWM.....Pulse width modulation (Pulzně šířková modulace)

RUMM.....Rice Univerzal Microcontroller Module (Univerzální mikrokontrolerový modul vyvinutý ve středisku Rice)

SiC.....Silicon Carbide (Karbid křemíku)

BOM.....Bill of materiál (Soupis materiálu)

IO.....Integrovaný obvod

MKP.....Metallized Polypropylene Film Capacitors (Kondenzátory s pokoveným polypropylenovým filmem)

GND.....Ground (Kostra / zem)

LED.....Light emitting diode (svítící dioda)

Q_{Gate}náboj na gate tranzistoru [C]

f_{IN}modulovaná frekvence [Hz]

ΔU_{Gate}rozsah napětí na gatu tranzistoru [V]

ΔU_{C}rozsah napětí na kondenzátoru [V]

U_{GS}napětí mezi Gatem a Sourcem tranzistoru [V]

1 Výběr klíčových komponentů střídače

Před začátkem návrhu měniče je potřeba správně zvolit klíčové komponenty, které budou mezi sebou kompatibilní se zaručenou vysokou bezpečností a s co největším využitím energie. Nejprve je nutné vybrat výkonový modul, na jehož výběr je potřeba znát aspoň předběžné základní parametry motorů, které budou použity ve formuli. Po vybrání vhodného výkonového modulu je vhodné k tomuto modulu zvolit vyhovující budiče sloužící k řízení modulů. Budič je volen podle výpočtu spínacího výkonu a charakteristik tranzistorů v modulu. Další volenou komponentou je kondenzátor sloužící k filtraci střídavé složky na vstupu měniče. S touto komponentou souvisí vybíjení tohoto kondenzátoru, které, dělíme na pasivní a aktivní. Toto vybíjení slouží především ke zvýšení bezpečnosti. Jako další následuje měřicí obvod napětí v DC linku. Tento měřicí obvod slouží k potřebám regulace. Jako poslední komponenty volíme přídatné zdroje k budičům a ostatním drobnějším komponentám. Tyto zdroje jsou napájeny především z pomocného 12 V rozvodu určenému pro napájení všech nevýkonových částí formule. Většina komponentů byla už předem zvolena ostatními členy týmu UWB racing ale v průběhu návrhu došlo k určitým změnám jak ve vybraných komponentách, tak v uzpůsobení a rozdělení desek plošných spojů. Tyto změny značně komplikovaly zhotovení práce, ale byli nutné a prospěšné pro vylepšení výsledného návrhu daných komponent.

1.1 Tranzistorový modul

Při výběru výkonového tranzistoru je třeba uvažovat parametry už předem vybraného pro nás nejvhodnějšího motoru pro formuli. Jedná se o synchronní motor Fisher TI085-052-070-04B7S-07S04BE2 s permanentním buzením o těchto parametrech.

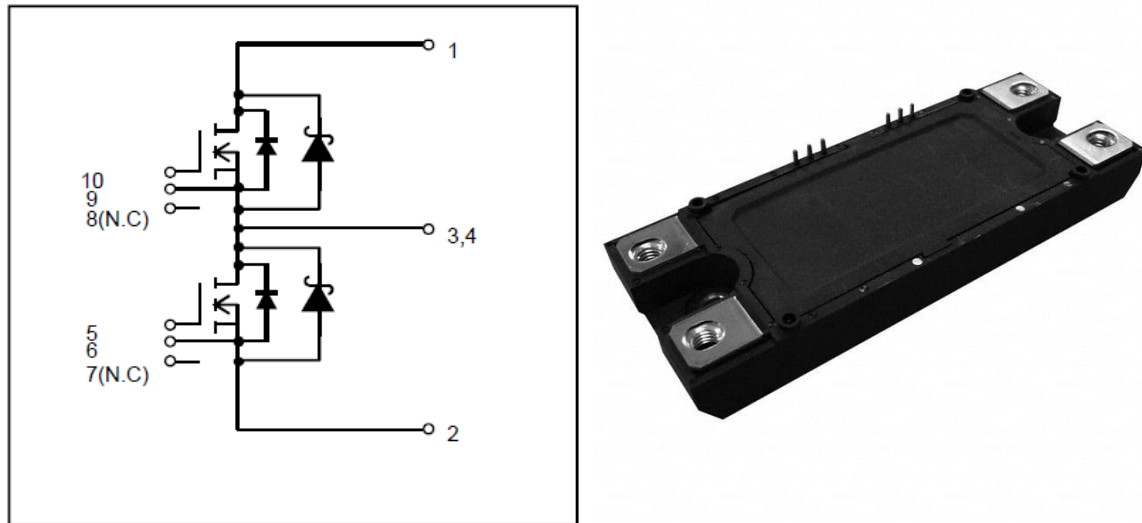
Tab. 1.1 Parametry motoru [11]

Parametr	Veličina	Hodnota
Jmenovitý výkon	P_N [kW]	15,4
Jmenovité napětí na DC linku	U_{DC} [V]	600
Jmenovitý proud	I_n [A]	22,6
Jmenovitý moment	M_n [Nm]	11,1
Jmenovité otáčky	n_N [ot/min]	12100
Maximální proud	I_{MAX} [A]	61
Maximální otáčky naprázdno	n_0 [ot/min]	20000
Maximální moment	M_{MAX} [Nm]	29,1
Trvalý moment při $n=0$ ot/min	M_o [Nm]	7,9
Trvalý proud při $n=0$ ot/min	I_o [A]	35,9
Typ zapojení	-	Hvězda
Počet pólů	-	8
Chlazení	-	kapalinové

Jak můžeme vidět z tabulky tak motor dosahuje velmi vysokých otáček což je pro použití na závodní formuli velmi výhodné.

Mezi nejdůležitější kritéria, která byla, uvažována při výběru tranzistorového modulu patří napěťová a proudová zatížitelnost, vypínací a zapínací časy a maximální teplota. Pro následný výběr budiče nás ještě budou zajímat vnitřní kapacity prvku a řídicí napětí U_{GS} .

Nikdy nelze vybrat tranzistor, který by vyhovoval požadovaným parametrům je zapotřebí udělat určité kompromisy a v rámci bezpečnosti tranzistorový modul lehce předdimenzovat. Po uvažování výše zmíněných podmínek jsme jako spínací silový prvek vybrali modul obsahující dva silikon karbidové tranzistory typu MOSFET s kódovým označením BSM120D12P2C005 [7].



Obr. 1.1 Schéma a pouzdro výkonového modulu převzato z [7]

Tyto moduly budou použity tři na jeden měnič, takže dohromady 12 modulů, abychom byli schopni sestavit čtyři 3f frekvenční měniče na řízení vybraných motorů a kol. Tento typ modulů byl zvolen především kvůli jeho vysoké spínací rychlosti, která zaručí hladký průběh veličin, a velice dobré tepelné vodivosti která se postará o lepší odvedení tepla z tranzistoru. Dobrý odvod tepla je pro nás velice důležitý protože, nesmí dojít k překročení maximální teploty čipu, která by mohla způsobit jeho zničení. Toto chlazení bude provedeno pomocí hliníkového chladiče protékaného chladicí kapalinou, který byl sestaven jiným členem týmu formule. Moduly budou po šesti kusech, každý opatřen plošným spojem obsahujícím jejich budiče, umístěny z každé strany chladiče.

1.2 Budič

Budič ve střídači slouží k zapínání a vypínání výkonové součástky, galvanickému oddělení silové složky od řídicích signálů. Tento proces zapínání a vypínání je použit k vytvoření požadovaného průběhu regulovaných veličin.

Abychom mohli zvolit vhodný budič pro zvolený unipolární tranzistor SiC MOSFET, který se nachází v modulu BSM120D12P2C00, potřebujeme znát jeho parametry. U volení budiče a jeho napájení nás zajímá takzvaný spínací výkon P_{DRV} ten lze spočítat z náboje na gate tranzistoru Q_{Gate} , ze zvolené spínací frekvence f_{IN} , kapacity mezi gate a source C_{GS} a z rozdílu napětí na výstupu budiče ΔU_{Gate} .

$$P_{DRV} = Q_G \cdot f_{PWM} \cdot \Delta U_{gate} + C_{GS} \cdot f_{PWM} \cdot \Delta U_{gate}^2 \quad (1.1)$$

$$P_{DRV} = 600 \cdot 10^{-9} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 19 + 14 \cdot 10^{-9} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 19^2$$

$$P_{DRV} = 0,66 \text{ W}$$

Z výpočtů výše lze vidět, že spínací výkon P_{DRV} vyšel 0,66 W. To je jedno ze základních kritérií, podle kterých je následně zvolen budič s kódovým označením ISO5852S-EP. Dále bylo nutné vypočítat potřebný výkon odporů na gate při zvolené hodnotě 4.2 Ω . Z datasheetu tranzistorů [7] zjistíme L_S a C_{ISS} . Pomocí těchto prvků vytvoříme náhradní obvod. U tohoto obvodu nás zajímá, jak dlouho trvá přechodový jev a jaká je hodnota proudu v 5 τ . Výpočet byl proveden pomocí online programu na simulaci obvodů [13]. Hodnota proudu v době 5 τ vyšla $I = 42,7 \text{ mA}$ což při napětí zdroje $U_{DC} = 18 \text{ V}$ odpovídá výkonu $P = 0,76 \text{ W}$. Pomocí tohoto výpočtu byl zvolen rezistor na gate s maximální hodnotou zvládnutelného výkonu 1 W a odporem 4.2 Ω . [6]

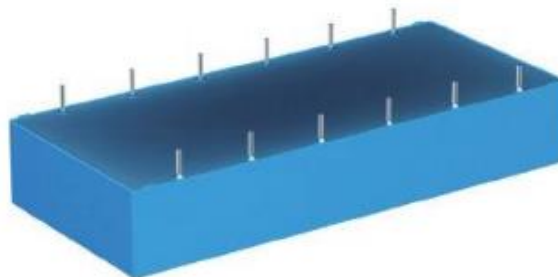
1.3 Kondenzátor

Při návrhu výkonového prvku s určitou frekvencí spínání by docházelo ke zvlnění proudu i napětí. Při zvlnění na výstupu dochází i ke zvlnění na vstupu. Tato skutečnost se musí v praxi eliminovat, aby se zvlnění nešířilo dále do sítě použitím kondenzátoru dostatečné kapacity a napěťové odolnosti, který je umístěn před tranzistorovým modulem. V tomto případě je kondenzátorem stabilizováno napětí v DC-linku. DC-link je stejnosměrný obvod vyvedený z hlavních baterií formule napojený na kondenzátory a následně na měniče.

Při výběru vhodného kondenzátoru je uvažováno několik kritérií. Ideálním cílem je střídavou složku proudu I_{AC} kompletně odfiltrvat a stejnosměrnou složku zcela zachovat I_{DC} .

Jednotlivé proudy a jejich následný poměr vypočítáme z pracovního bodu střídače z $\cos \varphi$ a hloubky modulace v daném okamžiku. Je ale nutné vypočítat reálný proud I_C tekoucí do kondenzátoru, pomocí kterého je možné už volit vyhovující kondenzátor. Tento proud je minimální potřebná hodnota proudu, kterou se bude kondenzátor nabíjet a vybíjet. Mimo proud je nutné před výběrem kondenzátoru zvolit rozmezí napětí, které se může na kondenzátoru objevit ΔU_C .

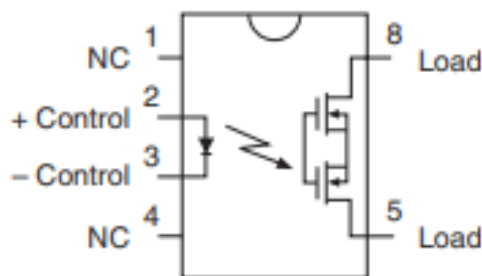
Pro použití v měniči byly vybrány kondenzátory typu MKP s kódovým označením B32778J8806K000 [8], které budou použity čtyři pro dosažení patřičné kapacity. [6]



Obr. 1.2 Vybraný kondenzátor převzato z [8]

1.4 Vybíjení DC-linku

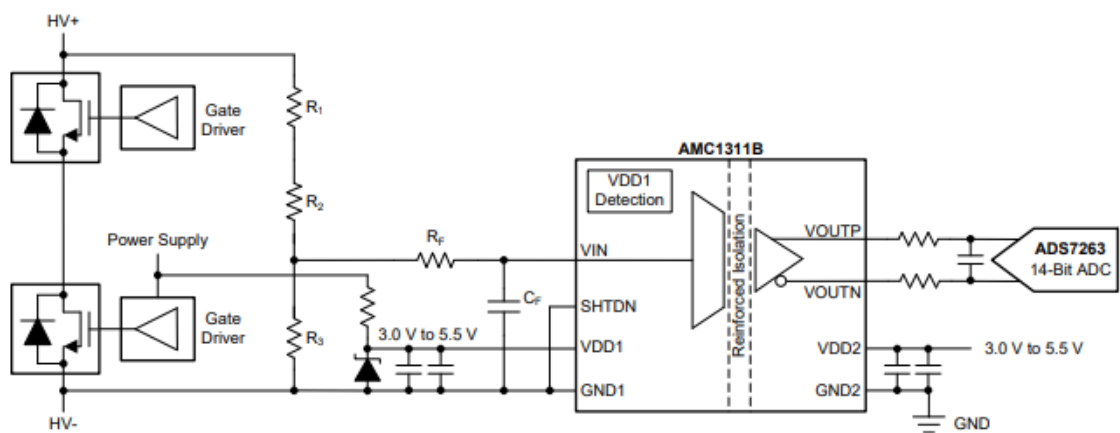
Vybíjení DC-linku je důležitá součást měniče, především z důvodu bezpečnosti. Slouží k vybití náboje z kondenzátoru při poruše nebo v klidovém stavu. Podle pravidel závodu [1] je nutno zajistit určitý čas, za který dojde k vybití na určitou hladinu napětí. Konkrétně pokles stejnosměrného napětí pod 60 V za 5 sekund. Taková rychlost jde realizovat pouze aktivním vybíjením. Z důvodů rozložení oteplení je nutné používat i vybíjení pasivní. Pasivní vybíjení je spolehlivější než aktivní, protože obsahuje pouze pasivní součástky. Pokud by nastala porucha a aktivní vybíjení by nezareagovalo, zareaguje místo něj vybíjení pasivní. Po uvažování všech možností a zhodnocení prostoru na sběrné desce se rozhodlo, že pasivní vybíjení bude umístěno na desce kondenzátorů a aktivní na níže navrhované sběrné desce. Pro základ aktivního vybíjení je použit optron PLB171 [9], u kterého dosahuje vnitřní izolace až 5000 V. Tento optron slouží k připojování výkonového rezistoru do obvodu, na kterém se přebytečný výkon přemění v teplo. Jeho funkce je podobná jako funkce relé, ovšem s optickou spouští tvořenou infračervenou LED a fototranzistorem. Jako vybíjecí odpor bude použit výkonový rezistor typu PF2003, který zvládá výkon 35 W.



Obr. 1.3 Vnitřní schéma optronu převzato z [9]

1.5 Měření napětí DC-linku

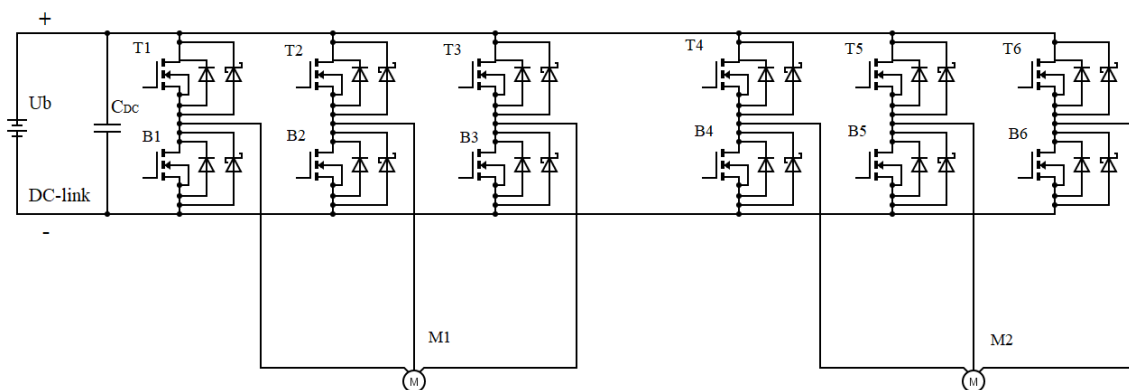
Informace o velikosti napětí v DC-linku je důležitá pro následnou regulaci měniče. Je snaha o to, aby bylo měření umístěné co nejbližší kondenzátorům, tím se dosáhne toho, že měření bude přesnější a efektivnější pro potřebu regulace měniče. Napětí hned za kondenzátory je nejvíce stabilizované a také je zde nejméně zvlněné. Pro použití při měření napětí byl vybrán integrovaný obvod AMC1311B [10]. Zapojení tohoto obvodu bylo převzato ze SHRacku. [2] AMC1311B je přesný izolovaný zesilovač, který má výstup oddělený od vstupu pomocí izolační bariéry. Tato izolační bariéra poskytuje izolaci až do 7 KV špičkového napětí a slouží k ochraně nízkonapěťových obvodů. Dále je tato bariéra vysoce odolná proti rušení magnetickým polem. Vybraný integrovaný obvod disponuje vysokoimpedančním vstupem vhodným k zapojení na vysoké napětí. Všechny tyto vlastnosti dělají z tohoto obvodu vhodného kandidáta pro použití na měření vysokého stejnosměrného napětí v DC-linku, které dosahuje hodnoty 600 V.



Obr. 1.4 Doporučené zjednodušené zapojení od výrobce převzato z [10]

2 Návrh schémat střídače včetně budičů

Pro návrh schémat byl použit program Altium designer. Schéma měření v DC-linku je převzato ze SHRacku [2], protože bylo kompatibilní s parametry navrhovaného měniče. Schémata jsou rozdělena na dvě části z důvodu výroby dvou samostatných typů desek plošných spojů. První část schémat patří k desce budiče, která bude připevněna přímo na výkonový modul. Druhá část schémat patří ke sběrné desce, která bude připojena přes konektor a umístěna na šesti deskách budičů. V první části je obsaženo hlavní schéma budiče, které spojuje dvě dílčí vedlejší schémata a obsahuje konektor na připojení do sběrné desky. První dílčí schéma je schéma obvodů pro ošetření takzvaného mrtvého času a druhé je schéma samotného budiče, které obsahuje samotný integrovaný obvod budiče, hlavní zdroj budiče a ostatní pomocné obvody. Druhá část se zaměřuje na sběrnou desku (Collector) která má taktéž hlavní schéma obsahující konektory na budiče a konektor pro připojení do RUMMu a dvě dílčí schémata. Jedno z dílčích schémat obsahuje schéma aktivního vybíjení kondenzátoru a ve druhém je obvod měření DC-linku. Je důležité zmínit, že tyto sběrné desky budou vyrobeny dvě, ale pouze jedna z nich bude obsahovat již zmíněné dílčí schémata na měření a vybíjení. Tyto dva obvody není nutné mít na obou deskách, protože na všechny čtyři měniče stačí tento obvod pouze jednou pro společný stejnosměrný obvod. Dále budou popsána jednotlivá schémata a jejich obsah. Na obrázku 2.1 můžeme vidět schéma výkonové části obvodu dvou měničů. Tyto dva měniče budou spolu s jejich budiči umístěny z obou stran chladiče. Tím pádem je toto schéma pouze poloviny výkonového obvodu.



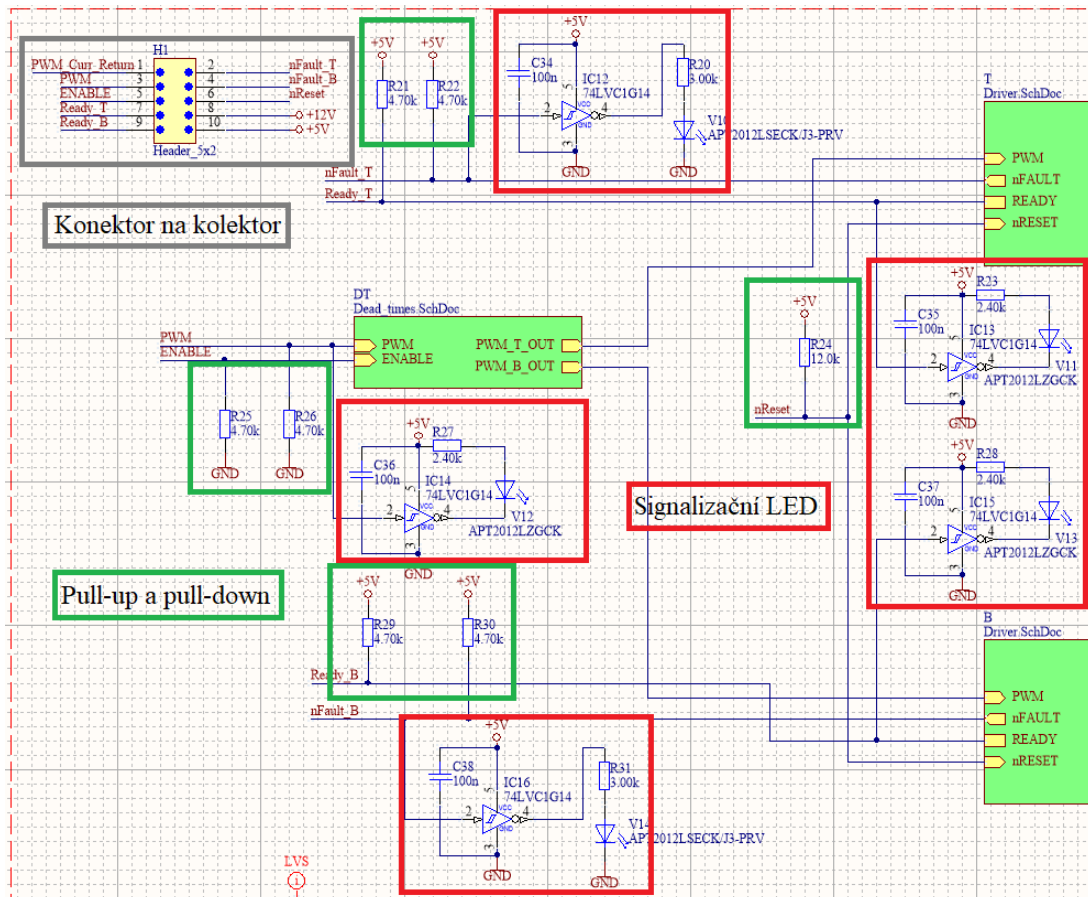
Obr. 2.1 Schéma výkonového obvodu dvou měničů vytvořeno na [14]

2.1 Hlavní schéma desky budiče

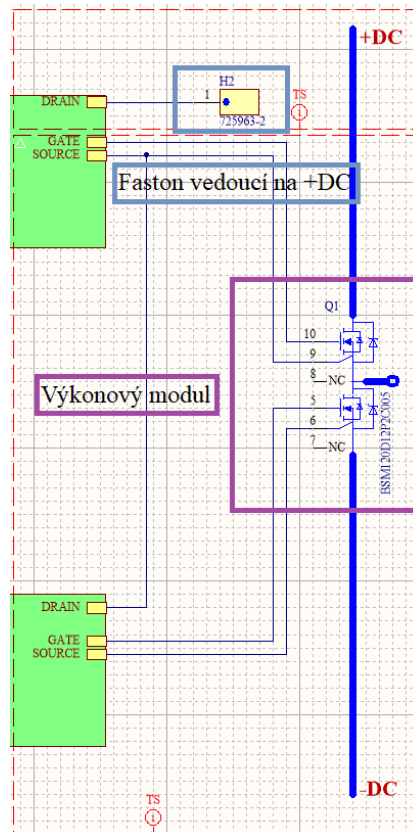
Hlavní schéma budiče obsahuje již zmíněná dílčí schémata mrtvých časů a budiče samotného. Schéma je rozděleno na část vysokonapěťovou TS. V této části ještě můžeme vidět oddělení +DC od zbytku výkonové části z důvodu zachování provozní bezpečnostní vzdálenosti. Druhou část schématu tvoří nízkonapěťová část LVS.

Pokud se nejprve zaměříme na část LVS obr. 2.2 a prvky, které se v ní nacházejí, můžeme níže vidět signalizační diody, které jsou určeny k indikaci signálů vedoucích do i z desky budiče. Konkrétně se jedná o signály vedoucí z horního a spodního budiče *Fault* a *Ready* a signál *PWM* vedoucí ze sběrné desky do budiče. Dohromady těchto LED bude pět na každé desce 2 červené pro faulty a 3 zelené pro ostatní signály. Jejich účel je signalizace daných signálů, sloužící k ověření funkčnosti, případně k odhalení poruchy. Signalizační diody jsou zapojeny podle charakteru signálu, ale všechny zapojení obsahují invertor se Schmittovou spouští pro zlepšení jejich funkčnosti a předřadný rezistor pro dosažení požadovaného proudu přes diodu. Dále je každý signál podle jeho charakteru vybaven pull-upem nebo pull-downem z důvodu potlačení náhodného jevu a posílnění signálu ve vypnutém stavu. Jako poslední část je na schématu konektor, který byl vybrán jako nejvhodnější varianta pro propojení se sběrnou deskou. Obsazeny jsou všechny piny se všemi potřebnými signály.

Na dalším obrázku 2.3 se nachází vysokonapěťová část, která musí být fyzicky vzdálená od části nízkonapěťové o pravidly předepsanou vzdálenost v závislosti na prostředí. Mezi TS a +DC části je velké rozdílové napětí, tudíž tyto části musí od sebe též udržovat určitou provozní vzdálenost, aby nedošlo k přeskoku napěťového výboje. Tato vzdálenost je menší než vzdálenost mezi TS a LVS předepsaná pravidly formule. V oblasti kladného stejnosměrného napětí se nachází pouze faston, ze kterého při realizaci povede drát na kladné napětí DC linku. Faston je zde umístěn pro propojení horního drainu. Ve zbytku TS části se nachází hlavní součástka a to výkonový modul, který má pouze naznačeno připojení k DC-linku, protože toto zapojení bude provedeno pomocí šín mimo DPS. Dále je modul připojen k oběma budičům, jejichž schéma bude následně popsáno.



Obr. 2.2 LVS část schématu Driver_Main



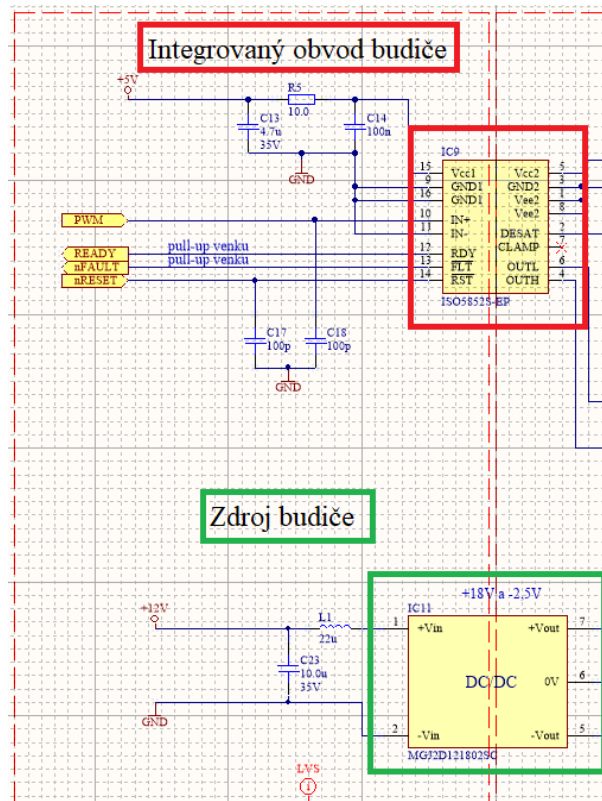
Obr. 2.3 TS část schématu Driver_Main

2.2 Schéma vlastního budiče

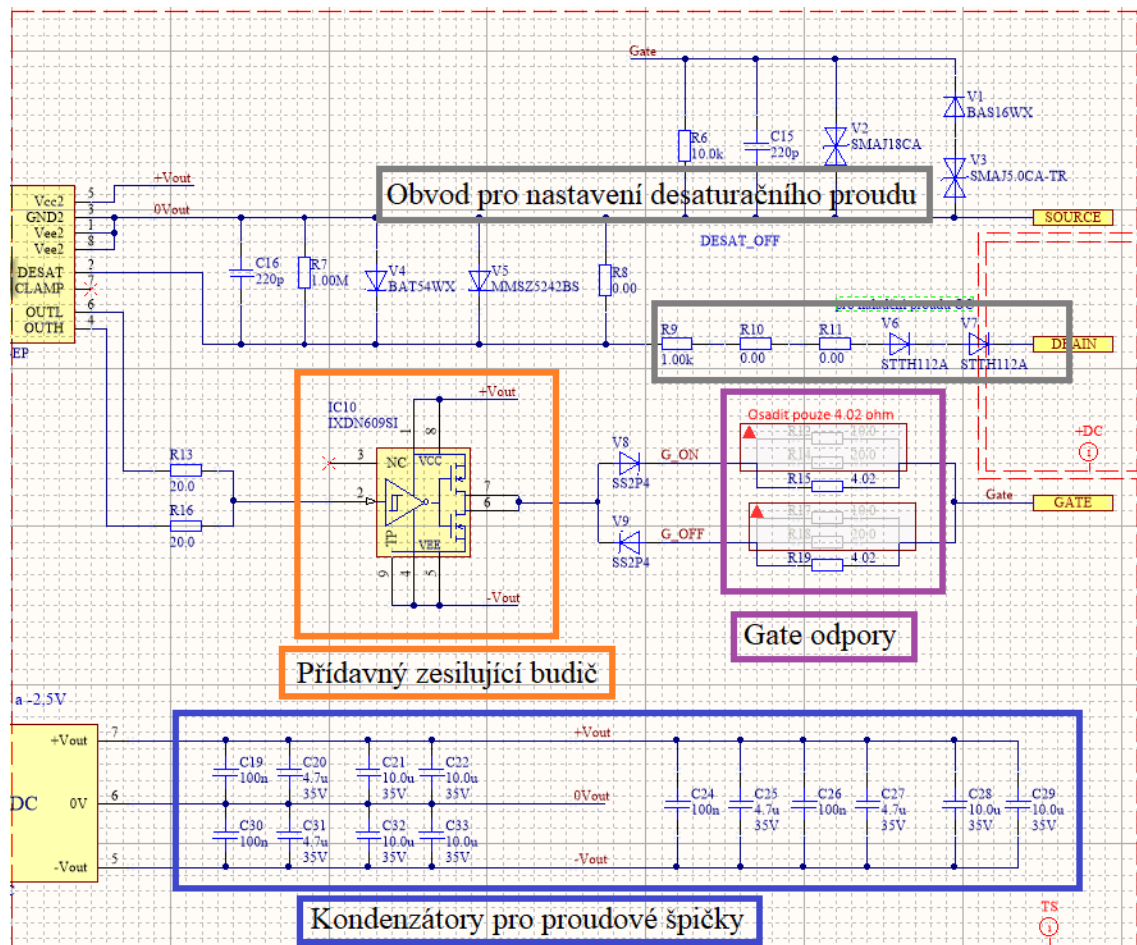
Schéma vlastního budiče je umístěno v hlavním schématu dvakrát pro horní a dolní budič. Tato schémata jsou identická, liší se pouze vnějším zapojením jejich vstupních a výstupních signálů. Vlastní schéma budiče je opět rozděleno na část LVS a TS. V části TS je oddělen výstup na drain který následně vede na již výše popsany faston. V tomto schématu se nachází nejvíce klíčové prvky této DPS.

Na schématu v LVS části obr. 2.4 se nachází část hlavního integrovaného obvodu budiče a polovina jeho zdroje. Uvnitř těchto součástek se nachází izolační bariéra pro oddělení části LVS a TS. Obvod budiče byl vybrán podle již výše zmíněných kritérií a jeho vstupní signály byly vybaveny kondenzátory pro zvládnutí proudových špiček. Na 12 V vstupu do zdroje je zapojen kondenzátor a cívka pro vyhlazení a stabilizaci vstupního napětí a proudu. Zdroj pro budič MGJ2D121802SC převádí napětí z 12 V DC na 18 V DC výstupní výkon je 2 W a typická účinnost 80 %. Byl vybrán díky tvrdosti výstupního napětí a vysoké vnitřní izolační schopnosti, která zaručí patřičné oddělení nízko a vysoko napěťové části.

Ve druhé obsáhlejší části schématu obr. 2.5 se mimo druhých částí již zmíněných obvodů s vnitřní izolací nachází obvod pro doladění desaturačního proudu, jehož odpory budou muset být ještě doladěny při uvedení do provozu. Dalšími komponenty jsou gate odpory, jejichž spočtení bylo popsáno výše. Ve schématu se nachází dohromady šest těchto odporů, ale budeme osazovat do DPS pouze dva a čtyři budou sloužit jako rezervní, kdyby bylo potřeba odpor ještě doladit. Na DPS jsou znázorněny pouze pouzdrově největší z nich, které se osadí. Doladovací rezistory se případně osadí přímo pod tyto osazená pouzdra rezistorů. Ve schématu musí být umístěné velké množství kondenzátorů, protože se v obvodu budou vyskytovat velké proudové špičky a poměrně velké budící výkony. Kondenzátory budou na DPS patřičně umístěny co nejbližší k daným integrovaným obvodům. Za hlavním budícím obvodem a před gate odpory je umístěn ještě přídavný budič z důvodu ještě většího posílení signálu vedoucího na gate. Tento přídavný budič je zde umístěn především k pokrytí proudových rázů, které by mohly při regulaci nastat.



Obr. 2.4 LVS část schématu Driver

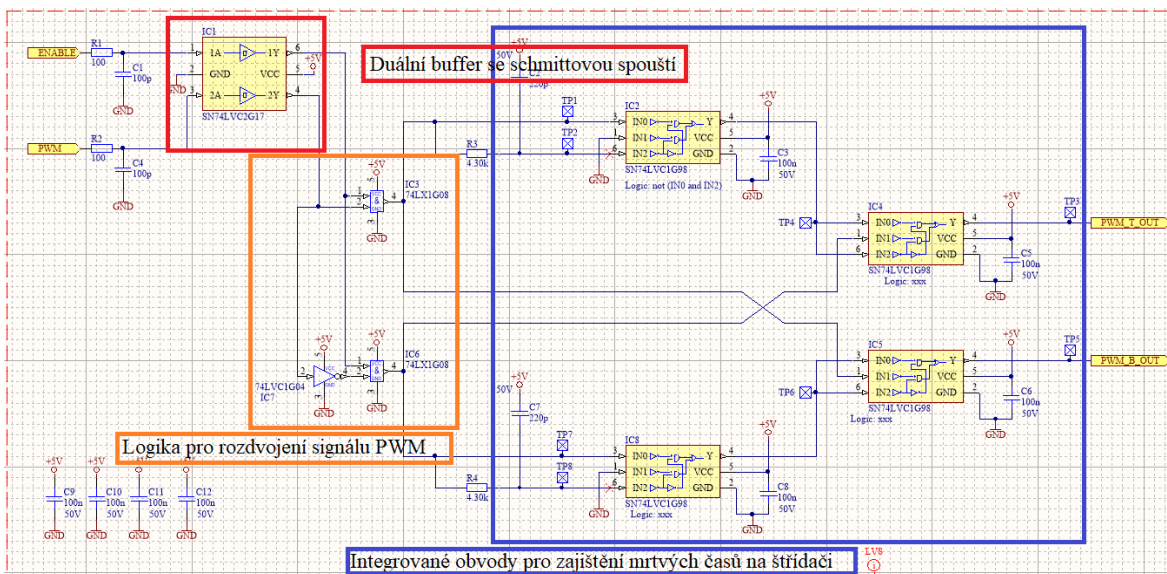


Obr. 2.5 TS část schématu Driver

2.3 Schéma mrtvých časů

U toho schématu obr. 2.6 nedochází k rozdělení a je zde pouze nízkonapěťová část. Celé schéma slouží ke dvěma základním účelům. První z nich je rozdělení signálu *PWM* na signál *PWM* pro horní a spodní budič zvlášť a doplnění ovládání o signál *ENABLE*. Druhý účel je vylepšení a zajištění patřičných mrtvých časů, které zaručují, že nebudou nikdy sepnuty tranzistory nad sebou, protože by došlo ke zkratu na DC-linku.

Duální buffer předřazený rezistorem a kondenzátorem funguje jako filtr a zaručuje patřičné ošetření a tvarování signálů pro jejich maximální spolehlivost a správnost. Pod bufferem se nachází logika pro rozdělení *PWM* ovládaných signálem *ENABLE*. Tento krok byl proveden z důvodu úspory počtu výstupních signálů z RUMMu. Signál *ENABLE* bude vždy pouze jeden pro jeden střídač. Do každého modulu povede jeden signál *PWM* a společný signál *ENABLE*, tím dojde k ušetření tří signálů na každém měniči. A ke zvýšení odolnosti vůči rušení, které by mohlo způsobit poruchu zarušením signálu a nechtěným sepnutím tranzistorů nad sebou. Zbytek schématu tvoří obvody pro zajištění řádných mrtvých časů. Tyto obvody jsou především určeny ke zvýšení robustnosti a bezpečnosti. Celá logika ošetření mrtvých časů je poskládána z patřičně zapojených univerzálních logických obvodů, které blokují sepnutí dvou tranzistorů nad sebou v jednom modulu.

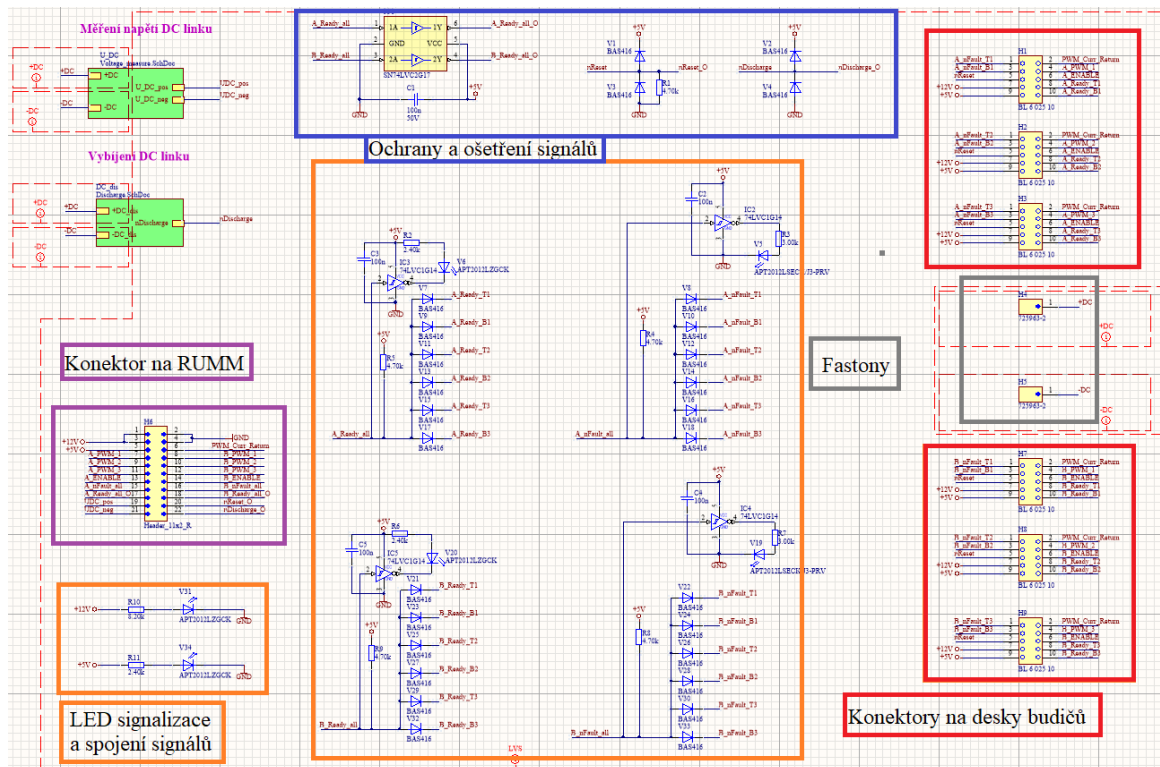


Obr. 2.6 Schéma Dead_times

2.4 Hlavní schéma sběrné desky

Sběrná deska obr. 2.7 má především za úkol propojit desky budičů s řídicí jednotkou RUMM. K tomu patří propojení daných signálů, jejich ochrany a zaručení jejich správnosti. Jako další funkce desky bylo vybráno měření napětí v DC-linku a jeho aktivní vybíjení. Pro tyto dvě funkce jsou zhotovena schémata zvlášť. Pro přehlednost jsou obvody na spojení signálů společně se vstupním napětím opatřeny LED signalizací. Ve schématu převládá nízkonapěťová oblast, jedinou výjimkou je připojení do DC-linku.

Ochrany jsou podobně jako v případě předchozího schématu opatřeny duálním bufferem se Schmittovou spouští v případě spojeného signálu *Ready* obou měničů. V případě resetu se jedná o pull-down a blokovací diody. U signálu *Discharge* se nachází pouze blokovací diody. Na pravé straně schématu se nacházejí všechny konektory pro připojení na desky budičů pro oba měniče. Při zapojení konektorů bylo nutné signály připojené na piny zrcadlově obrátit, protože tyto konektory budou na sběrné desce zesponu naopak, konektory na deskách budičů budou na vrchu desky. Mezi těmito konektory se nachází fastony pro připojení k +DC a -DC. Tyto fastony slouží pro měření a vybíjení a budou připojeny na DC-link pomocí již zmíněného drátu. Konektor na levé straně bude připojený do řídicí jednotky RUMM. Z důvodu zvoleného prostorového rozvržení bude pravoúhlý. Při návrhu jsme nejprve zvolili konektor dvaceti pinový, ale z důvodu posílnění signálu +12 V a GND pro velkou proudovou zátěž jsme konektor vyměnili za dvaceti dvou pinový a zmíněnému signálu přiřadily dva piny. Pomocí tohoto kroku se sníží teplotní zatížení daných pinů a klesnou jejich ztráty. Jako poslední část ve schématu je navrženo spojování signálů pro oba měniče. Spojované signály jsou signály chyb budičů- *Fault* a signály připravenosti budičů-*Ready*. Spojení je provedeno pomocí diod, které zaručují, že se signály navzájem neovlivňují a zároveň se spolehlivě propojí. U spojení *Faultu* se aktivuje červená LED při aktivaci jednoho nebo více signálů značící, že minimálně jeden budič v měniči není v pořádku. Naopak u signálů *Ready* zelená LED svítí pouze v případě, že jsou všechny budiče jednoho měniče aktivní a připravené - stačí, aby jeden nebyl připraven, a neaktivuje se. Obvody pro aktivaci LED mají stejné zapojení jako LED na deskách budičů samotných.



Obr. 2.7 Schéma Collector_Main

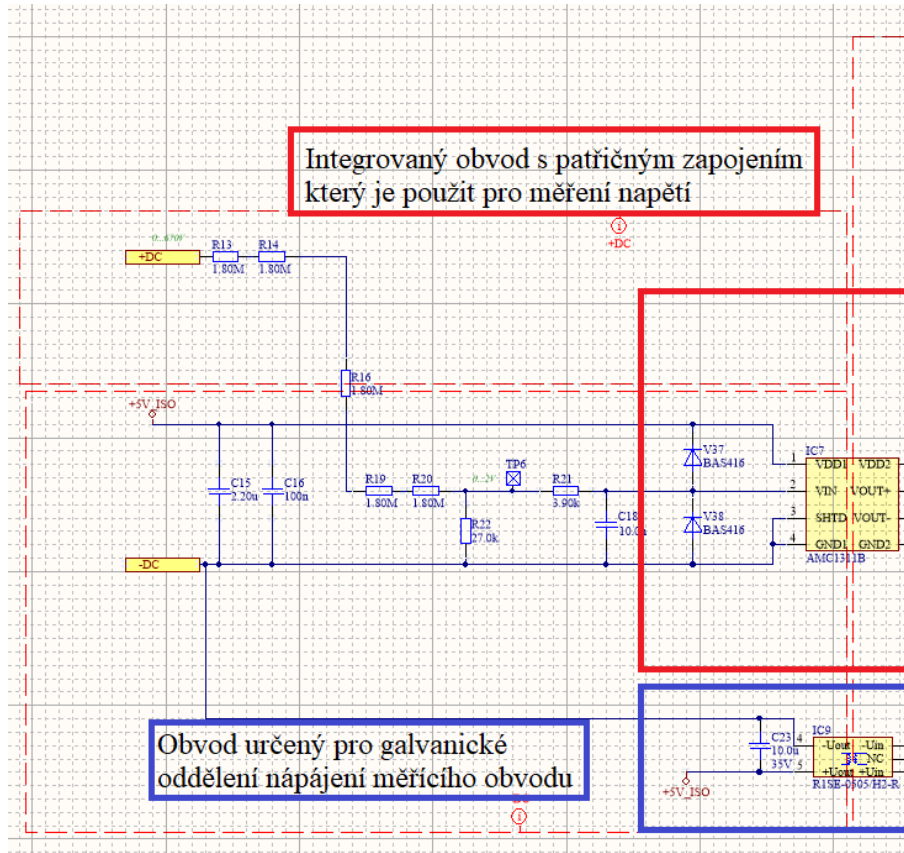
2.5 Schéma měření napětí v DC-linku

Schéma měření je opět rozděleno na vysokonapěťovou část TS a nízko napěťovou část LVS. Část TS je ještě rozdělena na oblast +DC a -DC z důvodu měření napětí právě mezi těmito částmi. Mimo to, že deska obsahuje samotný měřicí obvod, je na ní umístěn zdroj záporného napětí a integrovaný obvod pro galvanické oddělení napájení měřicího obvodu. Tento obvod byl převzat z již hotového projektu SHRack [2] z důvodu jeho kompatibility s použitím v mém návrhu měniče.

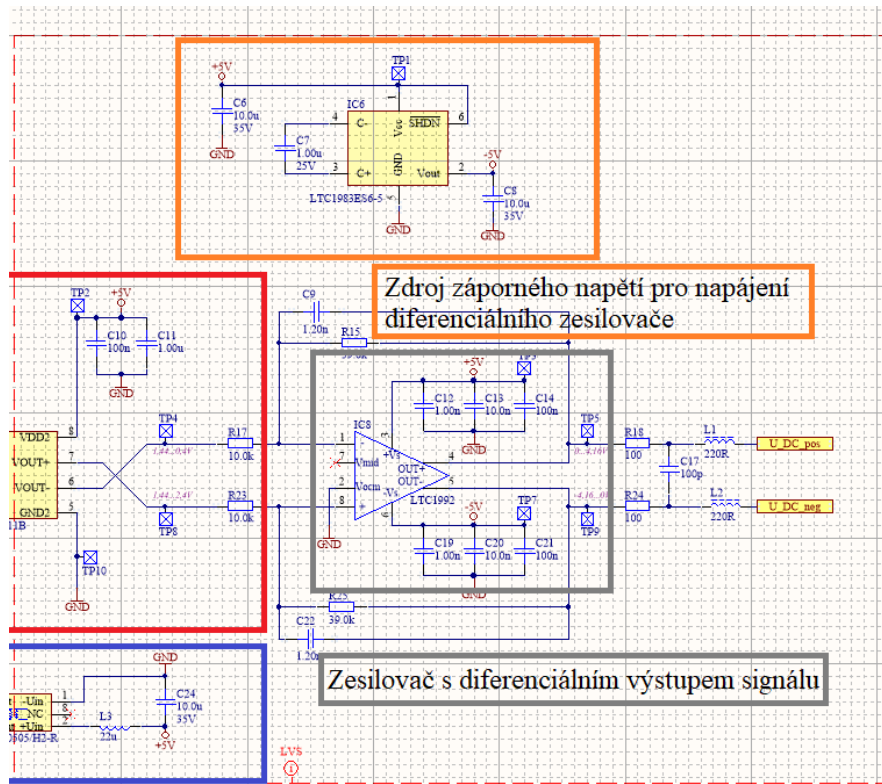
Ve vysokonapěťové části obr. 2.8 se nachází část měřicího obvodu a část galvanického oddělení. Oba tyto integrované obvody mají vnitřní izolační bariéru, která odděluje vysoké napětí od nízkého. Mezi kladným a záporným stejnosměrným napětím se nachází sériová řada rezistorů. Několik kondenzátorů v měřicím obvodu zajišťuje vyhlazení měřeného napětí pro zvýšení přesnosti měření. U galvanického oddělení je zapojen také kondenzátor z důvodu potlačení proudových špiček fungující jako zásobárna okamžité energie.

Část nízkonapěťová obr. 2.9 je poněkud obsáhlejší a její součástí krom druhé části měřicího obvodu je zdroj záporného napětí. Tento zdroj záporného napětí je určen pro

napájení zesilovače s diferenciálním výstupem. Ten je použit pro vývod signálů změřeného napětí vedených přímo do řídicí jednotky, kde se bude dále patřičně vyhodnocovat.



Obr. 2.8 TS část schématu Voltage_measure

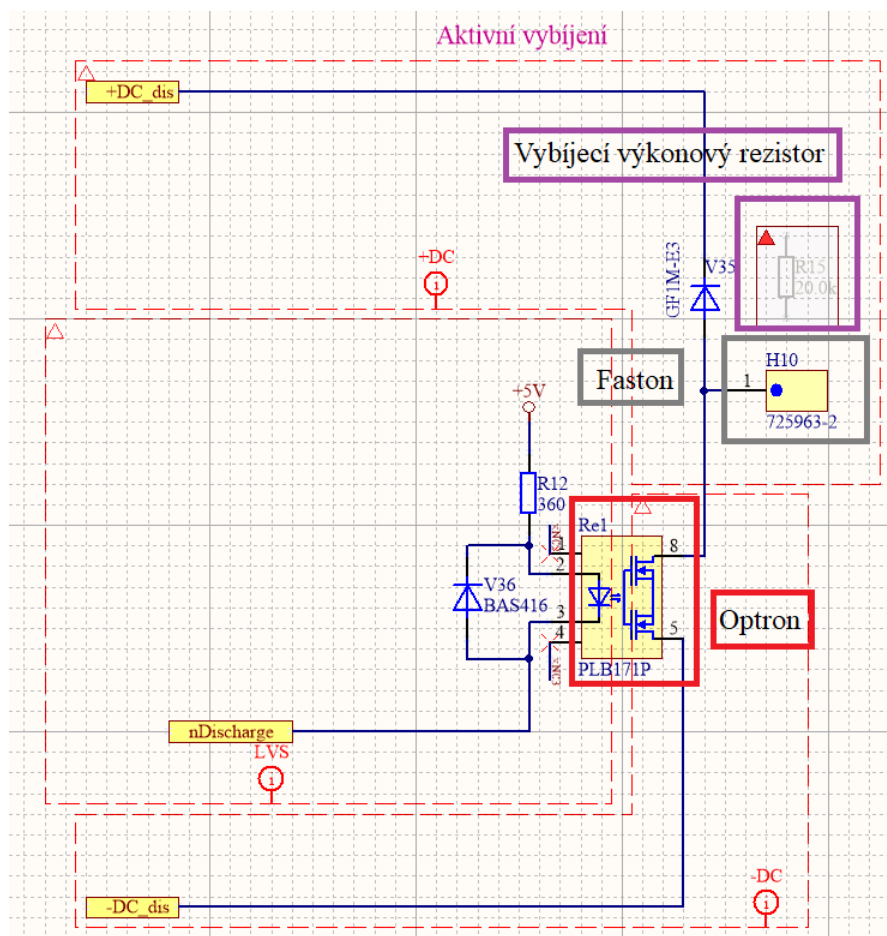


Obr. 2.9 LVS část schématu Voltage_measure

2.6 Schéma vybíjení DC-linku

Obvod vybíjení obr. 2.10 je opět rozdělen na několik částí. V části vysokonapěťové je umístěn faston, část optronu a výkonový rezistor. V druhé části je umístěna druhá část optronu, a odpor nastavující proud tekoucí do jeho ovládacího vstupu.

Výkonový rezistor je z jedné části připojen přes faston umístěný v hlavním schématu vedoucí na +DC. Druhý vývod rezistoru je zapojen na faston umístěný zde ve schématu, který slouží k propojení s optronem. Tento výkonový rezistor nebude umístěn na DPS, ale z boční strany chladiče a připojený přes dráty na již zmíněné fastony. Optron slouží ke galvanicky oddělenému spínání výkonového rezistoru pomocí LED a fototranzistorů. Rychlost tohoto spínání určuje rychlost vybití obvodu a je regulována řídicí jednotkou RUMM. Optron je ve stavu NC, což znamená, že pro rozpojení obvodu s rezistorem musí LED stále svítit, díky čemuž se zaručí, že ve stavu bez napětí nebo bez řídicího signálu je rezistor připojen do obvodu.



Obr. 2.10 Schéma Discharge

3 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů byla opět navržena v programu Altium designer. V programu se importují součástky ze schématu do souboru desky. Je nutné navrhnut základní tvar desky, na který následně korektně rozmístíme součástky, přičemž se držíme předepsaných parametrů. Součástky jsou po rozmístění propojeny v patřičných vrstvách odpovídající tloušťkou propojení. Obě desky jsou z důvodu obsáhlosti a snahy o malé rozměry navrženy jako čtyřvrstvé. Z důvodu dodržení vzdáleností uvedených v pravidlech soutěže [1] bude nutné desky lakovat a na zvolených místech i frézovat.

Tab. 3.1 Minimální vzdálenosti na desce [1]

Napětí	Vzdálenost přes povrch	Vzdušná vzdálenost	Lakovaná deska
0 - 50 V DC	1,6 mm	1,6 mm	1 mm
50 - 150 V DC	6,4 mm	3,2 mm	2 mm
150 - 300 V DC	9,5 mm	6,4 mm	3 mm
300 - 600 V DC	12,7 mm	9,5 mm	4 mm

Deska budičů bude dohromady vyrobena 12x. Pro výrobu desek bude použita nerezová šablona na nanášení pájecí pasty z důvodu urychlení a zjednodušení výroby. Pro správnou orientaci a umístění nerezové šablony byly na desku umístěny tři kalibrační díry. U sběrné desky šablonu vyrábět nebudeme, protože tyto desky budou pouze dvě a pouze na jedné z nich bude umístěno měření a vybíjení. Každá deska budičů bude umístěna na jednom výkonovém modulu, na který bude připevněna pomocí rohových děr samořeznými šrouby s rozměrem závitu M 2.5. Desky budou spojeny po šesti kusech pomocí sběrných desek umístěných přímo na nich. Upevnění sběrné desky kromě držení na samotných konektorech ještě není přesně specifikováno, ale pravděpodobně bude vyřešeno navržením a vytisknutím vlastního modelu úchytu pomocí 3D tiskárny.

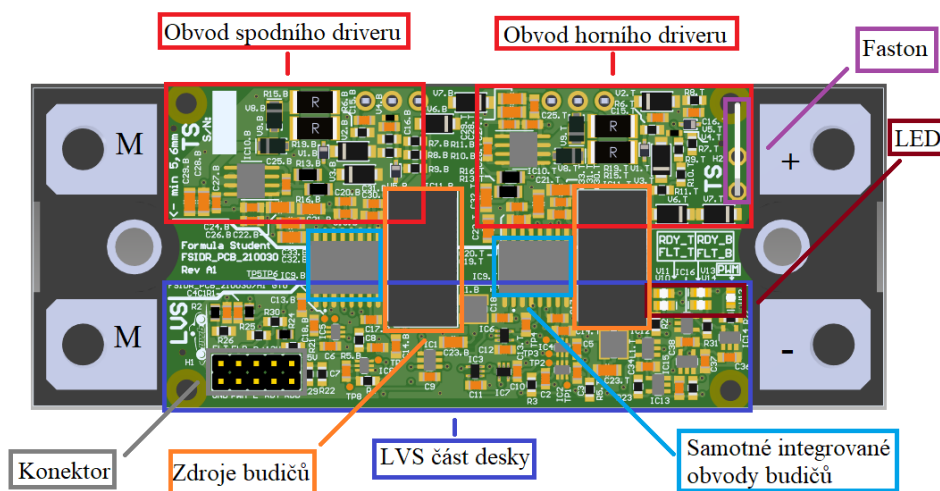
3.1 Návrh desky budiče

Při rozmístování součástek bylo nutné začít největšími komponenty, které budou zároveň tvořit bariéru mezi TS a LVS částí, a to zdroji budičů a IO budiče. Mezi částí LVS a TS je pravidly předepsaná vzdálenost 12,7 mm. Ve snaze o co největší kompaktnost desky bylo rozhodnuto, že deska bude lakovaná a pod součástkami na bariéře bude deska navíc ještě vyfrézována. Pomocí těchto kroků se dostaneme na minimální vzdálenost předepsanou pravidly při lakované desce 4 mm. Minimální vzdálenost zmíněných částí na desce v žádném bodě neklesne pod 5,6 mm, čímž je splněna podmínka daná pravidly o minimální vzdálenosti. Mimo vzdálenost mezi TS a LVS je potřeba dodržet vzdálenost provozní mezi horním a spodním obvodem budiče. Minimální hodnota této vzdálenosti byla zvolena 3mm podle minimální vzdálenosti mezi pady blokovacích diod umístěných v bezpečnostní mezeře. Při návrhu desky nesmíme zapomenout na její popis, identifikační značení, označení verze desky. Z důvodu nedostatku místa jsou tyto popisky umístěny v blokovací mezeře. Na desce je umístěno zmenšené logo UWB racing vedle označení LVS částí. Je to jediné logo, které se podařilo na desku umístit. Deska je pouze jednostranná, protože přijde umístit přímo na výkonový modul, takže by se součástky z druhé strany nevešly.

Vysokonapěťová část je na obou stranách patřičně označena podobně jako oblast mezery mezi TS a LVS. Na obou obvodech jsou vidět gate odpory, u kterých je snaha o umístění co nejbližší ke gate pinům z modulu a jejich propojení s obvodem je provedeno pomocí širších cest než zbytek obvodu pro snížení ztrát. Blokovací diody jsou další mohutnější součástkou, která jak už bylo zmíněno, je umístěna do vytvořené provozní vzdálenosti. Pro posílení bariéry jsou vždy umístěny tyto diody dvě sériově za sebou a slouží k propojení drainů. Drain ze spodního budiče musí být propojen ze sourcem budiče horního a budič horního budiče musí být propojen s +DC na DC-linku. Propojení na DC-link bude realizováno pomocí fastonu, který se po osazení desky patřičně ohne směrem k plusovému propojení modulu. Propojen bude opět pomocí drátu. Mezera mezi fastonem a horním budičem je stejného charakteru jako mezi obvody budičů. Při rozmístování kondenzátorů je kladen důraz na umístění co nejbližší k patřičným IO. Po zapojení padů součástek bylo na desce v horní a spodní vrstvě rozlito nulové napětí patřící k danému budiči. V první mezivrstvě se rozlilo kladné napětí a ve druhé mezivrstvě záporné. Tato rozlité slouží ke zjednodušení a zlepšení propojení součástek a také jsou rozlité vodivé plochy jednodušší na

následnou výrobu. Mezi těmito vylitými vodivými plochami bylo opět nutné zachovat již zmíněné vzdálenosti.

Ve spodní části desky, ve které se nachází nízkonapěťová část, bylo při rozmístování součástek nejdůležitější prvotní umístění konektoru a světelné signalizace. I zde je nutné brát ohled na to, aby část TS a LVS byla dostatečně vzdálena. Tato vzdálenost je vyznačena a popsána na desce pro větší názornost a přehlednost. Konektor byl umístěn do levého kraje desky. Toto umístění je nutné z důvodu velikosti pouzder zdrojů budičů, které by jinak zasahovaly do sběrné desky. Nad konektorem jsou umístěny pull-upy, pull-downy a filtry k ošetření vstupních i výstupních signálů. LED signalizace je umístěna v pravé části desky, aby nebyla zakryta sběrnou deskou po jejím umístění. Světelné diody jsou řádně umístěny tak, aby byla vždy zelená signalizace *Ready* nad červenou signalizací *Fault* pro horní i dolní budič. Je zde umístěna i signalizace společného signálu *PWM*. Všechny LED jsou na desce řádně čitelně popsány pro přehlednost při oživování i následného provozu zařízení. Díky této signalizaci budeme schopni rychleji identifikovat vadnou desku a díky individuálnímu návrhu desek na každý modul zvlášť je případně možná možnost vadný modul s deskou urychleně vyměnit. Při dalším rozmístování součástek je zde kladen důraz pouze opět na přítomnost kondenzátorů co nejbližší IO. Je důležité, aby každý z integrovaných obvodů měl blízko k sobě alespoň jeden kondenzátor pro zaručení jeho správné funkčnosti. V této části byla opět vylita vodivá plocha ve všech vrstvách desky. V horní a dolní vrstvě jsme pro vylití zvolily zem (GND). V prostředních vrstvách desky bylo zvoleno pro vylití kladné napětí ze zdrojů +5 V a +12 V.



Obr. 3.1 3D model desky s modulem *Inverter_Driver*

3.2 Návrh sběrné desky

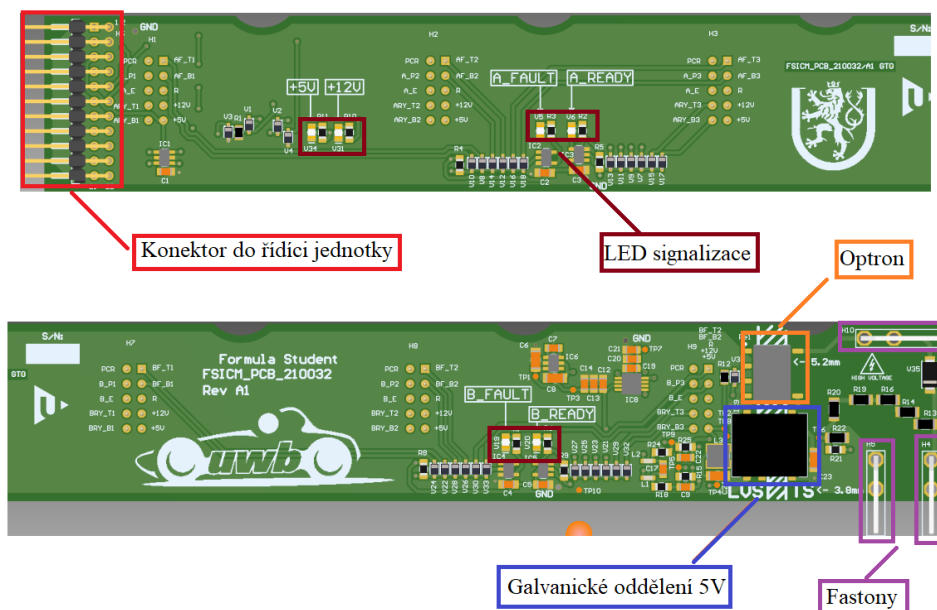
Na sběrné desce obr. 3.2 převažuje část nízkonapěťová, ale najdeme zde i část vysokonapěťovou, která slouží k vybíjení a měření DC-linku. Podlouhlý tvar desky je ovlivněn jejím účelem pospojovat desky budičů pro dva měniče a jejich signály po ošetření spojit s řídicí jednotkou. To vysvětluje její délku, šířka desky je závislá na vzdálenosti nejvyšší součástky od kraje na deskách budičů. Tuto nejvyšší součástku představuje zdroj budiče. Rozměry desky teda vyšly šířka 30 mm a délka 300 mm. Na desce je nutné podobně jako u desek budičů vytvořit výbrusy pro umístění upevňovacích šroubů do výkonových modulů. Pravidla pro vzdálenost LVS a TS platí stejná jak u desky předchozí. Provozní vzdálenost mezi +DC a -DC zachováme taky stejnou jako u předchozí desky a to minimálně 3 mm. Tyto desky budou vyrobeny dvě z každé strany chladiče, ovšem jedna z nich bude postrádat TS část. DC-link bude společný pro všechny měniče, proto stačí pouze jedno měření a jedno vybíjení. Při rozmísťování součástek bylo důležité správně spočítat a určit umístění konektorů, které musí sedět s mechanickým umístěním desek budičů a řídicí jednotky. Vysokonapěťová část musí být umístěna na kraji desky z důvodu patřičného oddělení od zbytku a pro snadnější připojení na DC-link a na vybíjecí rezistor. Tento vybíjecí rezistor nebude umístěn na desce, ale z boční strany chladiče a připojen přes dráty pomocí fastonů do desky. Deska je oproti desce budičů oboustranná už jen z důvodu, že konektory na připojení k deskám budičů musí být zespodu. Prázdné oblasti jednotlivých vrstev desky budou opět vyplněny vodivou plochou podobně jako u předchozí desky. Vrchní a spodní deska bude vodivě spojena s GND. A vnitřní vrstvy budou vodivě propojena s +12 V a +5 V pro posílení vodivých cest zdrojů. Pro lepší zobrazení byl níže obrázek desky rozdělen.



Obr. 3.2 3D model desky Inverter_Collector pohled zeshora celá deska

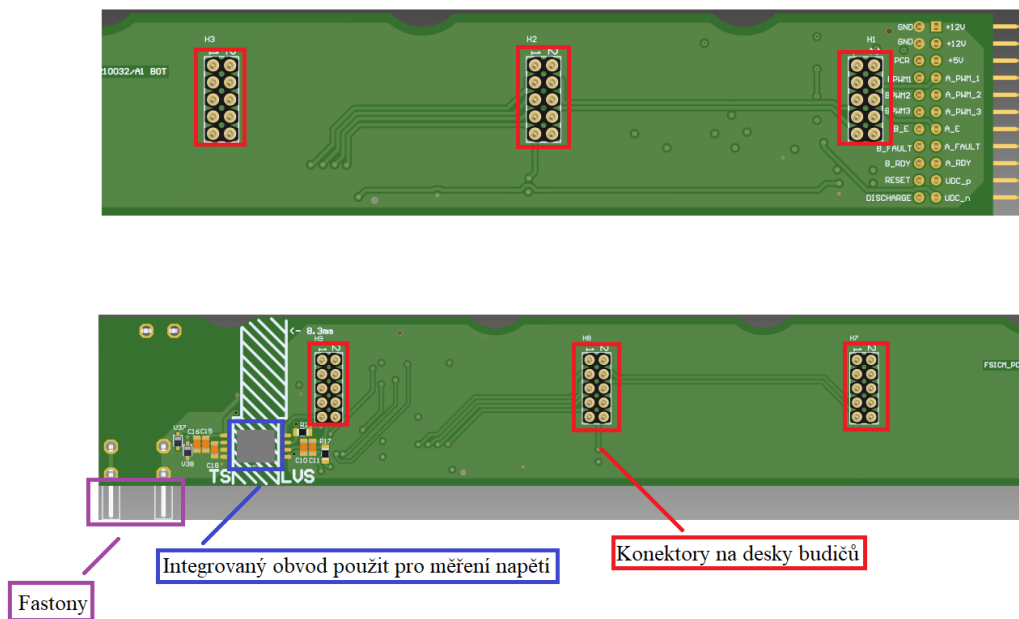
Vrchní část desky obr. 3.3 obsahuje většinu součástek a hlavní konektor do RUMMu který je pravoúhlý z důvodu umístění desky RUMMu z boční strany. Deska je také z vrchní strany řádně popsána a označena popisky pro usnadnění výroby. A jsou na ní vidět různá loga jak Západočeské univerzity, tak logo závodů formule. Piny všech konektorů na desky buďče jsou popsány z vrchní strany pro snadnější a rychlejší diagnostiku a pro zlepšení orientace na desce. Další důležitou komponentou jsou signalizační LED. Dohromady je na desce umístěno šest diod. Dvě z nich slouží pro signalizaci napájení +5 a +12 voltů. Zbylé čtyři slouží pro signalizaci signálů *Ready_all* a *Fault_all* prvního i druhého měniče. Jejich umístění je vždy u prostředního konektoru desky daného měniče. Všechny LED jsou opět řádně popsány přímo na desce. Pokud se zaměříme na oblast kolem bezpečnostní bariéry, tak můžeme vidět, že je oblast vyšrafovaná a nachází se na ní optron a IO na galvanické oddělení napájení +5 V. Je snaha o dodržení minimální vzdálenosti 4mm mezi částí TS a LVS. Dodržet tuto vzdálenost se daří pouze na v části bariéry kde je vzdálenost 5,2 mm. Z důvodu blízkosti padů u IO galvanického oddělení se nedaří tuto vzdálenost dodržet. V pravidlech formule [1] se nachází výjimka, že pokud se jedná o IO s vlastní vnitřní izolační bariérou, tak pravidlo nemusí být dodrženo, protože je daná součástka sestrojena tímto způsobem od výrobce a nelze tuto vzdálenost nijak zvětšit. Pod oběma IO bude provedeno opět frézování pro vyšší bezpečnost a zároveň bude deska celá lakovaná, jak je zmíněno výše. Na desce jsou umístěny zvětšené díry pro umístění pinů. Tyto díry jsou připojeny na zem a slouží pro lepší manipulaci při použití měřicích přístrojů. Těchto děr se zde nachází několik a jsou vždy umístěny v blízkosti ostatních součástek.

Ve vysokonapěťové části se nachází odporová kaskáda z měřicího obvodu. Je zde dodržovaná pracovní vzdálenost 3 mm mezi fastony rozdílné polarity. Fastony jsou zde tři. Dva vedoucí na +DC a -DC a jeden vedoucí na druhý pin vybíjecího rezistoru. Vybíjecí rezistor je umístěn mimo desku z boku chladiče mezi vývody chladičí kapaliny. Mezi fastonem vedoucím na rezistor a fastonem na +DC je umístěna robustní blokovácí dioda. Fastony jsou umístěny tak, aby vzdálenosti drátů tvořících jejich připojení byly co nejmenší.



Obr. 3.3 3D model desky Inverter_Collector pohled zeshora rozdělený

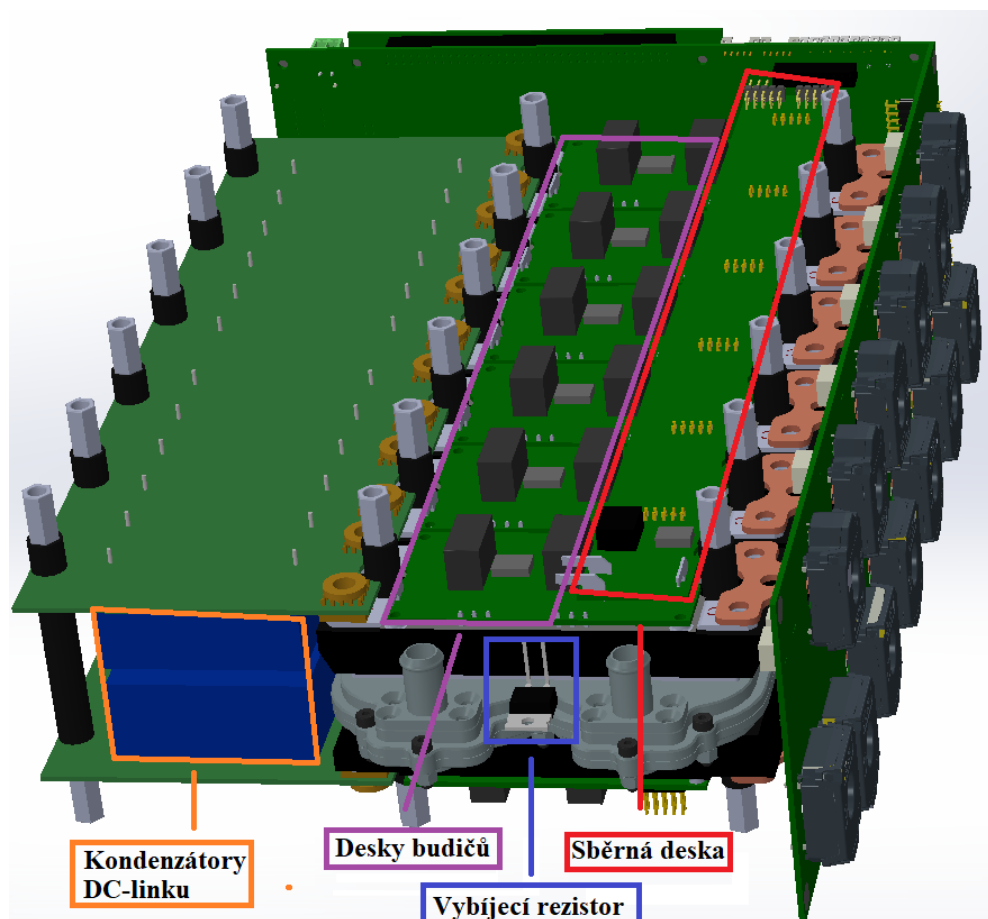
Jako hlavní komponenta spodní části desky obr. 3.4 jsou již zmíněné konektory na desce všech šesti budičů tvořících dva měniče. Deska je popsána i z této strany a to opět popisky označující části LVS a TS. Dále jsou zde popsány piny hlavního konektoru. Popsání pinů je umístěno z této strany, protože ze strany druhé na popis nezbyl prostor. Mít popsané piny konektoru je výhodné při oživování desky nebo při vyhledávání případných poruch pro urychlení orientace na desce. Z této strany se podařilo dosáhnout větší bariéry, a to na 8,3 mm. Ve vysokonapěťové části je umístěna část IO pro měření napětí. Tento obvod má opět vnitřní izolační bariéru, proto je umístěn na bariéře. Bylo nutné tuto součástku umístit z druhé strany, protože by se nevešla na bariéru strany horní. K IO byly umístěny na tuto stranu kondenzátory pro co nejbližší propojení s IO. Dále můžeme na obrázku vidět fastony z druhé strany a také pravoúhlé piny z hlavního konektoru.



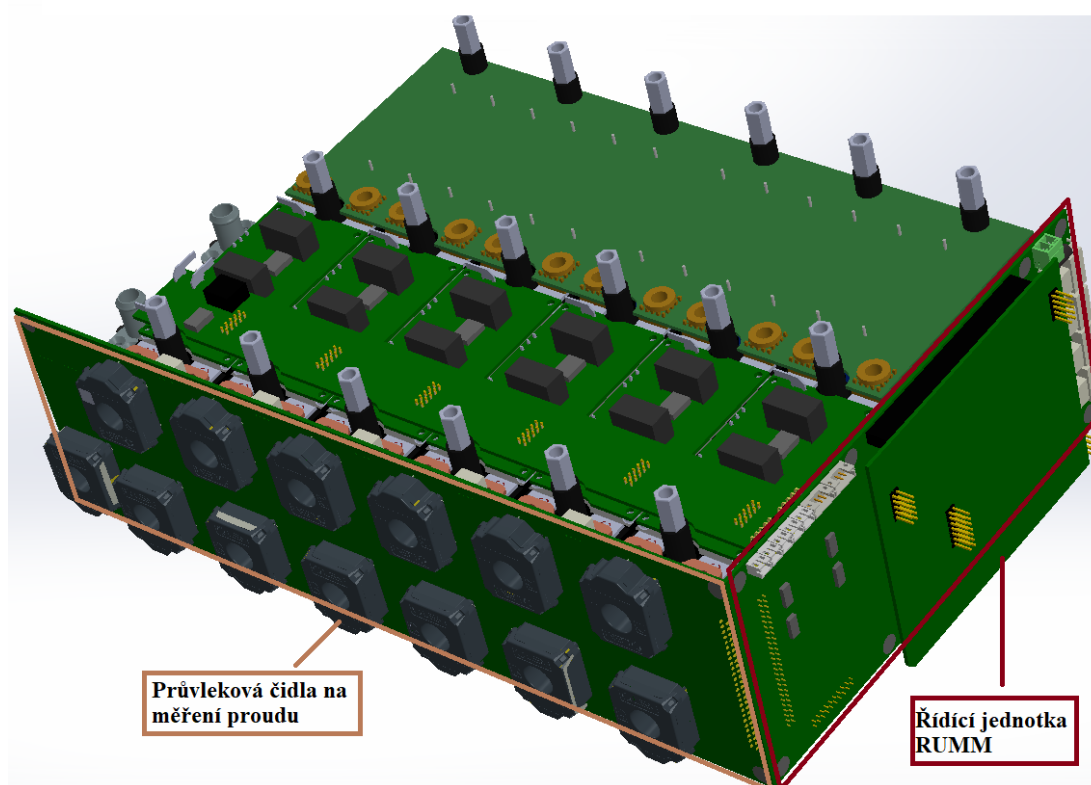
Obr. 3.4 3D model desky Inverter_Collector pohled zespoda rozdělený

3.3 Předběžný 3D model kompletního měniče a jeho periferií

Návrh chladiče a mechanických komponentů společně s návrhem řídicí jednotky RUMM je výsledkem práce kolegů z týmu elektrické formule. Tento model a veškeré jeho periferie kromě desek, které jsou předmětem této práce byly sestrojeny ostatními členy týmu formule. Dané 3D modely mnou navržených desek byly vygenerovány programem Altium. Na modelu můžeme vidět chladič, z jehož obou stran jsou umístěny výkonové moduly a na nich desky budičů. Taktéž z obou stran je umístěna na deskách budičů sběrná deska, která je k nim připojena pomocí konektorů. Tyto desky jsou dále spojeny s deskou obsahující řídicí jednotku RUMM, která je umístěna z boku chladiče. Moduly jsou přes silové šiny propojeny z jedné strany s kondenzátorem a ze strany druhé povedou do motoru. Na cestě vedoucí do motoru můžeme vidět použití průvlakového čidla na měření proudu. Moduly jsou spojeny s chladičem pomocí závitových tyčí, které vedou skrz chladič a propojují vždy dva protější moduly ve dvou bodech. Na boku chladiče, kde se nachází otvory pro přívod a odvod chladiva, můžeme vidět umístění rezistoru na vybíjení DC-linku. Tato sestava bude po sestavení umístěna v pouzdře, které bude ještě potřeba navrhnout a sestrojit.



Obr. 3.5 3D model hotové sestavy měničů pohled shora



Obr. 3.6 3D model hotové sestavy měničů pohled z boku

4 Příprava dokumentace pro výrobu desky

Výrobu desek bude zajišťovat externí specializovaná firma. Pro úspěšnou výrobu desky je potřeba doložit výrobcí patřičné soubory a dokumenty. Existuje několik typů souborů vhodných pro předání informace o postupu výroby desky. Nejznámější z nich jsou GERBERy a ODB++. Soubory GERBER obsahují podobu filmu vrstev desky určenou pro zadání do fotoplotru. Každá vrstva je vždy jeden GERBER soubor, tudíž těchto souborů musí být pro tuto desku vygenerováno několik. Vnitřní podoba gerberu, se skládá z instrukcí, které obsahují souřadnice, určené přímo pro nahrání do fotoplotru. Fotoplotr tato data načte a vytvoří film dané vrstvy. GERBER soubory nejsou vizuální podobou desky, ale jsou spíše už přímo výrobními instrukcemi pro používané výrobní zařízení. Naopak soubory ODB++ oproti souborům GERBER obsahují kompletní údaje o desce jako je geometrie, názvy spojů, sestavení vrstev, vrtací data, použité součástky a spoustu dalších. Je několikanásobně komplexnější a je spolu se soubory GERBER akceptovatelný většinou firem, zabývajících se výrobou desek plošných spojů. Pro výrobu této desky budeme generovat oba typy souborů opět pomocí programu Altium designer. [15]

Dalším důležitým dokumentem pro výrobu desky je BOM neboli bill of materials. BOM je kompletní soupis součástek k nákupu. Za použití knihoven součástek RICE je možné pomocí Altia automaticky vygenerovat soupis součástek v podobě tabulky, díky kterému se dají součástky následně objednat u výrobce. BOM kromě názvu součástky a objednávacího čísla obsahuje spoustu dalších důležitých informací. Dále se z BOMu dozvíme výrobce součástky, značení součástky ve schématu, hodnotu parametru součástky, množství, které je nutné objednat a výsledného dodavatele součástky a její číslo v katalogu dodavatele.

Všechny potřebné soubory jsou umístěny v přílohách této práce a jsou připraveny pro použití. Vizuální zobrazení gerberů bylo provedeno pomocí webové aplikace [12] a je umístěno v přílohách 8-A a 8-B. Vygenerovaný BOM nalezneme v přílohách 8-C a 8-D. Dokumenty postačí nejprve k zadání výroby desky a objednání potřebných součástek. Materiál desky bude FR4 o tloušťce 1,55 mm, deska bude obsahovat 4 vrstvy, každou o tloušťce 35 μm . Rozměry sběrné desky budou délka 300 mm a šířka 30 mm. Rozměry desky budiče budou délka 84 mm a šířka 46 mm. U výrobce bude navíc zadán požadavek k vyrobení nerezové šablony na pájecí pastu pro desky budičů, protože jich dohromady bude

12 kusů. Po tom co bude deska vyrobena a součástky dorazí, bude deska osazena a zapájena přímo na univerzitě pomocí ručního osazovacího manipulátoru a pájecí pece.

5 Návrh postupu ožívování a měření parametrů desek

Při ožívování desek budeme postupovat postupně pomocí daných bodů. Ke správnému oživení, při kterém je nejmenší šance k poškození desky, je nutné dodržet tyto body ve správném pořadí. Ožívování musí být provedeno pro každou desku zvlášť a postup oživení desky budičů a sběrné desky se v určitých bodech liší. Řádné oživení desky je důležité z důvodu možného výskytu různého typu chyb, které mohou desku nebo její komponenty snadno poškodit. Chyby mohou být způsobeny špatným návrhem desky, vadou konkrétních součástek, špatnou výrobou desky, chybným osazením desky, nedostatkem nebo přebytkem pájecí pasty, případně nesprávným vstupním signálem.

5.1 Body postupu ožívování desky

- **Vizuální kontrola zkratů a studených spojů**

Po sestrojení je nutné jako první provést vizuální kontrolu všech cest a spojů. Bude provedena kontrola, zda výrobní chybou nedošlo k nežádoucímu propojení vodivých cest. Další důležitá vizuální kontrola je kontrola správně zapájených součástek, jestli se někde nevyskytuje studený spoj. Jedním z prvních ukazatelů správného zapájení je lesklost cínu.

- **Otestování napájení a jejich LED**

Po vizuální kontrole je nutné otestovat přídavné zdroje umístěné na deskách, zda fungují správně. Dále otestujeme externí zdroje napětí, které budou propojené přes konektory a reakci LED určených na signalizaci napájení na sběrné desce.

- **Připojení desky budiče na zdroj s omezovačem proudu**

Deska budiče je připojena na zdroj, který je schopný omezení proudu, aby se předešlo zničení desky. Po připojení desky sledujeme, jestli se proud ustálí na předpokládané hodnotě.

- **Ověření funkčnosti budiče**

Po připojení napájení s omezovačem je nutné otestovat správnou funkci budiče a ověřit výstupní napěťové úrovně aby nepřekročily hodnoty udávané v datasheetu tranzistoru [7], aby nedošlo ke zničení tranzistoru. Pro simulaci tranzistoru připojíme k budiči kondenzátor a sledujeme, jestli budič funguje správně nastavováním různých spínacích frekvencí a kontrolováním průběhů pomocí osciloskopu. Také je stále nutné sledovat zdroj, jestli se nepříznivě nezvyšuje

proud.

- **Připojení výkonového modulu k desce budiče**

Po úspěšném provedení předchozích bodů může být připojen k budičům výkonový modul. Je nutné opět provést ty samé zkoušky a jako při testování samotného budiče.

- **Kontrola teplot desky budiče a výkonového modulu termo kamerou**

Dále je nutné desku zkontrolovat z teplotního hlediska. Pomocí termokamery je sledována teplota desky při zvyšující se spínací frekvenci. Při tomto sledování by neměla být překročena maximální očekávaná teplota, která činí 60 °C při okolní teplotě 25 °C.

- **Ověření funkčnosti desaturační ochrany**

Desaturační ochrana je důležitou součástí obvodu. Její funkčnost musíme ověřit. Desaturační ochrana je pouze její název převzatý z používání v obvodech s IGBT, v našem případě se spíše jedná o ochranu nadproudu. Pro její ověření je nutné nasimulovat špatně sepnutý tranzistor a ochrana by měla zareagovat.

- **Kontrola funkčnosti sběrné desky**

Další na řadě je ověření správné funkce sběrné desky. Zkontrolováno bude, jestli jsou všechny signály ve správném pořadí na všech konektorech. Je také nutno ověřit správnou funkci obvodů na spojování a ochran signálů.

- **Spojení sběrné desky s deskami budičů a kontrola funkčnosti**

Nyní je možné propojit desky budičů se sběrnou deskou a zkontrolovat, zda signál doputoval kam má od hlavního konektoru až po každou z desek budičů. Po kontrole signálů bude zkontrolována vzájemná funkčnost obou desek ovládním měničů přes připojenou řídicí jednotku RUMM.

- **Ověřit funkčnost světelné signalizace**

Signál spojující obvod je opatřen světelnými diodami pro rychlejší a přehlednější diagnostiku. Je potřeba ověřit fungování těchto diod a tím zároveň i logiku pro spojování a oddělování signálů.

- **Změřit očekávané hodnoty na deskách**

Po všech úspěšně provedených kontrolách v obvodech je vhodné ještě ověřit různé doporučené a očekávané hodnoty proudu a napětí v různých částech desky. Po tomto ověření je deska téměř připravena.

- **Ověření funkce měřicího obvodu**

Dále bude ověřeno fungování měřicího obvodu DC-linku, jestli jeho výstupní hodnoty odpovídají měřenému napětí. Při uvedení měničů do provozu bude provedena přesná kalibrace tohoto měřicího obvodu.

- **Zkouška optronu v obvodu vybíjení**

Jako poslední bude provedena zkouška vybíjecí obvodu. Místo připojení rezistoru bude spínání tohoto obvodu otestováno pomocí měřicího přístroje

6 Závěr

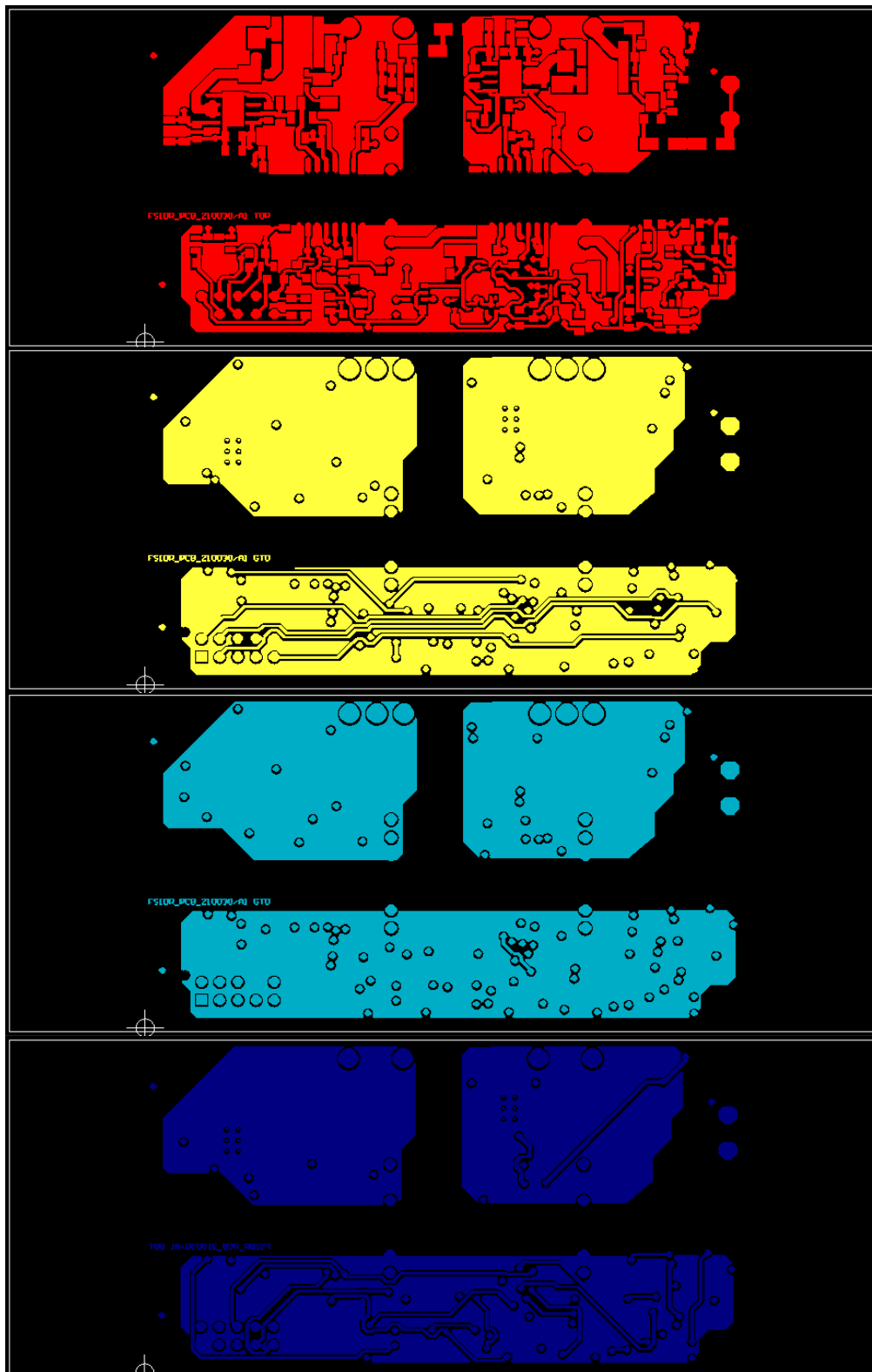
Tato bakalářská práce podává kompletní návrh schémat a desek plošných spojů určených pro konstrukci výkonové části měniče. Základem návrhu jsou dva typy desky. Deska budičů, která bude připevněna na hlavní výkonový modul měniče a vyrobena dohromady 12x. A sběrná deska sloužící pro propojení desek budičů. Každá sběrná deska bude spojovat šest desek budičů, takže bude vyrobena 2x. Práce obsahuje výběr a popis základních komponent použitých při následném návrhu. Schémata a desky jsou v práci řádně popsány a jednotlivá rozhodnutí při jejich návrhu stručně vysvětlena. Původním výsledkem práce měly být zhotovené a otestované desky. Z důvodu pandemie nebylo možné fyzicky docházet na univerzitu a zhotovení desky muselo být nahrazeno přípravou výrobních dokumentů a popsáním oživení a testování desky. Tato konstrukce a oživení desky bude provedena spolu s dalšími úpravami návrhu po odevzdání této práce v průběhu nejbližších měsíců. Je důležité zmínit, že se jedná o komplexní projekt celé formule a jeho výsledek záleží na celém týmu. Při zhotovování práce docházelo k neustálým změnám podoby celého segmentu měniče a tím pádem ke změně podoby návrhu tvořeného v této práci. Změny byly navrhovány při konzultacích s ostatními členy týmu formule. Těmito změnami se optimalizovala činnost i podoba výsledného segmentu měničů, na kterém též pracovalo několik členů z týmu formule. Z tohoto důvodu bylo při práci nutné stavět návrh desek na návrzích komponent od ostatních členů. Spolupráce a konzultace řešení byla nedílnou součástí ve výsledku úspěšného návrhu. Jako hlavní změna návrhu bylo rozdělení budičů zvlášť a spojení dvou měničů pomocí jedné sběrné desky. Rozdělením obvodů budičů zvlášť na každý modul byla zaručena rychlá a snadná opravitelnost měniče kde stačí pouze odpojit chybný modul s deskou a připojit jiný. Podařilo se vytvořit systém s určitou univerzálností a přesto se zachováním kompaktnosti, bezpečnosti a účinné funkčnosti pro ovládání motorů formule za použití řídicí jednotky.

7 Seznam literatury a informačních zdrojů

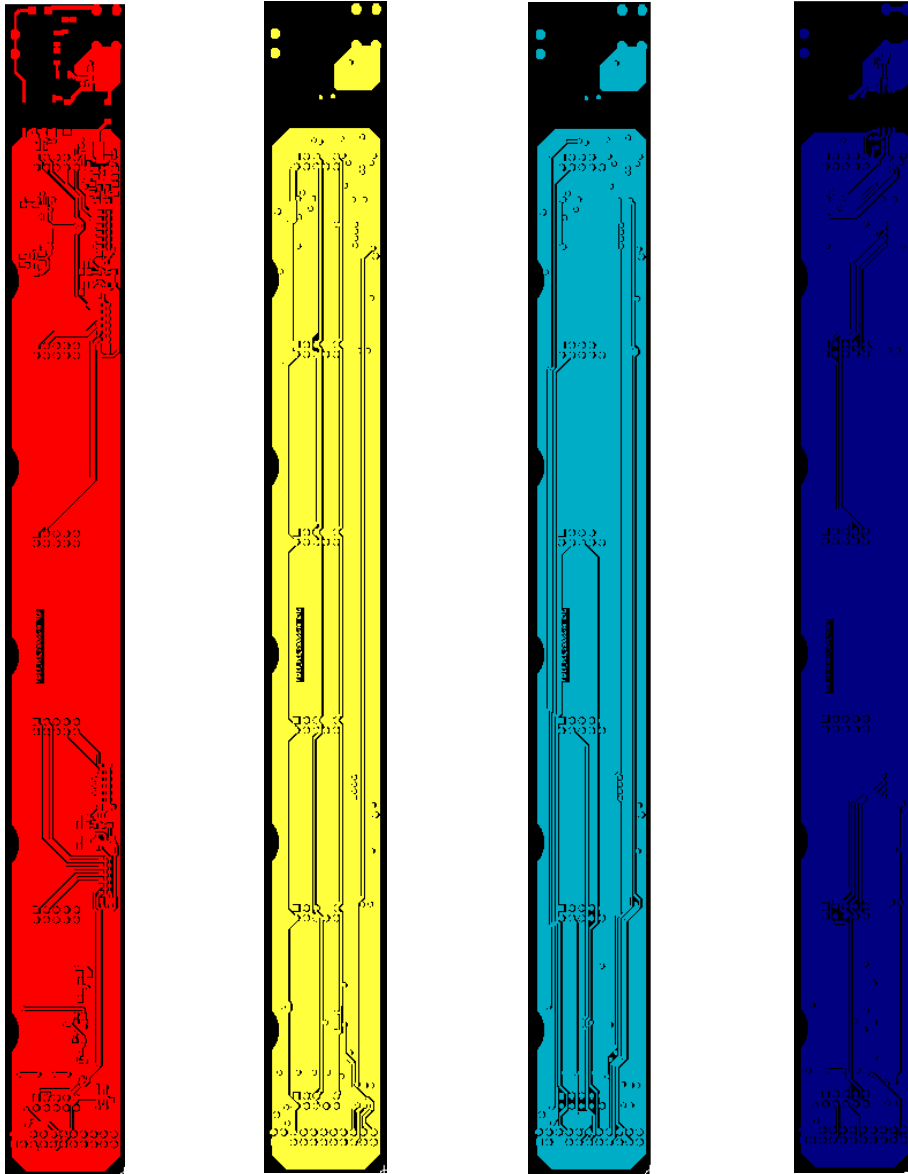
- [1] Formula Student Rules Germany, [cit. 2021-5-26] https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf.
- [2] Z. Kehl, T. Glasberger and L. Streit, "Design of universal H-bridge converter for cascaded multilevel topologies", 2021 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, 2021, pp. 1-4. [cit. 2021-5-26]
- [3] AMK racing KIT „Formula Student Electric“. [cit. 2021-5-26]. https://amk-group.com/amk-dokucd/dokucd/FSE/en/content/resources/pdf-dateien/pdk_205481_kw26-s5-fse-4q_kw-r06_en_.pdf. [cit. 2021-5-26]
- [4] Západočeská univerzita v Plzni, UWB Racing Team [cit. 2021-5-26] <http://uwbracing.cz/sezona-2019/>
- [5] SCHMID, Prokop. Trakční měnič pro projekt studentské elektroformule. Plzeň, 2019. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jan Štěpánek. [cit. 2021-5-18]
- [6] KRÝSL, Pavel. Konstrukce trakčního střídače. Plzeň, 2020. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Luboš Streit. [cit. 2021-5-20]
- [7] Firma ROHM, Datasheet výkonového modulu BSM120D12P2C005. [cit. 2021-5-18] https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/power_module/bsm120d12p2c005-e.pdf
- [8] Firma TDK, Datasheet kondenzátoru B32778J8806K000. [cit. 2021-5-18] https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/capacitor/film/mkp_mfp/data_sheet/20/20/db/fc_2009/mkp_b32774_778.pdf
- [9] Firma IXYS, Datasheet optronu PLB171. [cit. 2021-5-24] <https://www.tme.eu/Document/8cacc864854009ab29b053c00e841710/PLB171.pdf>
- [10] Firma Texas Instrumenst, Datasheet integrovaného obvodu na měření AMC1311B. [cit. 2021-5-24] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1311.pdf?ts=1622970735220&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAMC1311
- [11] Firma Fisher, Datasheet motoru s permanentními magnety TI085-052-070-04B7S-07S04BE2. [cit. 2021-5-28] https://riceproject.fel.zcu.cz/svn/projects/2019_FormuleStudentElectric/15_Supporting_materials/Motors/Fischer/Datenblatt%20TI085-052-070-04B7S-07S04BE2.pdf
- [12] Online gerber viewer. Gerber-viewer [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.gerber-viewer.com>
- [13] Falstad. Falstad [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.falstad.com>
- [14] Circuit diagram maker. Circuit-diagram [online]. [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: <https://www.circuit-diagram.org>
- [15] KLAUZ, Milan. Gerber data bez tajemství. DPS elektronika od A do Z [online]. 2013 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/cad-cam-cae/id:3068/gerber-data-bez-tajemstvi>

8 Přílohy

Příloha A: GERBER desky budiče všechny vrstvy



Příloha B: GERBER sběrné desky všechny vrstvy



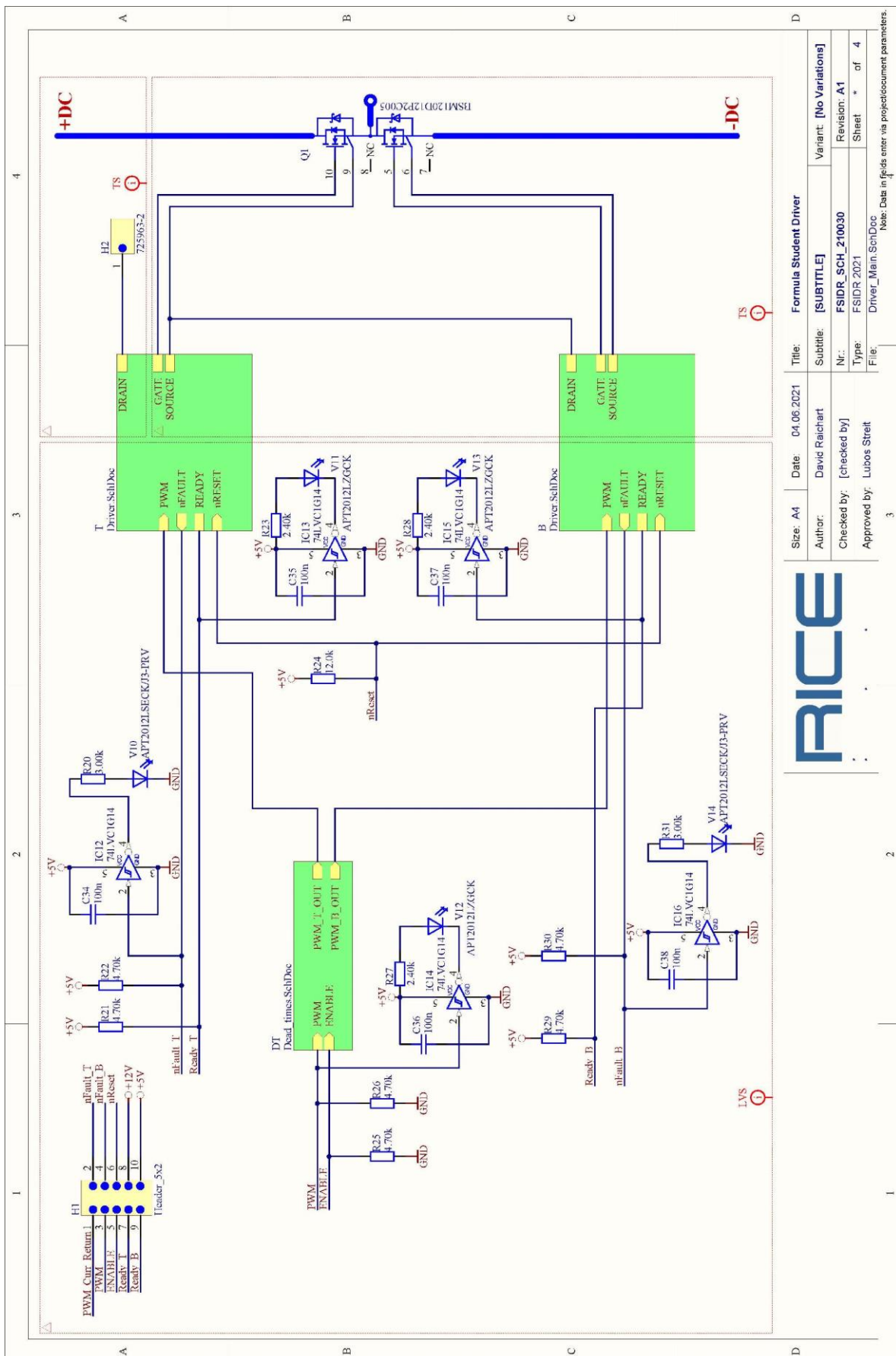
Příloha C: BOM desky budiče

Číslo součástky	Popis součástky	Značení	Výrobce	Výrobní číslo	Hodnota
CAP_000159	CAP CER 100p 16V X7R 10% 0805	C1, C4, C17.B, C17.T, C18.B, C18.T	AVX	0805YC101KAT2A	100p
CAP_000197	CAP CER 220p 50V X7R 10% 0805	C2, C7, C15.B, C15.T, C16.B, C16.T	AVX	0805C221KAT2A	220p
CAP_000228	CAP CER 100n 50V X7R 10% 0805	C3, C5, C6, C8, C9, C10, C11, C12, C14.B, C14.T, C19.B, C19.T, C24.B, C24.T, C26.B, C26.T, C30.B, C30.T, C34, C35, C36, C37, C38	AVX	0805C104KAT2A	100n
CAP_000409	CAP CER 10u 35V X7R 10% 1206	C21.B, C21.T, C22.B, C22.T, C23.B, C23.T, C28.B, C28.T, C29.B, C29.T, C32.B, C32.T, C33.B, C33.T	Taiyo Yuden	GMK316AB7106KL-TR	10.0u
CON_000013	CON 5x2pin header 100mill 5,4mm	H1	Fischer Elektronik	SL2211210G	Header_5x2
DIO_000005	DIO Si 75V 200mA 6ns	V1.B, V1.T	Micro Commercial Components Corp.	BAS16WX	BAS16WX
DIO_000007	DIO Schottky 40V 2A SMP (DO-220A)	V8.B, V8.T, V9.B, V9.T	Vishay	SS2P4-M3/84A	SS2P4
DIO_000029	DIO Si 1200V 1A 75ns SMA	V6.B, V6.T, V7.B, V7.T	ST Microelectronics	STTH112A	STTH112A
DIO_000039	DIO schottky 30V 0,2A trr 5ns	V4.B, V4.T	Micro Commercial Components Corp.	BAT54WX-TP	BAT54WX
ICS_000024	ICS single gate AND	IC3, IC6	ST Microelectronics	74LX1G08CTR	74LX1G08
ICS_000103	ICS schmitt inverter, single gate	IC12, IC13, IC14, IC15, IC16	Texas Instruments	74LVC1G14DBVR	74LVC1G14
ICS_000412	Dual Schmitt Trigger Buffer, SOT23-6	IC1	Texas Instruments	SN74LVC2G17DBVR	SN74LVC2G17
ICS_000476	ICS 9 Amp Low-Side Ultrafast MOSFET / IGBT DriverDriver	IC10.B, IC10.T	IXYS Semiconductor GmbH	IXDN609SI	IXDN609SI
ICS_000542	ICS single inverter	IC7	Texas Instruments	SN74LVC1G04DCKR	74LVC1G04
ICS_000867	ICS driver 1ch 2.5/5A SSOP16wide	IC9.B, IC9.T	Texas Instruments	ISO5852SMDWREP	ISO5852S-EP
ICS_001093	ICS DC/DC converter, Vin 12V, Vout 18V/-2.5V, 2W, 200kV/us, 5.2kV	IC11.B, IC11.T	Murata	MGJ2D121802SC	MGJ2D121802S C
IND_000091	IND 22UH 510mA 450 MOHM SMD, shielded 3.8x3.8x1.65mm	L1.B, L1.T	Würth Elektronik	744031220	22u
OPT_000084	OPT LED red, 2mA, 40mcd	V10, V14	kingbright	APT2012LSECK/J3-PRV	APT2012LSECK/J3-PRV
OPT_000085	OPT LED green, 2mA, 50mcd	V11, V12, V13	kingbright	APT2012LZGCK	APT2012LZGCK
PDV_000051	TVS 5,0V 400W BiDir SMA	V3.B, V3.T	ST Microelectronics	SMAJ5.0CA-TR	SMAJ5.0CA-TR
PDV_000172	TVS 18V 400W 5% BiDir	V2.B, V2.T	Bourns Inc.	SMAJ18CA	SMAJ18CA
RES_000170	RES 0805 0.00R 1% 100ppm SMD thick film	R8.B, R8.T, R10.B, R10.T, R11.B, R11.T	Panasonic	ERJ6ENFOR00V	0.00
RES_000195	RES 0805 10.0R 1% 100ppm SMD thick film	R5.B, R5.T	Panasonic	ERJ6ENF10R0V	10.0
RES_000219	RES 0805 100R 1% 100ppm SMD thick film	R1, R2	Panasonic	ERJ6ENF1000V	100
RES_000243	RES 0805 1.00k 1% 100ppm SMD thick film	R9.B, R9.T	Panasonic	ERJ6ENF1001V	1.00k
RES_000252	RES 0805 2.40k 1% 100ppm SMD thick film	R23, R27, R28	Panasonic	ERJ6ENF2401V	2.40k
RES_000254	RES 0805 3.00k 1% 100ppm SMD thick film	R20, R31	Panasonic	ERJ6ENF3001V	3.00k
RES_000258	RES 0805 4.30k 1% 100ppm SMD thick film	R3, R4	Panasonic	ERJ6ENF4301V	4.30k
RES_000259	RES 0805 4.70k 1% 100ppm SMD thick film	R21, R22, R25, R26, R29, R30	Panasonic	ERJ6ENF4701V	4.70k
RES_000267	RES 0805 10.0k 1% 100ppm SMD thick film	R6.B, R6.T	Panasonic	ERJ6ENF1002V	10.0k
RES_000269	RES 0805 12.0k 1% 100ppm SMD thick film	R24	Panasonic	ERJ6ENF1202V	12.0k
RES_000315	RES 0805 1.00M 1% 100ppm SMD thick film	R7.B, R7.T	Panasonic	ERJ6ENF1004V	1.00M
RES_000642	RES 2512 4.02R OHM 1.5W 1% SMD, Pulse Proof	R15.B, R15.T, R19.B, R19.T	Vishay	CRCW25124R02FKEGHP	4.02
RES_000753	RES 1206 20.00R 1% 100ppm SMD thick film Pulse Proof	R13.B, R13.T, R16.B, R16.T	Vishay	CRCW120620R0FKEAHP	20.0
CON_000539	CON Faston 2,8mm right angle	H2	TE connectivity	725963-2	725963-2
DIO_000126	DIO Diode Zener 12V 200mW SOD323	V5.B, V5.T	DIODES incorporated	BAT54WS_7-F	MMSZ5242BS
ICS_000864	ICS Multiple function gate	IC2, IC4, IC5, IC8	Texas Instruments	SN74LVC1G98DCKR	SN74LVC1G98
PWR_000032	PWR SiC Mosfet Halfbridge 1200V 120A	Q1	Rohm	BSM120D12P2C005	BSM120D12P2C005
CAP_000439	CAP CER 4.7u 35V X7R 10% 125°C 0805	C13.B, C13.T, C20.B, C20.T, C25.B, C25.T, C27.B, C27.T, C31.B, C31.T	TDK Corporation	C2012X7R1V475K125AC	4.7u

Příloha D: BOM Sběrné desky

Číslo součástky	Popis součástky	Značení	Výrobce	Výrobní číslo	Hodnota
CAP_000046	CAP CER 100p 100V COG 5% 0805	C17	TDK Corporation	C2012COG2A101J	100p
CAP_000059	CAP CER 1.00n 50V COG 5% 0805	C12, C19	TDK Corporation	C2012COG1H102J	1.00n
CAP_000060	CAP CER 1.20n 50V COG 5% 0805	C9, C22	TDK Corporation	C2012COG1H122J	1.20n
CAP_000071	CAP CER 10.0n 50V COG 5% 0805	C18	TDK Corporation	C2012COG1H103J	10.0n
CAP_000175	CAP CER 10.0n 16V X7R 10% 0805	C13, C20	AVX	0805YC103KAT2A	10.0n
CAP_000228	CAP CER 100n 50V X7R 10% 0805	C1, C2, C3, C4, C5, C10, C14, C16, C21	AVX	0805SC104KAT2A	100n
CAP_000370	CAP CER 2.2UF 16V X7R 10% 0805	C15	TDK Corporation	C2012X7R1C225K	2.20u
CAP_000409	CAP CER 10u 35V X7R 10% 1206	C6, C8, C23, C24	Taiyo Yuden	GMK316AB7106KL-TR	10.0u
CAP_000531	CAP CER 1.0UF 25V X7R 10% 0805	C7, C11	Yageo	CC0805KF7R8BB105	1.00u
CON_000384	CON Receptacle 2x5, pitch 100mil, height 7 mm, Fischer BL6 025	H1, H2, H3, H7, H8, H9	Fischer Elektronik	BL 6 025 10	BL 6 025 10
CON_000540	CON 11x2pin header 100mill 8,2mm, selective gold, right angle	H6	Fischer Elektronik	SL 19 082 22 S	Header_11x2_R
EMI_000011	EMI 0603 220R/ 100MHz 1400mA 0,1R	L1, L2	Murata	BLM18PG221SN1D	220R
ICS_000103	ICS schmitt inverter, single gate	IC2, IC3, IC4, IC5	Texas Instruments	74LVC1G14DBVR	74LVC1G14
ICS_000412	Dual Schmitt Trigger Buffer, SOT23-6	IC1	Texas Instruments	SN74LVC2G17DBVR	SN74LVC2G17
ICS_000915	ICS reinf. iisoamplifier 0-2V gain=1 SSOP8 wide	IC7	Texas Instruments	AMC1311BDWVR	AMC1311B
ICS_000926	ICS charge-pump voltage inverter, out -5V @ 100 mA	IC6	Analog Devices	LTC1983ES6-5#TRMPBF	LTC1983ES6-5
ICS_000939	ICS fully differential opamp Rail to Rail	IC8	Linear Technology	LTC1992HMS8#PBF	LTC1992
ICS_000973	DC/DC-Converter, 1 Watt 5V to 5V/200mA 3kV	IC9	RECOM	R1SE-0505/H2-R	R1SE-0505/H2-R
IND_000091	IND 22UH 510mA 450 MOHM SMD, shielded 3.8x3.8x1.65mm	L3	Würth Elektronik	744031220	22u
OPT_000084	OPT LED red, 2mA, 40mcd	V5, V19	kingbright	APT2012LSECK/J3-PRV	APT2012LSECK/J3-PRV
OPT_000085	OPT LED green, 2mA, 50mcd	V6, V20, V31, V34	kingbright	APT2012LZGCK	APT2012LZGCK
REL_000023	Relay OptoMOS SPST-NC 550hm 800V 80mA DIL8 gull wing	Re1	IXYS Semiconductor GmbH	PLB171P	PLB171P
RES_000219	RES 0805 100R 1% 100ppm SMD thick film	R18, R24	Panasonic	ERJ6ENF1000V	100
RES_000232	RES 0805 360R 1% 100ppm SMD thick film	R12	Panasonic	ERJ6ENF3600V	360
RES_000252	RES 0805 2.40k 1% 100ppm SMD thick film	R2, R6, R11	Panasonic	ERJ6ENF2401V	2.40k
RES_000254	RES 0805 3.00k 1% 100ppm SMD thick film	R3, R7	Panasonic	ERJ6ENF3001V	3.00k
RES_000257	RES 0805 3.90k 1% 100ppm SMD thick film	R21	Panasonic	ERJ6ENF3901V	3.90k
RES_000259	RES 0805 4.70k 1% 100ppm SMD thick film	R1, R4, R5, R8, R9	Panasonic	ERJ6ENF4701V	4.70k
RES_000265	RES 0805 8.20k 1% 100ppm SMD thick film	R10	Panasonic	ERJ6ENF8201V	8.20k
RES_000267	RES 0805 10.0k 1% 100ppm SMD thick film	R17, R23	Panasonic	ERJ6ENF1002V	10.0k
RES_000281	RES 0805 39.0k 1% 100ppm SMD thick film	R15, R25	Panasonic	ERJ6ENF3902V	39.0k
RES_000447	RES 1206 27.0k 1% 100ppm SMD thick film	R22	Panasonic	ERJ8ENF2702V	27.0k
RES_000491	RES 1206 1.80M 1% 100ppm SMD thick film	R13, R14, R16, R19, R20	Panasonic	ERJ8ENF1804V	1.80M
DIO_000130	DIO Si 1000V; 1A; DO214BA	V35	Vishay	GF1M-E3/67A	GF1M-E3
CON_000539	CON Faston 2,8mm right angle	H4, H5, H10	TE connectivity	725963-2	725963-2
DIO_000090	DIO low leakage diode Ir=5nA 75V 200mA SOD323	V1, V2, V3, V4, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V21, V22, V23, V24, V25, V26, V27, V28, V29, V30, V32, V33, V36, V37, V38	NXP	BAS416	BAS416

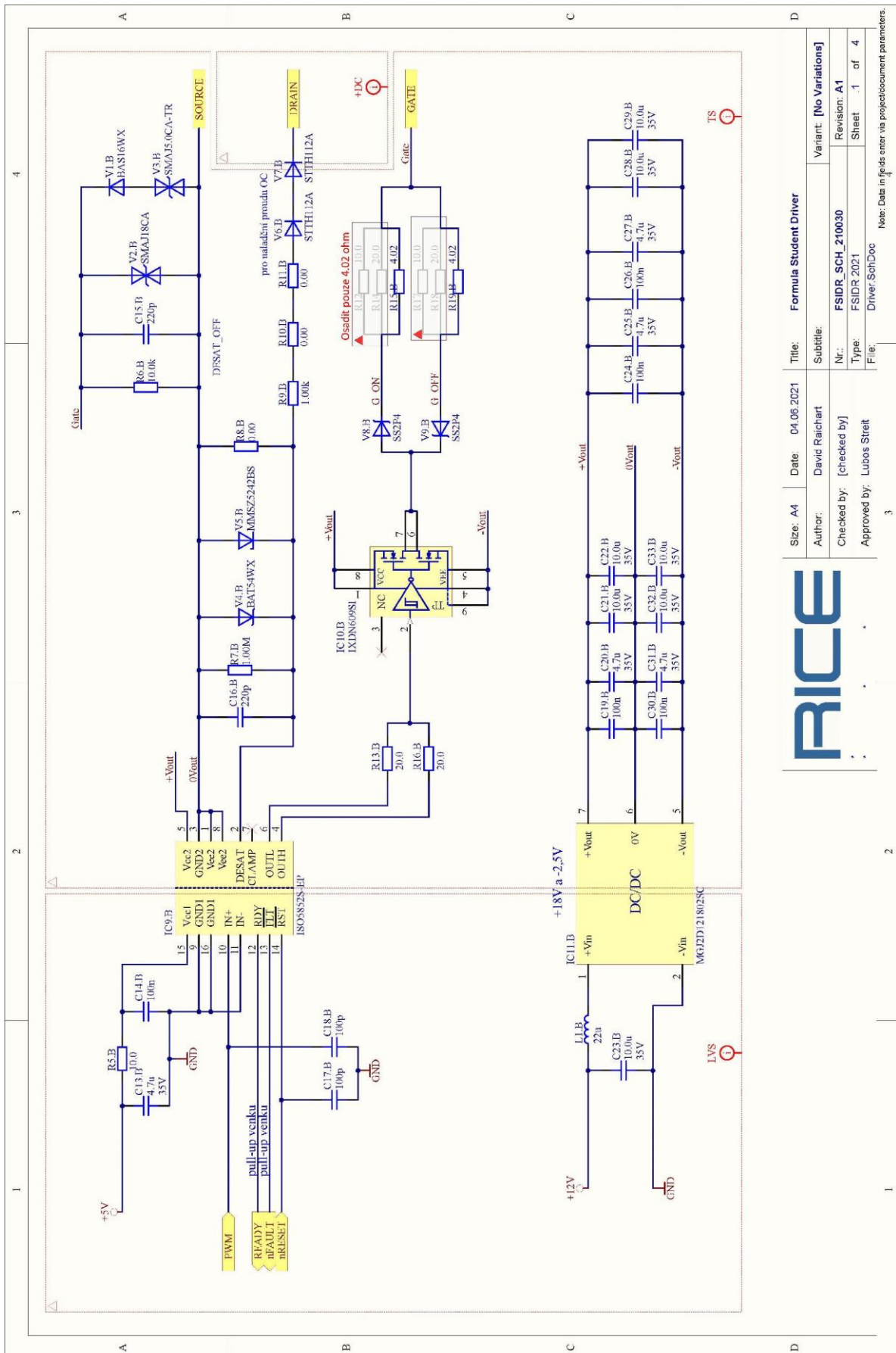
Příloha E: Hlavní schéma desky budičů



Size: A4	Date: 04.06.2021	Title: Formula Student Driver
Author: David Raichart	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: [checked by]	Nr.: FSDR_SCH_210030	Revision: A1
Approved by: Lubos Streit	Type: FSDR 2021	Sheet * of 4
	File: Driver_Main.SchDoc	Note: Data in fields enter via project/document parameters.



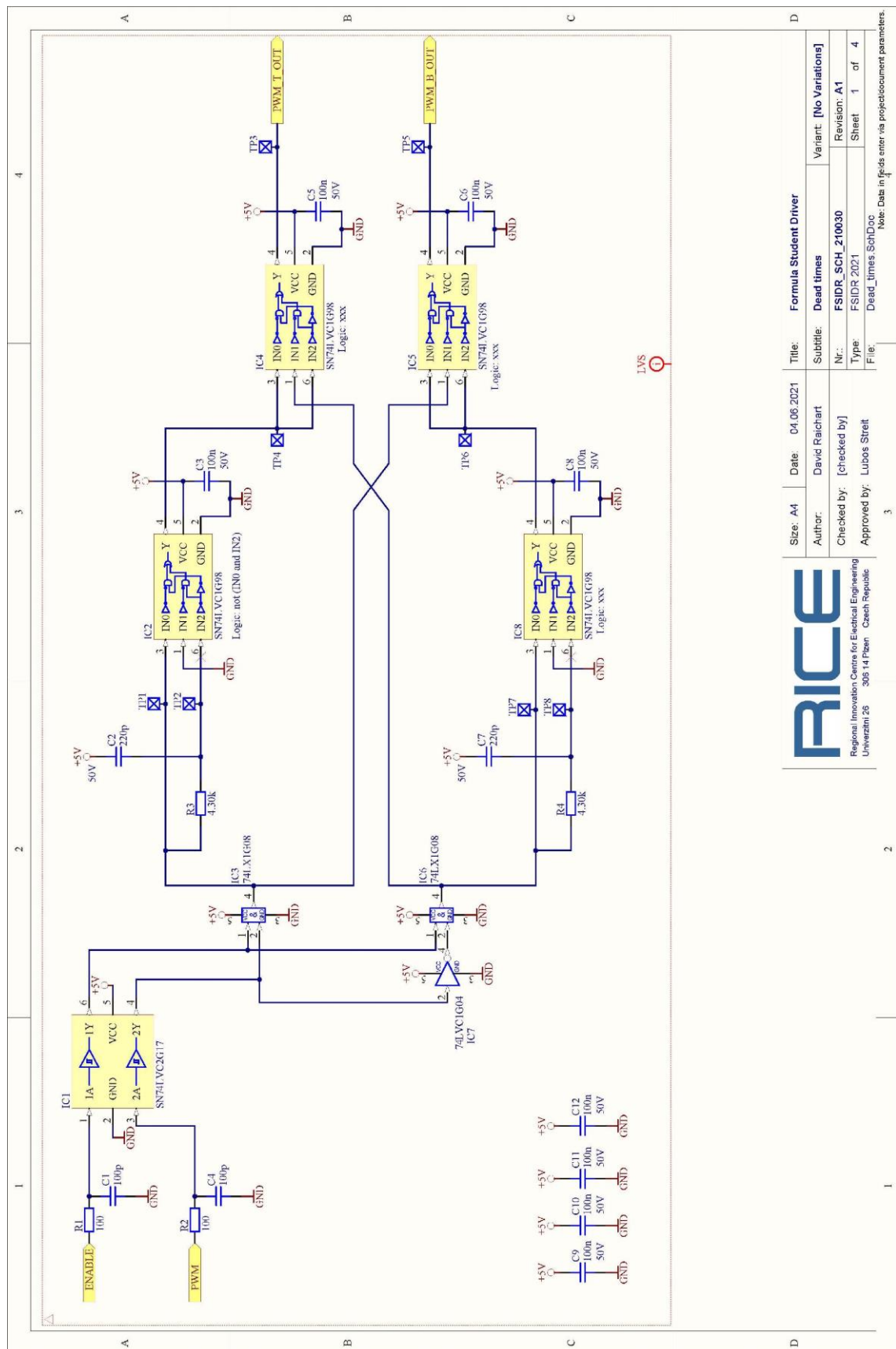
Příloha F: Schéma vlastního budiče



Size: A4	Date: 04.06.2021	Title: Formula Student Driver	Variant: [No Variations]
Author: David Raichart	SubTitle:	Nr.: FSDR_SCH_210030	Revision: A1
Checked by: [checked by]	Type: FSDR 2021	Sheet: 1	of 4
Approved by: Lubos Streit	File: Driver_SchDoc	Note: Data in fields enter via project document parameters.	



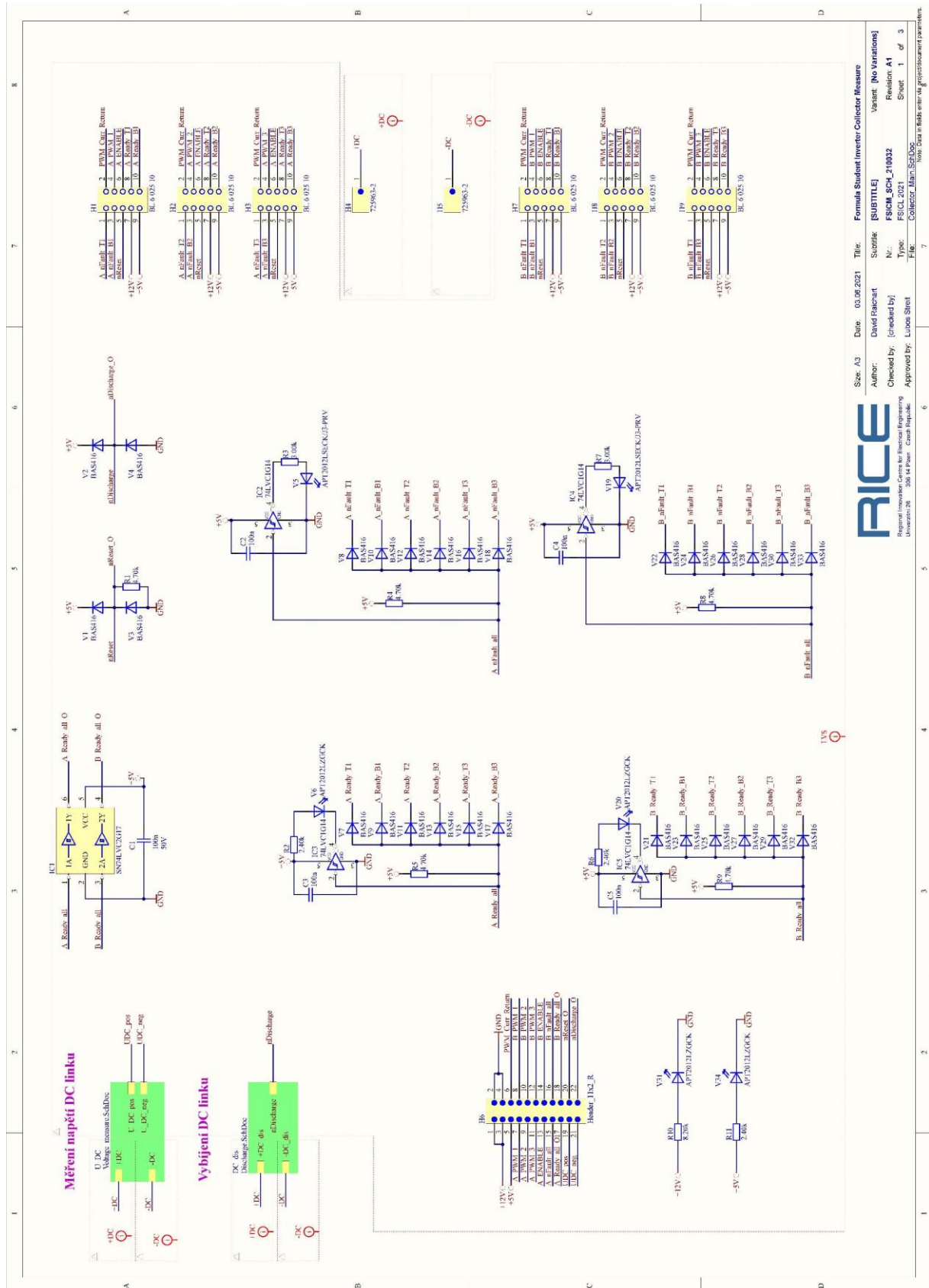
Příloha G: Schéma obvodu mrtvých časů



Size: A4	Date: 04.06.2021	Title: Formula Student Driver
Author: David Raichart	Subtitle: Dead times	Variant: [No Variations]
Checked by: [checked by]	Nr.: FSIDR_SCH_210030	Revision: A1
Approved by: Lubos Streit	Type: FSIDR 2021	Sheet 1 of 4
	File: Dead_times_SchD00	Note: Data in fields enter via projectdocument parameters.



Příloha H: Hlavní schéma sběrné desky



Formule Student Investor Collector Measure

Author: David Raichart

Checked by: [checked by]

Approved by: Lucas Street

Size: A3

Date: 03.05.2021

Title: Formule Student Investor Collector Measure

Subtitle: [SUBTITLE]

Nr.: FSCM_SCH_210032

Type: FSCM_SCH_210032

Variant: [No Variations]

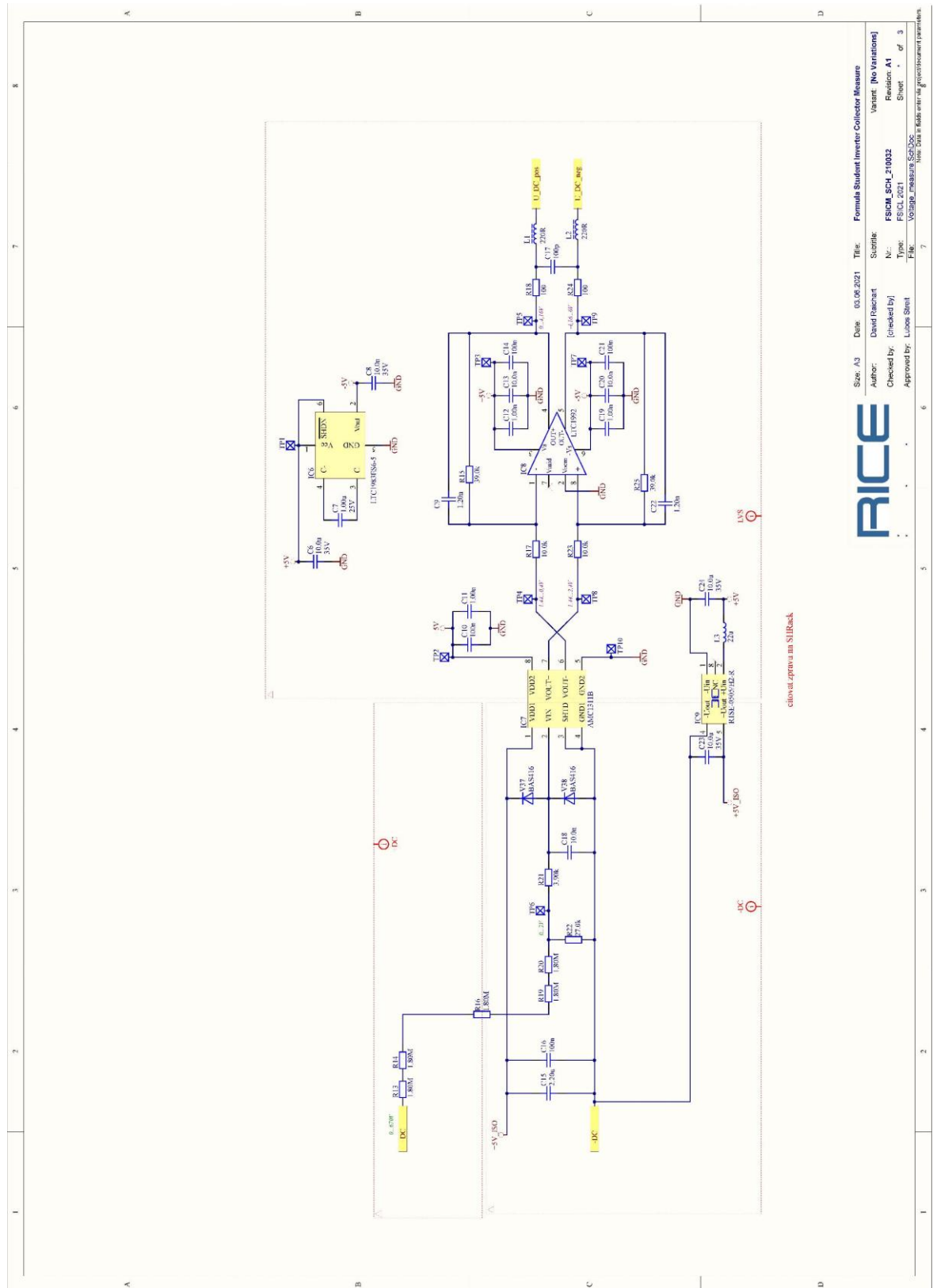
Revision: A1

Sheet: 1 of 3

File: Collector_Main_SchDoc

Note: Data in fields enter the processor/parameter parameters.

Příloha I: Schéma měření DC-linku

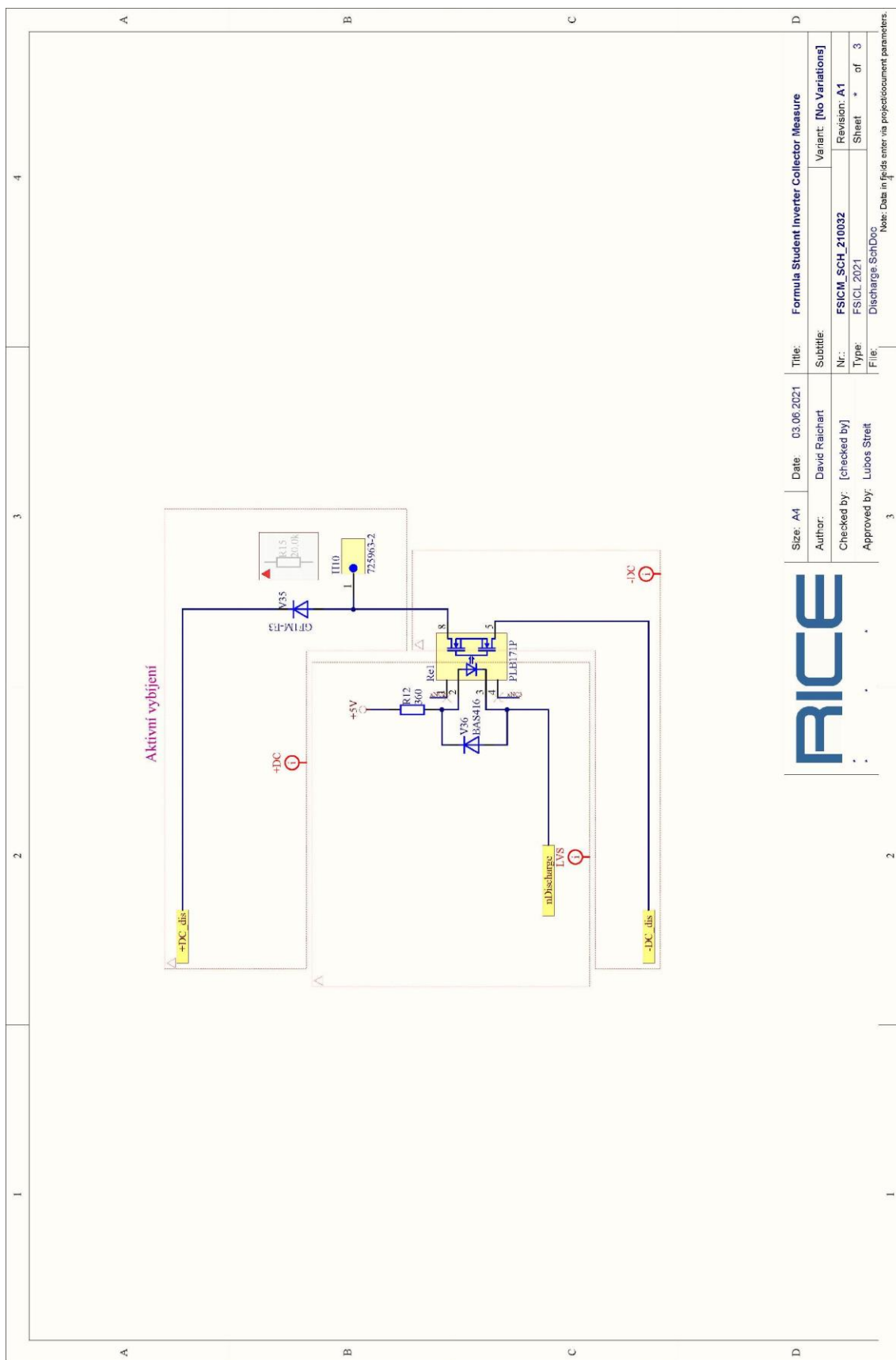


Size: A3	Date: 03.06.2021	File: Formula Student Inverter Collector Measure
Author: David Raichart	Subtitle:	Variant: [No Variations]
Checked by: [checked by]	Nr.: FSCM_SCH_210032	Revision: A1
Approved by: Lubos Strel	Type: FSCM_2021	Sheet: 3 of 3
	File: V021032_mezajir_SCH.Doc	Note: Data is false until project is measured.



obvod zprema in SHIRack

Příloha J: Schéma vybíjení DC-linku



Size: A4	Date: 03.06.2021	Title: Formula Student Inverter Collector Measure
Author: David Raichart	Checked by: [checked by]	Substitue: Variant: [No Variations]
Approved by: Lubos Streit		Nr.: FSICM_SCH_210032
		Type: FSCL.2021
		File: Discharge_SchDoc
		Sheet: * of 3

Note: Data in fields enter via projectdocument parameters.