

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Interface řídicí jednotky střídače pro eFormuli

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej BLAŽEK**
Osobní číslo: **E18B0044P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Interface řídicí jednotky střídače pro eFormuli**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Stručně popište řídicí jednotku RUMM.
2. Navrhněte obvodové řešení interfacu mezi řídicí jednotkou a silovým obvodem.
3. Navrhněte desku plošných spojů.
4. Osadte desku plošných spojů součástkami.
5. Proveďte experimentální oživení regulátoru.

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.: Osadíte desku plošných spojů součástkami

je změněn na:

4. Připravte dokumentaci pro výrobu

Bod 5.: Provedte experimentální oživení regulátoru

je změněn na:

5. Navrhněte postup oživování a měření výsledných parametrů

V Plzni dne 12.5.2021

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne

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

Student: Ondřej Blažek

V Plzni dne

**prof. Ing.
Zdeněk
Peroutka,
Ph.D.**

Digitálně podepsal
prof. Ing. Zdeněk
Peroutka, Ph.D.
Datum: 2021.05.18
14:06:40 +02'00'

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předložená práce se zabývá návrhem obvodového řešení interfacu řídicí jednotky střídače pro eFormuli. Prakticky jde o desku plošných spojů, pomocí které se propojí drivery tranzistorových modulů, snímače proudů, napětí a teplot s mikrokontrolerovým modulem RUMM. Samotný text práce je rozčleněn do několika částí; v první části se zabývá úvodními informacemi o projektu studentské formule, další část obsahuje stručný popis mikrokontrolerového modulu RUMM. Třetí část je věnována obvodovému řešení interfacu mezi řídicí jednotkou a silovým obvodem. Ve čtvrté části je popsán návrh plošného spoje interfacu. Pátá část je zaměřena na přípravu dokumentace pro výrobu a poslední část se zaměřuje na návrh postupu při ožívání regulátoru.

Klíčová slova

Interface, mikrokontrolér, střídač, řídicí jednotka, eFormule, RUMM, DPS, PWM, budič, driver, UWB

Abstract

This bachelor thesis deals the design of interface circuitry for the control unit of the inverter. Practically it is a printed circuit board which connects the drivers of transistor modules, voltage, current and temperature senzors with the microcontroller module RUMM. The thesis is divided into several parts; the first part contains basic information about the student formula project. Next part contains brief description of the microcontroller module RUMM. Third part is dedicated to the circuitry design of the interface. Fourth part describes the design of the printed circuit board. Fifth part contains manufacturing documentation and the last part describes the process of experimental testing of the controller.

Key words

Interface, microcontroller, inverter, control unit, eFormula, RUMM, PCB, PWM, driver, UWB

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 práce, je legální.



.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2021

Ondřej Blažek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Luboši Streitovi Ph.D. za odborné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomášovi Košanovi Ph.D. za navržení schématu napájecích zdrojů a Ing. Janu Štěpánkovi Ph.D. za vytvoření 3D modelu měniče.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	10
1.1 FORMULA SAE.....	10
1.2 UWB RACING PILSEN	11
2 MIKROKONTROLÉROVÝ MODUL RUMM	11
2.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O MODULU.....	11
2.2 ROZPIS PARAMETRŮ MODULU	12
2.3 NAPÁJENÍ MODULU	13
2.4 ANALOGOVÉ VSTUPY/VÝSTUPY (AD A D/A PŘEVODNÍK)	13
2.5 DIGITÁLNÍ VSTUPY/VÝSTUPY	14
2.6 PWM VÝSTUPY	14
2.7 POŽADAVKY NA MODUL, DŮVOD VÝBĚRU.....	14
3 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ INTERFACU	15
3.1 NAPÁJECÍ ZDROJE.....	16
3.2 SIGNÁLY PRO DRIVERY	16
3.3 MĚŘENÍ ANALOGOVÝCH VELIČIN	18
3.4 SÉRIOVÉ SBĚRNICE	20
3.5 BINÁRNÍ OBVODY.....	21
3.6 SIGNALIZAČNÍ LED.....	23
4 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	24
5 DOKUMENTACE PRO VÝROBU	27
6 NÁVRH POSTUPU PRO OŽIVENÍ A MĚŘENÍ	28
7 ZÁVĚR	29
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	31
PŘÍLOHY	33
PŘÍLOHA A: DPS - GERBER VRCHNÍ STRANY	33
PŘÍLOHA B: DPS - GERBER VNITŘNÍ STRANY 1	33
PŘÍLOHA C: DPS - GERBER VNITŘNÍ STRANY 2.....	34
PŘÍLOHA D: DPS - GERBER SPODNÍ STRANY	34
PŘÍLOHA E: DPS – ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK VRCHNÍ STRANY	35
PŘÍLOHA F: DPS – ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK SPODNÍ STRANY	36
PŘÍLOHA G – BOM (BILL OF MATERIALS).....	37
PŘÍLOHA H: BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ	41
PŘÍLOHA I: SCHÉMA SIGNALIZAČNÍCH LED	42
PŘÍLOHA J: SCHÉMA SBĚRNICE CAN	43
PŘÍLOHA K: SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKY RUMM.....	44
PŘÍLOHA L: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ PROUDŮ	45
PŘÍLOHA M: SCHÉMA ZAPOJENÍ BINÁRNÍCH OBVODŮ	46
PŘÍLOHA N: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ POLOH ROTORŮ A TEPLIT VINUTÍ	47
PŘÍLOHA O: SCHÉMA ZAPOJENÍ SIGNÁLŮ PRO DRIVERY	48
PŘÍLOHA P: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍCH ZDROJŮ	49

Seznam symbolů a zkratek

SAE.....	Society of Automotive Engineers
RUMM.....	Rice Universal Microcontroller Module
GND.....	GrouND (uzemnění)
RICE.....	Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
PWM.....	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
AD.....	Analog/digital converter (analogo-digitální převodník)
DA.....	Digital/analog converter (digitálně-analogový převodník)
MCU	Microcontroller (mikrokontrolér)
FPGA.....	Field-programmable gate array (programovatelné hradlové pole)
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
DSP.....	Deska plošných spojů
PCB.....	Printed circuit board
LED.....	Light emitting diode
BOM.....	Bill of materials

1 Úvod

1.1 Formula SAE

Formula SAE (známé též jako Formula Student) je mezinárodní série soutěží určená pro studentské týmy z technických univerzit napříč celým světem. Studenti v rámci tohoto projektu staví od základu monopost formulového typu, se kterým dle daných pravidel soutěží v řadě disciplín. Projekt vznikl v USA na Texasské univerzitě roku 1980. Historicky prvního závodu se v roce 1981 zúčastnily pouze čtyři univerzity z USA, v roce 2002 se účastnilo 118 týmů z osmi zemí světa. [1]V dnešní době se projekt rozrostl nejen v USA, ale také po celém světě. Postupem času vznikaly další soutěže, jako například Formula Student Japan, Formula Student Germany, nebo Formula Student Austria. Do roku 2013 se jednalo pouze o návrh formulí se spalovacími motory do maximálního obsahu 610 ccm. V roce 2013 začala soutěž Formula SAE Electric, kde studenti navrhují formule poháněné pouze elektromotory. Celkově se soutěží účastní přes 500 technických univerzit po celém světě. Závody Formula SAE jsou vedeny netradičním způsobem. Nejde zde pouze o klasický závod na předem daném okruhu, ale místo toho jsou studentské formule testovány v různých disciplínách, které jsou zvlášť bodovány. Maximální počet získaných bodů je 1000. Univerzitní tým s největším počtem bodů zvítězí. Disciplíny jsou rozděleny do dvou skupin: statické a dynamické. Ve statické části se vyskytují tři disciplíny. V první statické disciplíně se analyzuje konstrukční návrh podložený výpočty a simulacemi. Druhá statická disciplína hodnotí celkovou cenu vozu a kalkulaci výrobní ceny, v případě, že by daný stroj byl sériově vyráběn. Poslední statická disciplína je prezentace prototypu a obhajoba plánu na případnou sériovou výrobu vozu. Před vstupem do dynamické části disciplín je potřeba splnit bezpečnostní testy, jako je například technika a bezpečnost vozu, náklonová zkouška a zkouška brzd a hluku. Po splnění bezpečnostních testů přechází tým do dynamických disciplín. Součástí dynamických disciplín je například test akcelerace na trati dlouhé 75 m, jízda v osmičce, nebo také vytrvalostní závod na 22 km.[2]

1.2 UWB Racing Pilsen

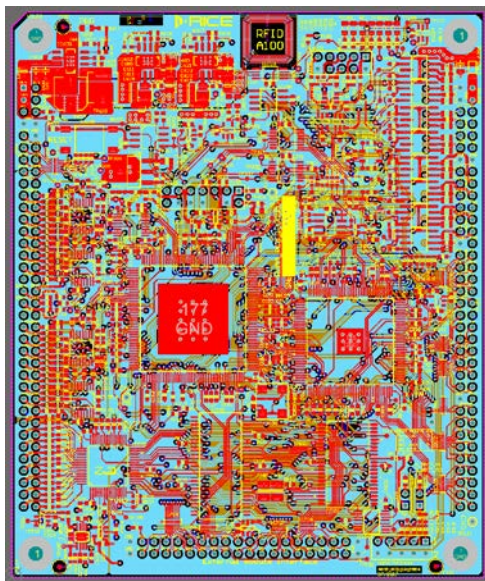
Tým UWB Racing Pilsen je tvořen studenty Západočeské Univerzity v Plzni z bakalářských, magisterských a doktorských studijních programů. Největší část týmu tvoří studenti z fakulty strojní, nicméně se na vývoji formule podílí také fakulta elektrotechnická, aplikovaných věd a ekonomická. Mezi největší úspěchy týmu UWB Racing Pilsen patří čtvrté místo ze závodu Formula Student Italy 2017 a šesté místo ze závodu Formula Student Italy 2019, v tomto závodě dokonce tým získal první místo za akceleraci. Kromě spalovací formule vyvíjí tým UWB také elektroformuli, díky které vzniklo několik závěrečných prací, včetně této.[3]

2 Mikrokontrolérový modul RUMM

Následující kapitoly 2.1 až 2.6 vychází ze zprávy o modulu RUMM [4].

2.1 Základní informace o modulu

RUMM (Rice Univerzal Microcontroller Module) je univerzální mikrokontrolerový modul vyvinutý v Regionálním inovačním centru elektrotechniky na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Modul je založený na mikrokontroléru TMS320F28377, který existuje v jednojádrové či dvoujádrové verzi. Při použití dvoujádrové verze mikrokontroléru je teoretický výpočetní výkon až 800 MIPS (Milion Instructions Per Second). RUMM obsahuje hradlové pole Cyclone III, které se primárně využívá na implementaci základní podpůrné logiky, jako například blokování PWM výstupů nebo výběr SPI periférií. Napájení modulu má velice široký napěťový rozsah, a to 6 až 35 V, podobně jako PWM výstupy, jejichž budiče lze napájet v rozsahu 4,5 až 35 V a jsou schopni dodat výstupní proud až 1,5 A. Rozměrově se jedná o relativně malý univerzální mikrokontrolerový modul s rozměry 100x120mm. Modul je proveden jako šestivrstvá deska plošných spojů osazovaná jednostranně. Na Obr. 2.1 je vidět deska plošných spojů modulu RUMM.



Obr. 2.1 - DPS modulu RUMM, převzato z [4]

2.2 Rozpis parametrů modulu

V následující tabulce Tab. 2.1. jsou kompletně rozepsány parametry vstupů, výstupů a integrovaných obvodů modulu RUMM.

Tab. 2.1 - Parametry modulu RUMM vycházející z [4]

Prvek	Popis
TMS320F28377x	32-bitová mikontrolérová jednotka, rychlost až 200 MHz
CYCLONE III EP3C10/16/25	FPGA programovatelné hradlové pole implementace podpůrné logiky
IS61Wv51216	volatilní SRAM 1MB, přístupový cyklus 10ns
CY14B108M	nevolatilní SRAM 1 MB s FLASH
AT45DB321	FLASH 32 MB, připojena na SPI
M24RL64	EEPROM 64 kbit, čitelná pomocí RFID
AD7607	Interní 14-bitový plně diferenciální AD převodník
14x analogový vstup	Vstupy interního 14-bitového plně diferenciálního AD převodníku, +/- 5V, $T_{\text{sample}}=285$ ns, čtyři nezávislé kanály, $B_{\omega}=500$ kHz
8x analogový vstup	Vstupy externího bipolárního pseudo-diferenciálního AD převodníku, +/- 5V, nebo +/- 10V, simultánní vzorkování, $T_{\text{sample}}=4$ μ s, $B_{\omega}=10-15$ kHz
3x DAC	DACA-C z MCU, 12 bitů, 0-3,3V
18x digitální I/O (FIO)	Vývody přímo z FPGA LVCMOS/LVTTL logika 3,3 V
16 digitální I/O (GIO)	Vývody přímo z FPGA LVCMOS logika 3,3 V
2x digitální vstup FPGA (FIN)	Vývody přímo z FPGA, pouze vstupní, nebo slouží jako podpora pro BiSS, EnDat atd.
4x FAULT vstup	Odolné do 40 V, LVCMOS/LVTTL logika, možnost úpravy na vyšší rozhodovací úroveň
16x PWM výstup	PWM výstupy, 4,5 až 35 V, špičkově až +/- 5A, trvale 0,1 A. Výstupy rozděleny do skupin 4+2+4+2+4.

CAN A	Sběrnice CAN z MCU, LVCMOS logika
I ² C	Sběrnice I ² C z MCU, LVCMOS logika
SCI A + D	Sériové linky z MCU, LVCMOS logika
SPI A	SPI sběrnice až pro 4 periferie, LVCMOS logika

2.3 Napájení modulu

Pro napájení řídicí elektroniky modulu označené V_{in} je možné použít napětí v rozsahu 6 až 35 V. Takto široký napájecí rozsah se hodí pro většinu komerčně dostupných měničů s integrovanými budiči. Napájení PWM budičů, V_{CC_PWM} je samostatně v rozsahu 4,5 až 35 V. Několik vývodů modulu obsahuje napájecí napětí 3,3 V, přičemž celkový možný dodávaný proud všemi těmito vývody je až 2 A.

2.4 Analogové vstupy/výstupy (AD a D/A převodník)

Modul obsahuje celkem 22 analogových vstupů, z toho 14 vstupů patří internímu převodníku předřazenému diferenciálními zesilovači. Napětový rozsah těchto 14ti vstupů je ± 5 V. Interní převodníky mají 12ti bitové rozlišení a vzorkovací rychlost 3,5 MSPS (Mega-Samples Per Second). Diferenciální zesilovače lze konfigurovat, dle požadavků na zesílení. Změna zesílení se provádí odpory R147, R163, R150 a R166 stejně u všech 14ti zesilovačů. Vstupy interních převodníků jsou označeny A_{INx} . Pro hodnotu zesílení základního zapojení tj. R147, R163, R150 a R166 neosazené platí následující rovnice (1).

$$A_u = \frac{R164}{R184} \quad (1)$$

$$U_0 = (U_{A_{INx+}} - U_{A_{INx-}}) \cdot \frac{R164}{R184} + 1,25 \quad (2)$$

Zbýlých 8 analogových vstupů patří externímu převodníku, který je 14ti bitový se vzorkovací rychlostí 200kSPS (kilo-Samples Per Second). Externí převodník má dva napětové rozsahy, a to ± 5 V a ± 10 V. Změna napětového rozsahu se provádí pomocí pinu 255, pokud je pin nezapojený, nebo připojený na 3,3 V, pak je nastavený rozsah ± 5 V, když pin 255 spojíme s GND, tak se rozsah změní na ± 10 V. Modul také obsahuje tři analogové výstupy DACA-C. Tyto výstupy mají napětový rozsah 0 až 2,5 V. Pokud by to

bylo nutné, tak jdou tyto výstupy alternativě použít jako analogové vstupy, které nemají diferenciální zesilovač a jejich ochrana tvořená RC článkem by značně znepresnila měření.

2.5 Digitální vstupy/výstupy

Digitální vývody modulu RUMM využívají LVTTTL úroveň 3,3 V s maximálním nedestruktivním napětím 4,1 V a jsou rozděleny na dvě skupiny. První skupinu tvoří vývody GIO, které jsou přímo ovládané z MCU. Piny GIO16 až GIO27 přímo odpovídají GPIO vývodům MCU. Tyto GPIO mají řadu alternativních funkcí, které se určují dle PINMUX registrů. Vývody označené FIN18/GIO6/PWMA4 a FIN19/GIO7/PWMB4 jsou primárně určeny jako vstupy do FPGA, ale pomocí propojek J700 a J701 lze propojit zmíněné vývody s GPIO6 a GPIO7 z MCU. Toto slouží jako hardwarová podpora pro dekódování komunikačních protokolů čidel polohy.

2.6 PWM výstupy

Modul má k dispozici 16 PWM výstupů s budiči. Napájení budičů se pohybuje v rozsahu od 4,5 do 35 V. Špičkově jsou budiče schopné zvládnout ± 5 A a trvale 0,1 A. PWM výstupy jsou rozděleny na čtyři skupiny po čtyřech (PWMx1+PWMx2, PWMx3+PWMx4, PWMx5+PWMx6, PWMx7+PWMx8). Každá skupina má společný FAULT vstup označen jako HV_FAULTx a také společný povolovací signál. Chování PWM výstupů lze doladit propojkami J702 a J703 a osazením či neosazením odporů R725 a R729.

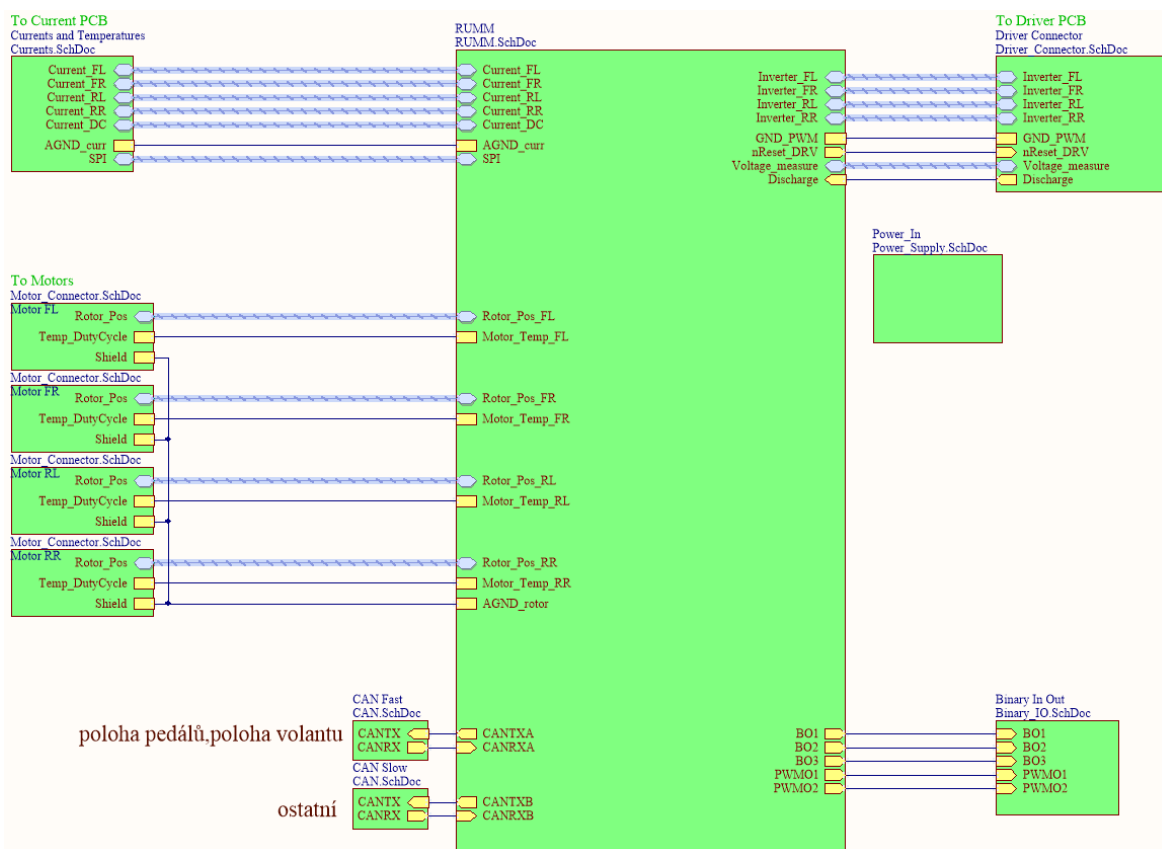
2.7 Požadavky na modul, důvod výběru

Návrh elektroformule není vůbec jednoduchý úkol, protože nemá stoprocentně jasné zadání od začátku projektu, nýbrž se jedná o postupný vývoj, při kterém se často požadavky na interface a celá koncepce projektu mění. Z tohoto důvodu je nejdůležitější vlastností mikrokotrolérového modulu jeho univerzálnost. Modul musí obsahovat dostatečný počet PWM výstupů, nejlépe rozdělných do podskupin se separovanými FAULT vstupy a povolovacími signály. Další zásadní požadavek je dostatečný počet AD převodníků, kvůli měření a vyhodnocení analogových veličin ze senzorů, jako je například proud, teplota nebo poloha. Pro komunikaci MCU s integrovanými obvody a senzory je nezbytná podpora sériových sběrnic, jako například CAN, SPI aj.. Modul musí také obsahovat dostatek GIO vývodů, které lze dle konkrétních požadavků použít zcela

libovolně. Modul RUMM byl navržen maximálně univerzálně a hodí se tedy na složité a sofistikované aplikace v měničích určených primárně pro řízení elektrických pohonů. RUMM obsahuje dostatek PWM výstupů, AD převodníků a GIO/FIO vývodů. Podporuje také nejčastěji používané sériové sběrnice CAN, SPI, I²C a SCI. Vysoký výpočetní výkon, široké rozsahy napájení, dostatečný počet vstupů/výstupů a především univerzálnost celého modulu charakterizují RUMM, jako ideální mikrokontrolerový modul pro studentskou elektroformuli.

3 Obvodové řešení interfacu

Interface má za úkol propojit řídicí jednotku střídače, která je tvořena modulem RUMM a budiče tranzistorových modulů. Výkonový obvod eformule je tvořen čtyřmi měniči, každý měnič obsahuje tři tranzistorové moduly typu BSM120D12P2C005 [5]. Každý tranzistorový modul má svůj vlastní driver, na který jsou přivedeny signály z řídicí jednotky. Interface dále propojuje čidla proudů, teplot, napětí a poloh rotorů s AD převodníky řídicí jednotky. Realizuje zapojení sériových sběrnic, jako je CAN a SPI. Využívá také programovatelných GIO a FIO například pro generování PWM signálů pro ovládání ventilátorů či jako binární výstupy pro spínání dalších logických zařízení. Při samotném návrhu obvodového řešení interfacu je nutné splnit platná pravidla SAE. Nesplnění těchto pravidel by mohlo vést k diskvalifikaci ze závodu. Na Obr. 3.1 je vidět celkové blokové schéma interfacu. Pro návrh obvodového řešení byl použit program Altium designer. Podrobný návrh obvodového řešení je rozdělen do několika bloků, které jsou popsány v následujících kapitolách 3.1 až 3.6.



Obr. 3.1 - Blokové schéma interfacu

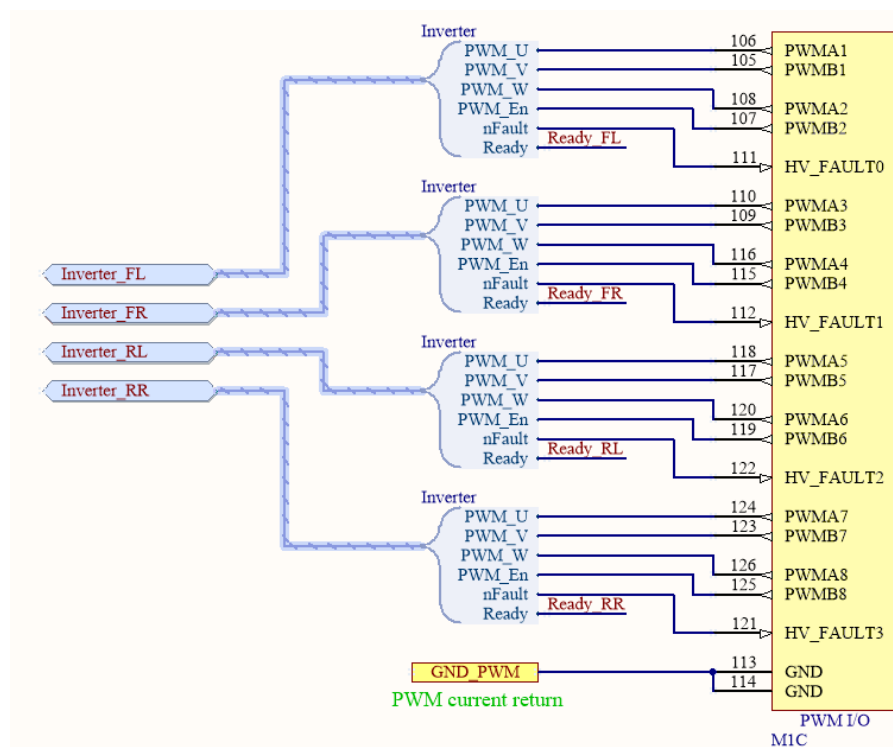
3.1 Napájecí zdroje

Pro napájení řídicí jednotky a interfacu bude využita palubní síť eformule. Napájení může být ve dvou variantách a to +12 V, nebo +24 V. Blok napájecích zdrojů je tedy připraven pro obě napěťové úrovně. Napájecí zdroj musí být schopný dodat dvě napěťové úrovně, a to +5 V a +12 V. Varianta s palubní sítí +12 V využívá jednoho step-down měniče typu LMR23630 pro snížení napětí z +12 V na +5 V a kombinace tranzistorů, které z bezpečnostních důvodů sepnou, až po naběhnutí napěťové úrovně +5 V. Samotný obvodový návrh zdroje nebyl předmětem této práce a je tedy převzán z již navrženého obvodu. Kompletní schéma napájecích zdrojů je dostupné z přílohy P.

3.2 Signály pro drivery

Z již výše zmíněné koncepce výkonového obvodu vyplývá, že pro každý střídač je nutné generovat tři *PWM* signály. Řídicí jednotka má rozdělené *PWM* výstupy do čtyř skupin, což je pro tuto aplikaci ideální. Každý měnič bude mít pouze jeden povolovací signál *Enable* a jeden chybový signál *nFault*. Využití pouze jednoho povolovacího a chybového signálu je výhodné z hlediska větší odolnosti proti rušení a snížení celkového

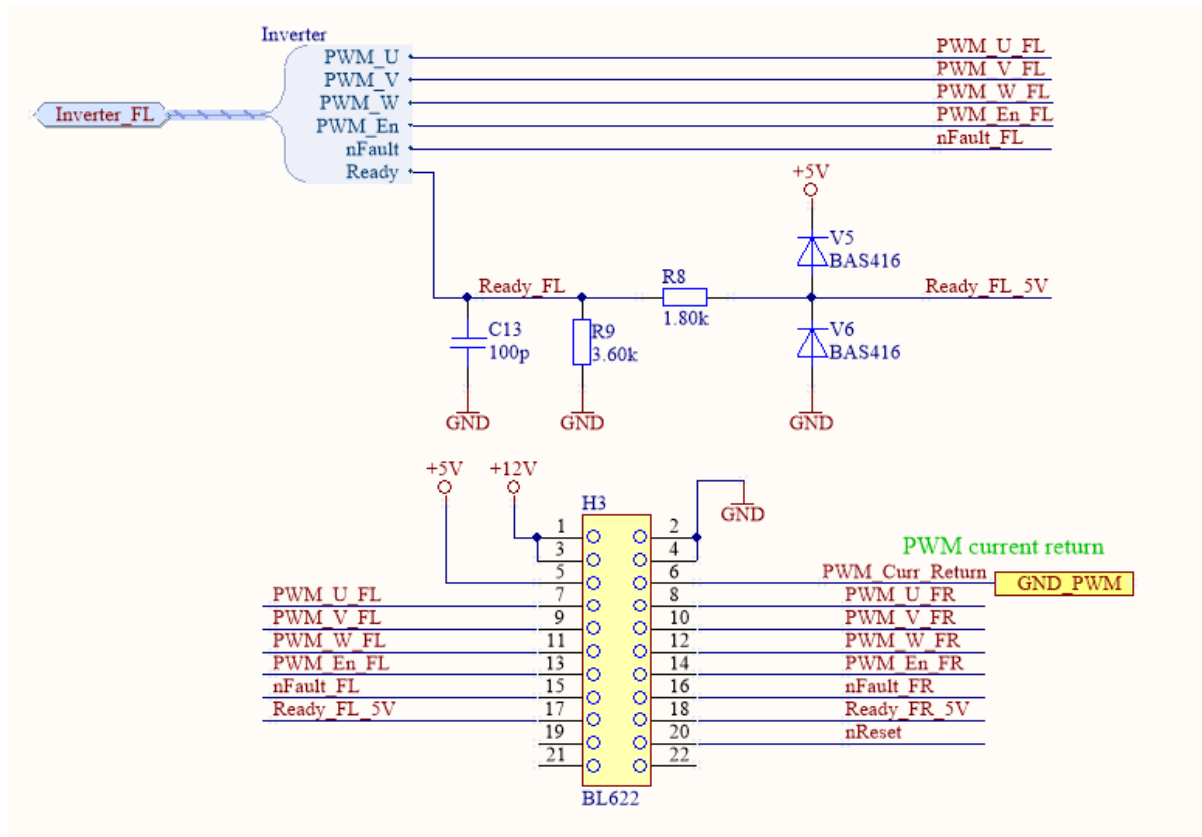
počtu potřebných signálů. Dále je nutné pro každý měnič přivést jeden signál *Ready*, který indikuje, zda je daný měnič připravený spínat. Veškeré tyto signály mají označení dle měniče, na který jsou přivedeny a také podle výstupní fáze. Například signál *PWM* fáze *U* levého předního motoru je označen *PWM_U_FL*. Schéma zapojení *PWM* bloků je vidět na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 - Blok *PWM* výstupů

Veškeré výše zmíněné signály jsou pomocí konektoru BL622 přivedené na sběrnou desku, která realizuje propojovací člen mezi interfacem a drivery. Na konektor je také přivedené dvojí napájení a to +5 V a posílených +12 V. Napěťová úroveň +5 V slouží pro napájení integrovaných obvodů driverů a úroveň +12 V napájí zdroje driverů. Napájení +12 V je zesíleno spojením dvou pinů na konektoru z důvodu zvýšení jeho robustnosti. Dále se na konektor přivádí separovaná zem *GND_PWM* pro návrat pulzních proudů při generování signálů *PWM*, které by mohly způsobovat rušení ostatních signálů. Na Obr. 3.3 je vidět výňatek ze schématu propojující driver a řídicí jednotku. Ve schématu je zobrazeno seskupení signálů pro driver a samotný konektor BL622 se všemi signály, které se na drivery přivádí. Výstupní signály *Ready* z driverů jsou chráněny ořezávacími diodami. Signál *Ready* se pohybuje v napěťové úrovni +5 V, jelikož je připojen na GIO řídicí jednotky, tak je nutné vybaven jednoduchým napěťovým děličem snižující napětí na

3,3 V, protože obecné digitální vstupy/výstupy pracují s LVTTTL logikou na napěťové úrovni 3,3 V.



Obr. 3.3 - Driver signály + konektor

3.3 Měření analogových veličin

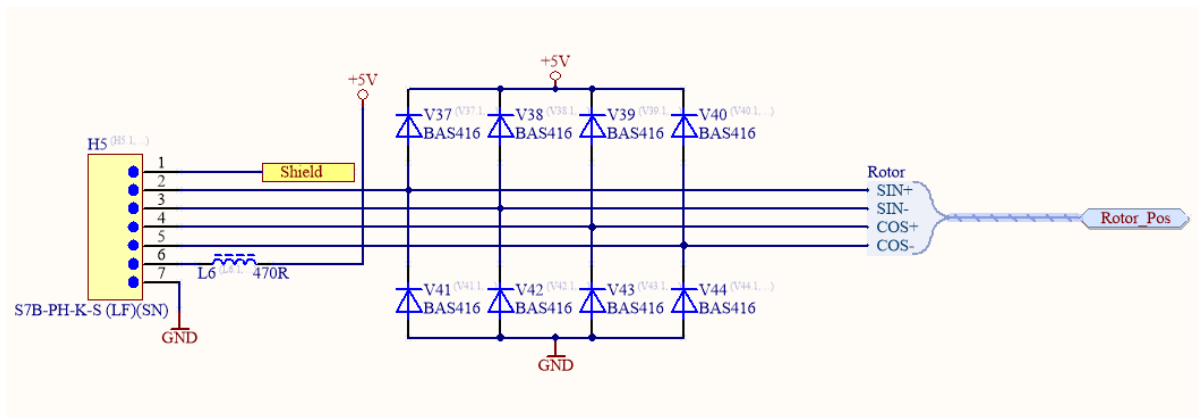
Eformule obsahuje čtyři měniče ovládající čtyři motory, u kterých je nutné sledovat analogové veličiny, jako jsou proudy jednotlivých fází motorů, polohy rotorů, napětí a proud DC-linku. Znalost těchto veličin je nezbytná pro správné řízení a funkčnost měničů. Tyto veličiny musíme nejdříve převést do formy digitálního signálu, protože spojitě průběhy veličin by byly pro MCU nečitelné. Tento převod signálu z analogového na digitální je realizován pomocí AD převodníků. Měřené analogové veličiny jsou rozděleny do několika skupin a jsou popsány podrobněji v následujících podkapitolách 3.3.1 až 3.3.4..

3.3.1 Měření proudů

Pro měření proudů jsou využita čidla proudu typu HC5FW 300-S od firmy LEM, která se primárně využívají v automotive průmyslu. [6] Jedná se o průvleková čidla pracující na Hallově efektu. Čidla budou umístěna na jednotlivé fáze motorů. Obvody pro měření proudů, kam jsou přivedeny výstupy z čidel jsou umístěny na samostatné desce plošných spojů mimo interface. Propojení mezi interfacem a obvody pro měření proudů je realizováno pomocí 26-ti pinového konektoru BL626 s roztečí 2,54mm. Proudů jsou měřeny na všech fázích motorů a v DC-linku. Celkem se jedná o třináct diferenciálních signálů, které jsou pomocí interface přiváděny do interních AD převodníků řídicí jednotky. Signály jsou značeny dle měniče, fáze a polaritě signálu. Například proud měřený ve fázi U na levém předním motoru je označen $Curr_U_FL\pm$.

3.3.2 Měření poloh rotorů

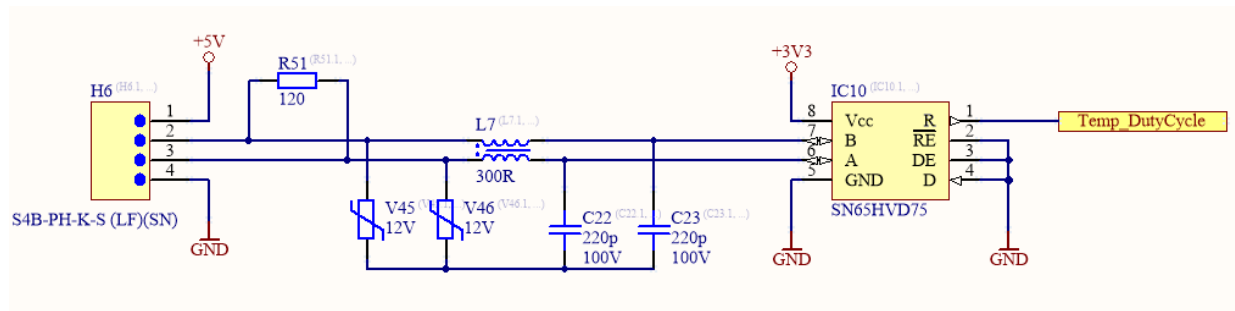
Měření okamžitých pozic rotorů a tedy i otáček je realizováno pomocí čidel typu RM22. Jedná se o dvoukanálový rotační magnetický snímač, který ve své analogové verzi RM22BC generuje analogové signály v podobě dvou diferenciálních párů harmonických funkcí. [7] Z těchto signálů lze následně zjistit údaje o směru otáčení, otáčkách a polohách rotorů. Tyto analogové signály jsou přivedeny do externích AD převodníků řídicí jednotky jako diferenciální páry $\pm SIN$ a $\pm COS$. Pro omezení rušení těchto signálů se využívá stínění v podobě analogové země externího AD převodníku řídicí jednotky označené jako $AGND_rot$. Zapojení těchto čidel je vidět na Obr. 3.4. Jedná se o jednoduché zapojení obsahující indukčnost pro vyhlazení napájecího proudu čidel a čtyři dvojice ořezávacích diod, které slouží pro oříznutí nežádoucích hodnot napětí.



Obr. 3.4 - Zapojení čidel polohy rotorů

3.3.3 Měření teplot vinutí

Čidla pro měření teplot vinutí jsou umístěna přímo ve vinutích jednotlivých motorů. Tato čidla negarantují galvanické oddělení signálů, což by mohlo být nebezpečné z důvodu vysokého trakčního napětí. Proto je nutné signály před vstupem do konektoru galvanicky oddělit pomocí optronů, převést signály na střidu a poté pomocí budičů typu SN65HVD75 [8] přenést do digitálních vstupů ovládaných hradlovým polem FPGA s označením pinů *FIO0-FIO3*. Signály jsou značeny podle motorů, například teplota vinutí levého předního motoru je označena *Motor_temp_FL*. Na Obr. 3.5 je vidět zapojení konektoru od čidel teplot motoru. Zapojení odpovídá standardu RS485, který se vyznačuje dvou vodičovým vedením ukončené zakončovacím odporem o hodnotě 120 Ω . Tento zakončovací odpor, jinak řečeno „*terminátor*“ zabráňuje signálovým odrazům a zvyšuje odolnost proti rušení.



Obr. 3.5 - Zapojení čidel teploty

3.3.4 Měření napětí

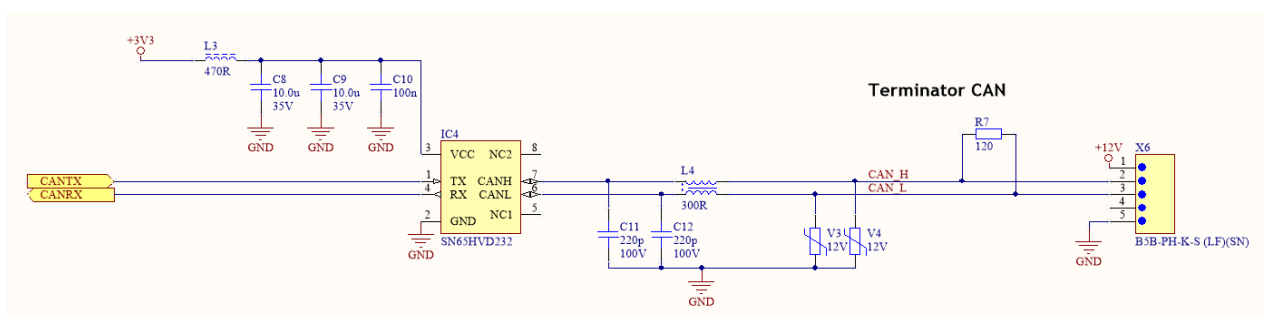
Obvod pro měření napětí DC-linku je umístěn mimo interface na sběrné desce. Napětí DC-linku $+DC$ a $-DC$ je přivedeno přes ochrany a kondenzátory pro vyhlazení napětí do integrovaného obvodu AMC1311 [9], který galvanicky odděluje signál pomocí izolační bariéry. Tato izolační bariéra zajišťuje robustní ochranu signálu před rušivými vlivy. Výstup tohoto obvodu je v diferenciální podobě přiveden do interního AD převodníku řídicí jednotky.

3.4 Sériové sběrnice

Sériové sběrnice slouží pro komunikaci řídicí jednotky s dalšími perifériemi, jako jsou integrované obvody a senzory. Tyto sběrnice zajišťují velice spolehlivý přenos dat

3.4.1 CAN

Interface obsahuje dvě CAN linky. První linka označená *CAN_Fast* slouží pro snímání, komunikaci a regulaci kritických parametrů s nejvyšší prioritou, jako je například poloha volantu a poloha pedálů. Druhá linka označená *CAN_Slow* slouží pro ostatní méně kritické parametry. Na Obr. 3.6 je vidět schéma zapojení, které je totožné pro obě linky. Obvod CAN linek je opatřen přepět'ovými ochranami, EMI filtrem a samotným budičem typu SN65VHD232 [10]. Tento budič funguje jako vysílač/přijímač sériové komunikace CAN. Obvod je také vybaven zakončovacím odporem, který zamezuje signálovým odrazům a slouží jako ochrana proti rušení.



Obr. 3.6 - Schéma zapojení CAN

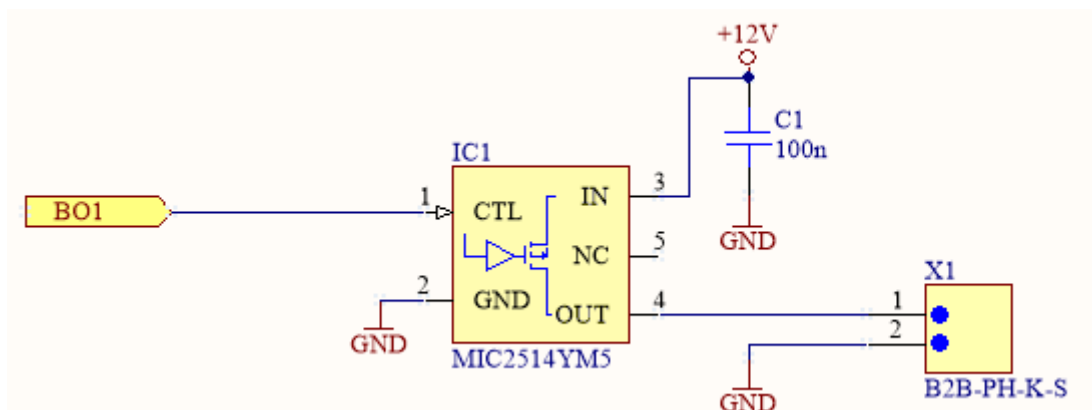
3.4.2 SPI

Sériová sběrnice SPI slouží primárně pro ověření tepelných výpočtů výkonových prvků s delší časovou konstantou. Pomocí chip-select volíme, pro jaký výkonový prvek je teplota snímána. Ve výkonovém obvodu je 16 různých teplot, které je potřeba snímat. Mezi tyto teploty patří například teploty jednotlivých modulů, teplota chladiče, teplota kondenzátoru, teplota vstupní a výstupní vody.

3.5 Binární obvody

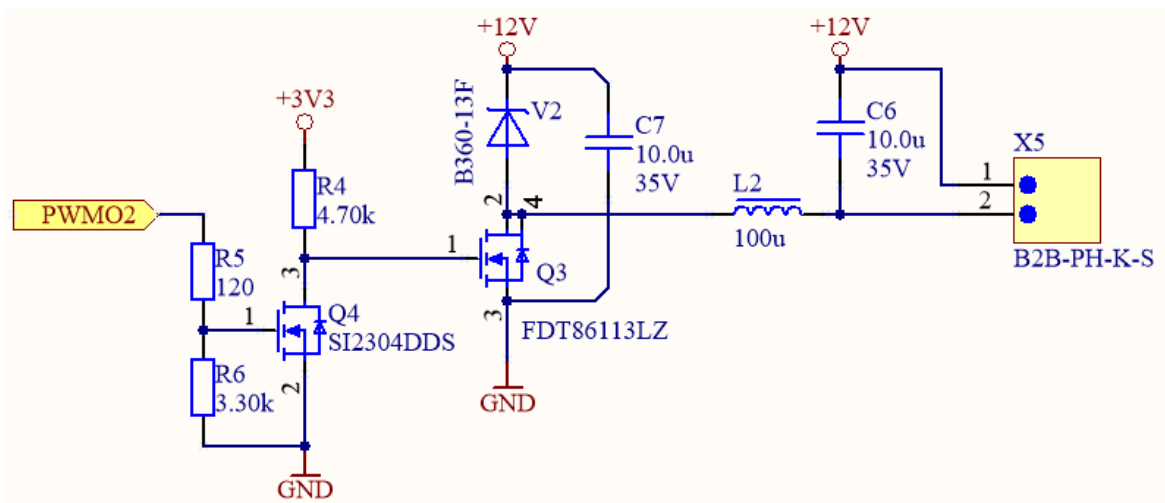
Interface obsahuje tři binární výstupy. Tyto binární výstupy jsou určeny pro spínání dodatečných zařízení. Spínání těchto zařízení je realizováno pomocí třech integrovaných spínacích obvodů typu MIC2514YM5.[11]Tyto spínače mají binární vstup kompatibilní s TTL logikou a jsou řízeny z digitálních výstupů FIO ovládaných z hradlového pole FPGA. Napájení integrovaného obvodu využívá napěťové úroveň +12 V. Spínače jsou vybaveny teplotní ochranou a interním omezovačem proudu. Omezovač proudu je realizován měřením úbytku napětí na odporu přivedeného na source tranzistoru. Hraniční hodnota výstupního proudu pro použitou napěťovou úroveň +12 V činí 1,9 A. Po přivedení

logického signálu *I* na ovládací vstup CTL se aktivuje teplotní ochrana a řídicí obvod tranzistoru. Řídicí obvod vyhodnotí, zda je tranzistor připraven spínat. Pokud je tranzistor připraven spínat, tak řídicí obvod přivede napájecí napětí na gate tranzistoru, čímž tranzistor sepne. Při vypínání tranzistoru klesne napětí přiváděné na gate pod hodnotu napájecího napětí a tranzistor vypne. Výstupy z těchto binárních spínačů jsou přivedeny na konektory typu B2B-PH-K-S. Na Obr. 3.7 je schéma zapojení binárních výstupů.



Obr. 3.7 - Binární výstupy

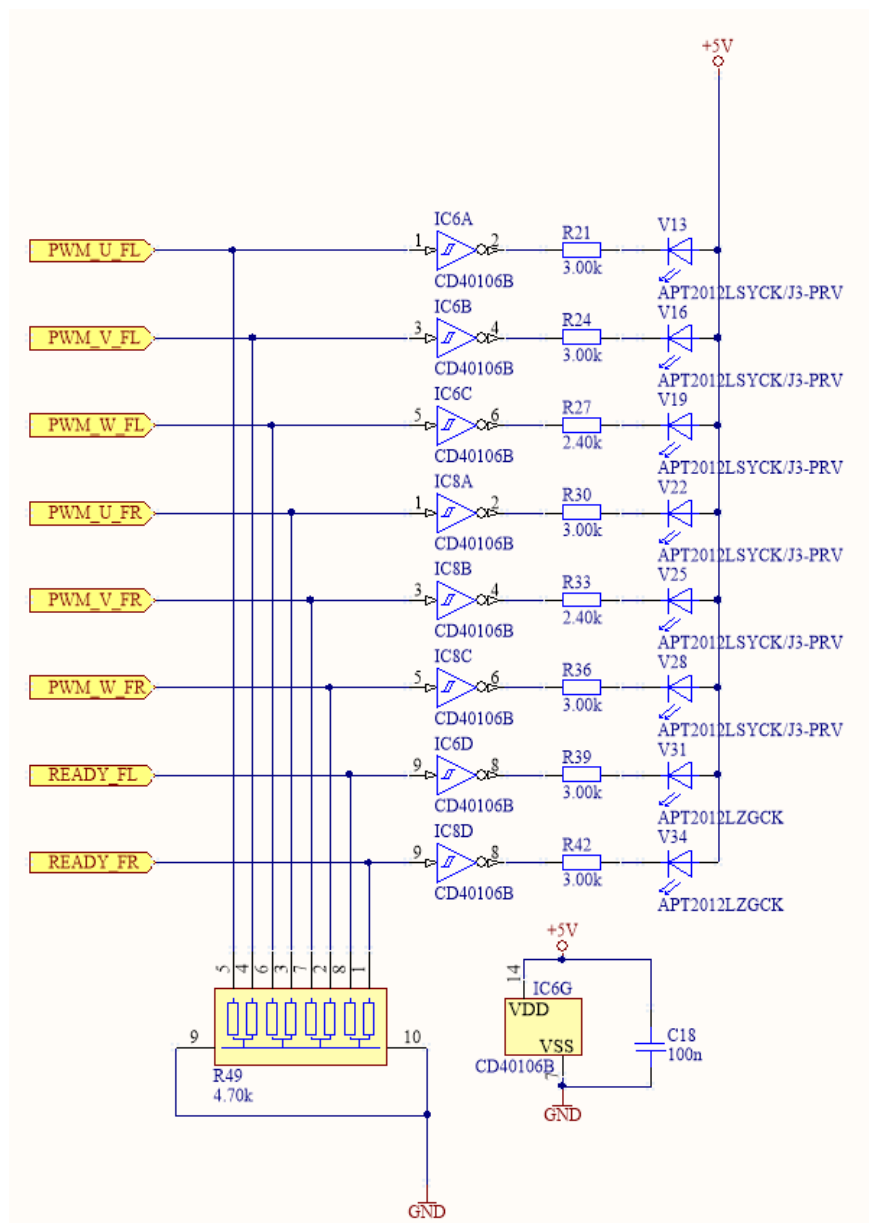
Interface také obsahuje dva snižovací měniče pro případné připojení ventilátorů či jiných dodatečných zařízení s výstupním proudem do 2 A. Řízení těchto snižovacích měničů bude provedeno pomocí PWM signálů z GIO řídicí jednotky. Na Obr. 3.8 je vidět schéma zapojení snižovacího měniče pro ovládání dodatečných zařízení.



Obr. 3.8 - Snižovací měnič pro řízení dodatečných zařízení do 2 A

3.6 Signalizační LED

Světelná signalizace pomocí LED informuje o současném stavu signálů, které jsou přiváděny na drivery tranzistorových modulů. Rozsvícení LED signalizuje, že je daný signál aktivní. Obvodově je signalizace řešena pomocí čtyř šestic Schmittových invertorů typu CD40106B[12], na jejichž vstup je připojen sledovaný signál v napěťové úrovni +5 V a pull-down či pull-up rezistor, kvůli ukotvení výchozího logického stavu. Jako pull-down odpory bylo u signálů vyžadující výchozí stav 0 použito odporové pole skládající se z osmi 4,7k Ω rezistorů. Tato varianta pull-down odporů byla provedena primárně kvůli ušetření místa na desce plošných spojů. Výňatek ze schématu signalizačních LED je vidět na Obr. 3.9. Kvůli přehlednosti je soupis veškerých sledovaných signálů popsán v Tab. 3.1.



Obr. 3.9 - Zapojení signalizačních LED

Tab. 3.1 - Soupis sledovaných signálů

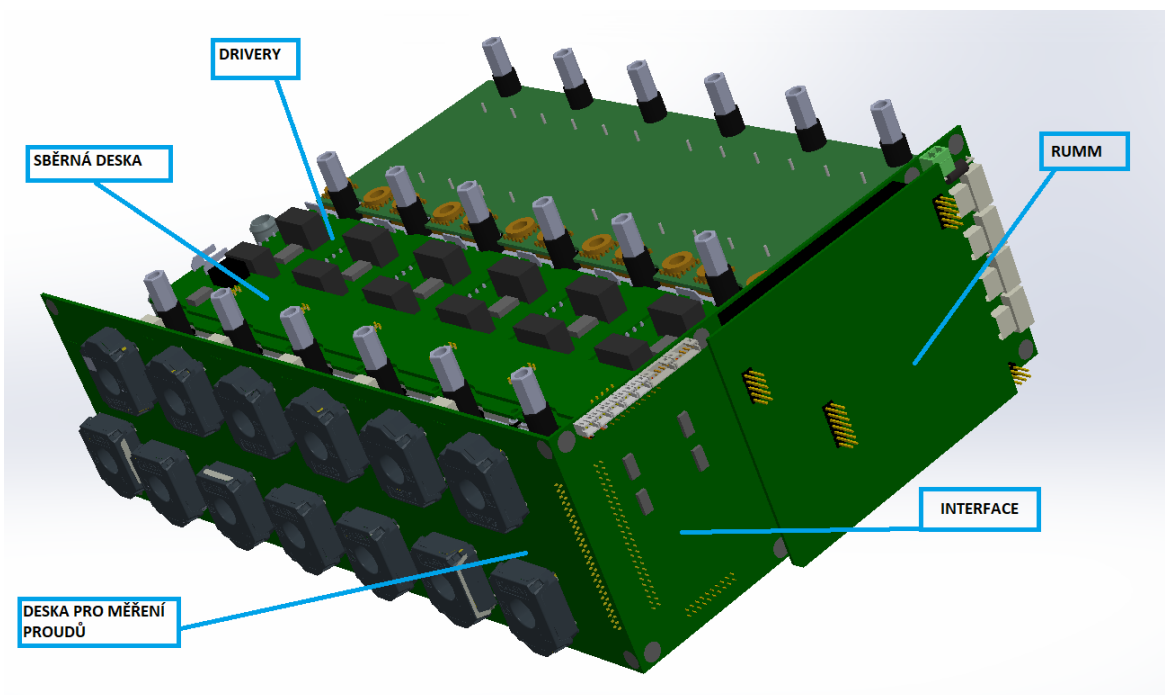
<i>Signál</i>	<i>Součástka (Schmitt – LED)</i>	<i>Barva LED</i>
PWM_U_FL	IC6 – V15	Žlutá
PWM_V_FL	IC6 – V18	Žlutá
PWM_W_FL	IC6 – V21	Žlutá
PWM_U_FR	IC8 – V24	Žlutá
PWM_V_FR	IC8 – V27	Žlutá
PWM_W_FR	IC8 – V30	Žlutá
PWM_U_RL	IC7 – V16	Žlutá
PWM_V_RL	IC7 – V19	Žlutá
PWM_W_RL	IC7 – V22	Žlutá
PWM_U_RR	IC9 – V25	Žlutá
PWM_V_RR	IC9 – V28	Žlutá
PWM_W_RR	IC9 – V31	Žlutá
READY_FL	IC6 – V33	Zelená
READY_FR	IC8 – V36	Zelená
READY_RL	IC7 – V34	Zelená
READY_RR	IC9 – V37	Zelená
ENABLE_FL	IC6 – V29	Zelená
ENABLE_FR	IC8 – V32	Zelená
ENABLE_RL	IC7 – V35	Zelená
ENABLE_RR	IC9 – V38	Zelená
nFAULT_FL	IC6 – V17	Červená
nFAULT_FR	IC8 – V20	Červená
nFAULT_RL	IC7 – V23	Červená
nFAULT_RR	IC9 – V26	Červená

Kompletní schémata nebyla umístěna do samotného textu práce, ale nachází se v příloze H-P.

4 Návrh desky plošných spojů

Návrh DPS byl proveden pomocí programu Altium designer. Tento program umožňuje nakreslit schémata obvodů, hierarchicky je mezi sebou propojit a následně importovat do editoru DPS. Tento editor má řadu funkcí, které zefektivňují samotný návrh DPS. Postup návrhu se skládá z několika kroků. První krok je stanovení rozměrů desky. Rozměry desky interfacu vychází z předběžného 3D modelu měniče navrženého členem týmu UWB a z rozměrů řídicí jednotky RUMM. Rozměry desky byly stanoveny na 210 x 100 mm. Deska je navržena jako čtyřvrstvá oboustranná s prokvy osazovaná převážně z jedné strany. Na spodní straně jsou umístěny konektory pro analogové signály proudů, napětí a poloh rotorů. Dále se na spodní straně vyskytují konektory od motorů, konektory od driverů a zakončovací odpory od obou CAN linek.

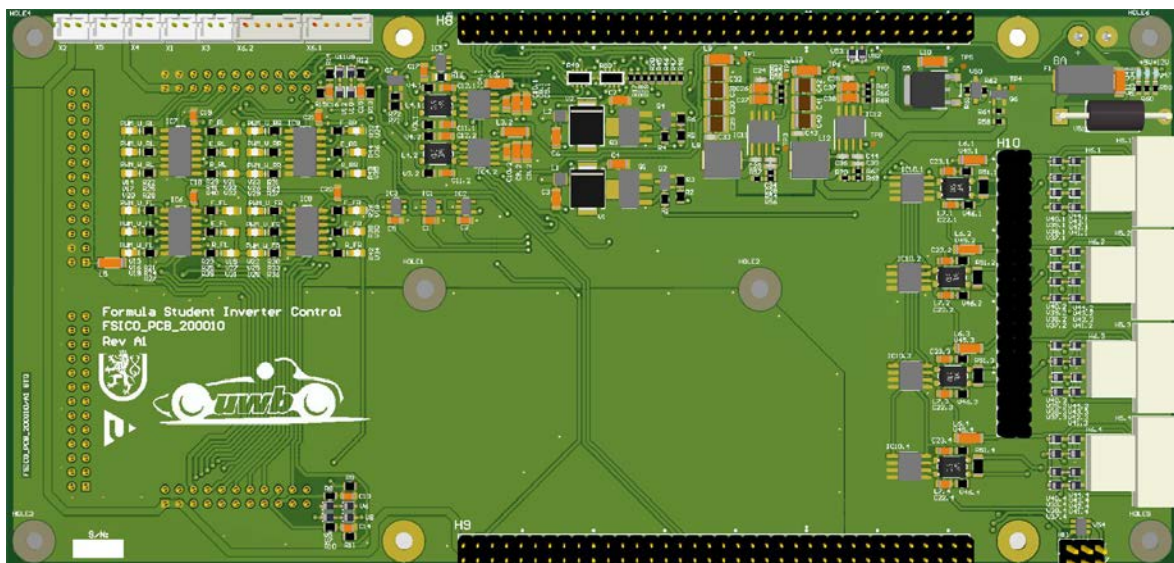
Dalším krokem po stanovení rozměrů desky je rozmístění všech součástek na desku. Deska interfacu obsahuje několik duplicitních obvodů, proto bylo výhodné využít funkce „místnosti“. Například obvod pro propojení čidel poloh rotorů se v interfacu vyskytuje čtyřikrát. Jednotlivým místnostem lze přiřadit skupinu součástek, které se opakují. Tyto součástky se v rámci místnosti rozmístí a zapojí. Informace o rozmístění a zapojení součástek místnosti mohou být mezi sebou kopírovány, což značně ulehčilo práci s duplicitními obvody. Při rozmísťování bylo důležité začít s umístěním konektorů. Umístění konektorů pro drivery a měření proudů vyplývá z předběžného 3D modelu měniče. Po umístění těchto konektorů bylo nutné umístit blok signalizačních LED na viditelné místo na desce. V předběžném 3D modelu na Obr. 4.1 je vidět, že více než polovinu desky zabírá řídicí jednotka a proto bylo nutné většinu signalizace umístit na levou stranu desky, kde bude dobře viditelná. Zbývající signalizační LED indikující správnost funkce obou napěťových úrovní napájecího zdroje byly umístěny do pravého horního rohu ke zdrojovému konektoru. Dále bylo nutné umístit ochrany signálů, co nejbližší ke konektorům, na které jsou přivedeny, kvůli zvýšení jejich spolehlivosti. Důležité také bylo správné rozmístění součástek zdrojů, kde je nutné oddělit zem step down měniče od země, která je přivedena na ostatní součástky na desce. Pokud by se toto oddělení nerealizovalo mohlo by to mít za následek značné zvlnění napětí. Po umístění všech těchto kritických komponentů následovalo rozmístění zbylých součástek.



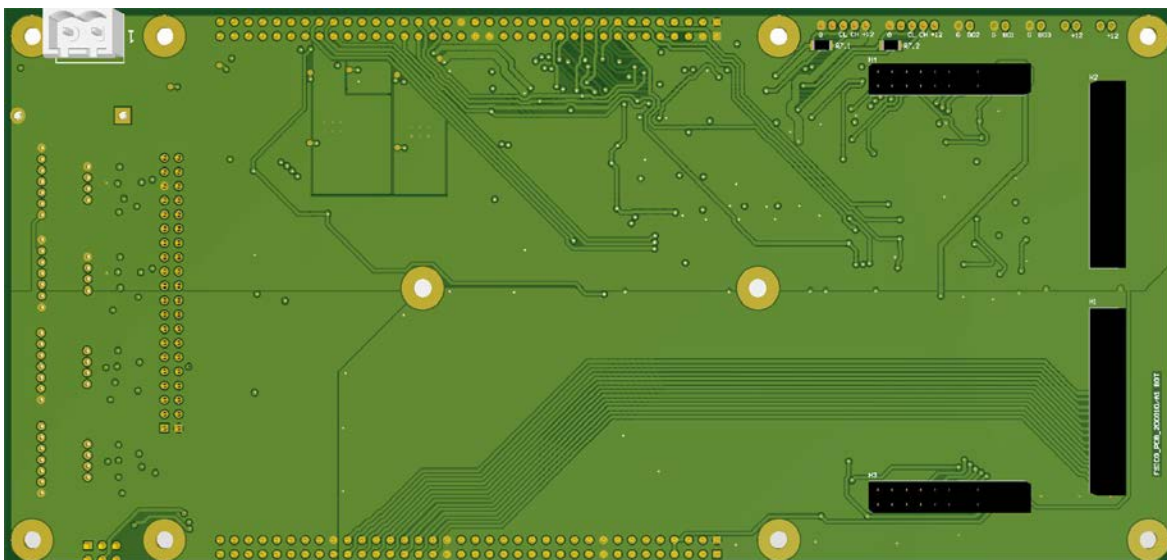
Obr. 4.1 - 3D model měniče

Třetí krok návrhu zahrnuje zapojení všech součástek a následné vylití vodivých ploch pomocí polygonů. Většina vodivých cest má tloušťku 0,508 mm, v nutných případech, jako například napájecí cesty je tloušťka vyšší a to 1,27 mm, nebo případně 0,762mm. Vodivé cesty jsou provedeny ve čtyřech vrstvách (TopLayer, MidLayer1, MidLayer2 a BottomLayer). Přechod mezi vrstvami je realizován pomocí prokovů. Po propojení všech součástek bylo pomocí polygonů vylito několik vodivých ploch ve všech vrstvách desky. Tyto vodivé plochy slouží převážně jako stínění, nebo pro přivedení napájení.

Poslední fáze je věnována přípravným pracím pro výrobní dokumentaci. Jedná se o umístění popisů součástek a konektorů pro usnadnění orientace na desce. Každá součástka má svůj popis umístěný, tak aby bylo zřetelné o jakou součástku se jedná. Dále se na desce vyskytuje několik log reprezentujících ZČU a tým UWB Racing Pilsen. Deska obsahuje také své unikátní číslo FSICO_PCB_200010 umístěné na levé straně desky. Na Obr. 4.2 je vidět deska plošných spojů ze shora a na Obr. 4.3 zespodu.



Obr. 4.2 - DPS pohled ze shora



Obr. 4.3 - DPS pohled zespodu

5 Dokumentace pro výrobu

Po dokončení návrhu DPS je nutné připravit dokumentaci pro její výrobu. Tato dokumentace obsahuje množství parametrů, které jsou nezbytné pro úspěšnou výrobu desky. Mezi tyto parametry patří počet vodivých vrstev desky, rozměry desky, materiály použité při výrobě, přesné souřadnice umístění součástek a seznam součástek. Pro externí firmu, která bude zajišťovat výrobu desky se již standartně pro předání informací o DPS využívá speciálních datových formátů. Mezi nejčastěji používané datové formáty patří GERBER a ODB++. Tyto datové formáty v sobě obsahují informace o všech vrstvách desky. Soubory GERBER jsou oproti ODB++ jednodušší a obsahují pouze instrukce pro fotoploter, který vytváří film zahrnující souřadnice součástek a vodivých cest v dané vrstvě. [13] Soubory ODB++ v sobě zahrnují všechna potřebná data pro výrobu desky, včetně instrukcí pro vrtání otvorů na desce, seznamu součástek a mnoho dalších. [14] Pro desku interfacu byly využity datové formáty GERBER i ODB++ vygenerované pomocí programu Altium, ve kterém probíhal i samotný návrh desky. Tyto soubory jsou umístěny příloze A-F.

Kromě souborů GERBER a ODB++ je nutné také vygenerovat soupis veškerých použitých součástek. tento soubor se nazývá BOM (bill of materials) a obsahuje v sobě údaje o všech součástkách týkající se výrobce, počtu součástek, dodavatele a vlastností součástek. Veškeré údaje o součástkách jsou uloženy v knihovně součástek RICE, se

kteřou program Altium designer spolupracuje. Právě pomocí těchto údajů z knihovny součástek RICE byl vygenerován BOM umístěný v příloze G.

Deska má rozměry 210 x 100 mm a je provedena ve čtyřech vodivých vrstvách o tloušťce 35 μm . Jako nevodivý materiál pro výrobu desky byl zvolen FR4. Jedná se o nehořlavý kompozitní materiál, který patří mezi nejpoužívanější materiály při výrobě desek plošných spojů. [15]

Výše zmíněné parametry desky se předají externímu výrobcí a objednájí se všechny potřebné součástky. Po dokončení výroby desky a získání všech potřebných součástek bude následovat samotné osazení desky. Osazení desky není náplní této práce.

6 Návrh postupu pro oživení a měření

Po zhotovení desky je nezbytné desku nejdříve otestovat a proměřit, zda-li plní všechny své funkce. Oživení a následné měření výsledných parametrů bude probíhat dle následujícího postupu:

- Vizuální kontrola desky – Po osazení desky se provede vizuální kontrola zaměřující se na studené spoje a celkový stav desky.
- Ověření funkčnosti napájecích zdrojů - Na desku interfacu bez připojené řídicí jednotky RUMM se přivede napájecí napětí v dané variantě +12 V či +24 V. Jako prvotní signál správné funkce napájecích zdrojů slouží signalizační LED, které informují o stavu dané napěťové úrovně na desce. Po rozsvícení signalizačních LED následuje proměření napájecích zdrojů, pomocí několika testovacích bodů umístěným na desce.
- Kontrola napájení klíčových komponentů – Při správné funkčnosti napájecích zdrojů následuje kontrola, zda se napěťové úrovně objevují na všech klíčových komponentech desky. Proměří se hodnoty napětí na konektorech a klíčových součástkách.

- Připojení řídicí jednotky RUMM – Po kontrolách napájení následuje samotné připojení řídicí jednotky. Řídicí jednotka slouží jako zdroj pro napěťovou úroveň 3,3 V. Po připojení řídicí jednotky se proměří napájecí blok, zda všechny napěťové úrovně dosahují očekávaných hodnot (+3,3V, +5 V a +12 V).
- Naprogramování řídicí jednotky – Pro ověření funkčnosti propojení interfacu a řídicí jednotky bude nutné nahrát do RUMMu základní testovací program. Tento program ověří základní funkce regulátoru.
- Měření výsledných parametrů – Po nahrání základního programu následuje připojení osciloskopu na D/A převodník řídicí jednotky. Pomocí osciloskopu se provede kontrola výstupních signálů.
- Připojení k měniči – Nejdůležitějším testem interfacu je propojení s řídicí jednotkou a výkonovým obvodem měniče. Po propojení s měničem, resp. drivery tranzistorových modulů následuje řada měření. Mezi tyto měření spadá například měření zpoždění signálu vyslaného od řídicí jednotky a sepnutím tranzistorů výkonového modulu. Dále by se ověřovala funkce AD převodníků, signalizačních LED vypovídající o stavu PWM výstupů, ověření komunikace sériových sběrnic a ověření funkčnosti binárních výstupů.

7 Závěr

Závěrečná práce krátce seznamuje s mezinárodní soutěží Formula SAE a představuje univerzitní tým UWB Racing Pilsen. Ve stručnosti popisuje klíčové vlastnosti modulu RUMM, který bude ve studentské eformuli použit jako řídicí jednotka. Na základě vlastností řídicí jednotky a požadavků kladené celou koncepcí projektu předkládá návrh obvodového řešení mezi řídicí jednotkou a silovým obvodem eformule. Obvodové řešení se skládá z řady schémat, která jsou v práci stručně popsána. Pro úplnost jsou také všechna schémata umístěna v přílohách. Dle navrženého obvodového řešení byl zpracován návrh desky plošných spojů. V práci je také připravena kompletní dokumentace pro výrobu a oživení desky v podobě gerberů, osazovacích listů, seznamu součástek a navrženého postupu při následném oživování a testování. Kvůli covidové pandemii, která nám

neumožnila v době zpracovávání závěrečné práce přístup do laboratoří, se práce nezabývá výrobou, osazením a experimentálním oživením desky. Výroba, osazení a oživení desky proběhne v následujících měsících. Návrh eformule je velice komplexní úkol, který vyžaduje týmovou spolupráci. Během návrhu eformule dochází k častým změnám a upravám, které zajišťují vylepšení a optimalizaci celého projektu. V době zpracovávání této práce došlo k několika takovým změnám a návrh se jim musel přizpůsobit. Celý tento projektový vývoj byl konzultován s členy týmu pro zajištění úspěšného dokončení projektu.

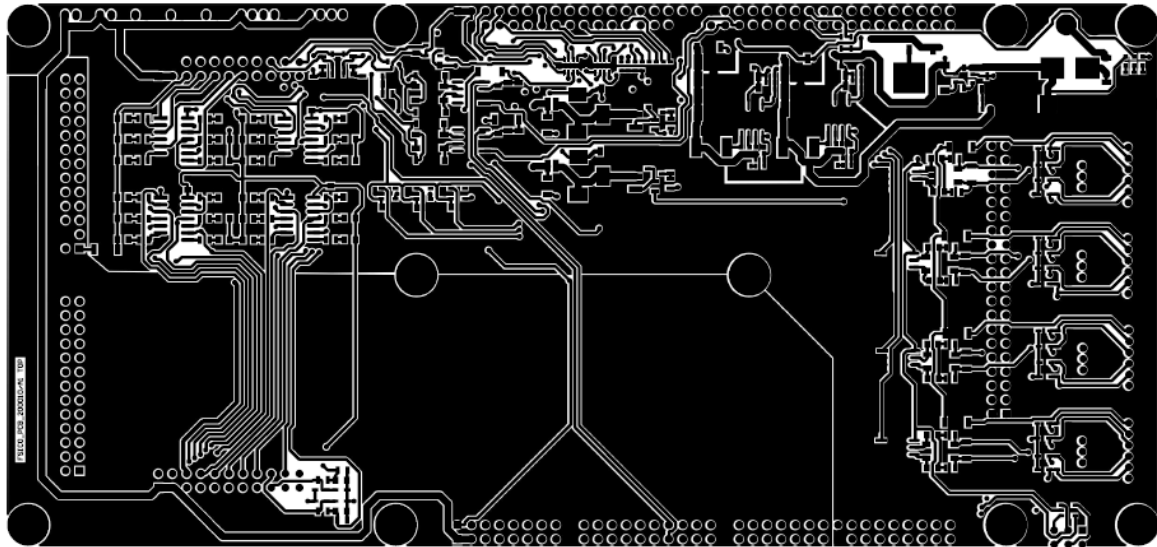
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CASE Dean, *Formula SAE - Competition History 1981 – 1996* [online]. SAE Technical Paper 962509, 1996 [cit. 15.4.2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/962509>
- [2] CTU CarTech, *Formula student* [online]. [cit. 15.4.2021]. Dostupné z: <https://cartech.cvut.cz/formula-student/>
- [3] Západočeská univerzita v Plzni, UWB Racing Team [online]. [cit. 15.4.2021] Dostupné z: <http://uwbracing.cz/sezona-2019/>
- [4] KOŠAN Tomáš. *RUMM – Rice Univerzal Microcontroller Module: Hardwarová specifikace a uživatelská příručka*. [online], Plzeň, 2019 [cit. 13.3.2021]. Dostupné z: <https://riceproject.fel.zcu.cz> Regionální inovační centrum elektrotechniky, Fakulta elektrotechnická, Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D..
- [5] ROHM, *SiC Power Module BSM120D12P2C005* [online]. [cit. 15.4.2021] Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/348/bsm120d12p2c005-e-1872019.pdf>
- [6] LEM, *Automotive current transducer open loop technology HC5FW 300-S/SP1* [online], [cit. 15.4.2021] Dostupné z: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hc5fw300-s_sp1.pdf
- [7] RLS, *RM22 rotary magnetic modular encoder* [online], [cit. 15.4.2021] Dostupné z: <https://www.rls.si/media/catalog/product/d/AData-sheet-rm22-rotary-magnetic-modular-encoder.pdf>
- [8] TEXAS INSTRUMENTS, *SN65HVD7x 3.3-V Supply RS-485 With IEC ESD protection* [online], [cit. 15.4.2021] Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd75.pdf?ts=1622982129780&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN65HVD75
- [9] TEXAS INSTRUMENTS, *AMC1311x High-Impedance, 2-V Input, Reinforced Isolated Amplifiers* [online], [cit. 20.5.2021] Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1311.pdf?ts=1622982223808&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [10] TEXAS INSTRUMENTS, *SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers* [online], [cit. 20.5.2021] Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd232.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1622982333481&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F

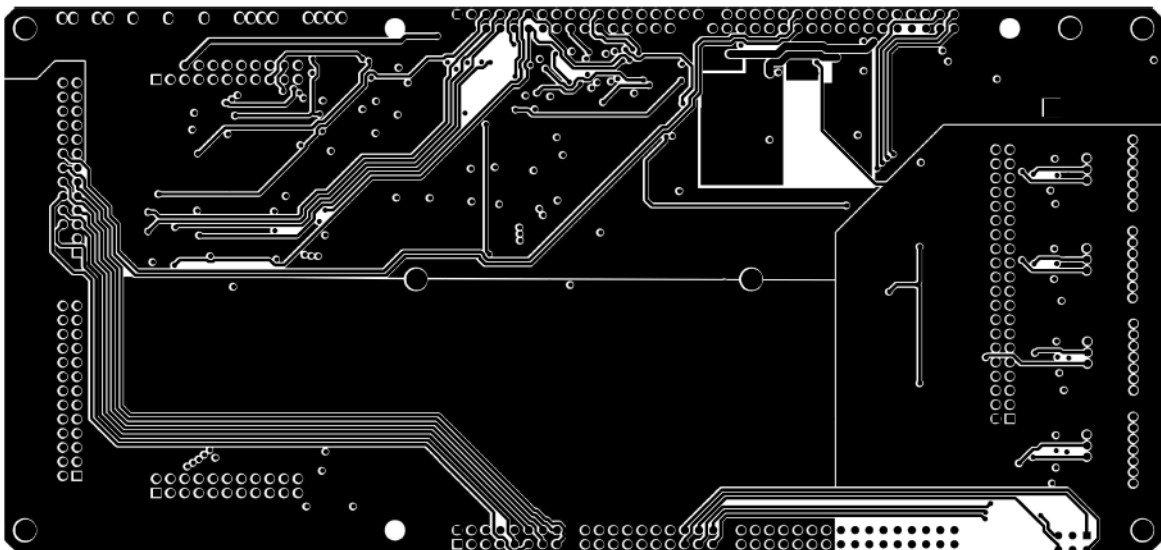
- [11] MICREL, *MIC2514 Integrated High-Side Switch* [online], [cit. 20.5.2021]
Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/mic2514-1760079.pdf>
- [12] TEXAS INSTRUMENTS, *CMOS Hex Schmitt Triggers* [online], [cit. 20.5.2021]
Dostupné z: <https://riceproject.fel.zcu.cz/Altium/PDF/Semiconductor/Logic/LevelShifter/CD40106B.pdf>
- [13] KLAUZ Milan, *Gerber data bez tajemství* [online], [cit. 4.6.2021] Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/cad-cam-cae/id:3068/gerber-data-bez-tajemstvi>
- [14] ARTWORK CONVERSION SOFTWARE, *ODB++ Translators and Processors for ODB++* [online], [cit. 4.6.2021] Dostupné z: https://www.artwork.com/odb++/odb++_overview.htm
- [15] MULTI-CIRCUIT-BOARDS, *Materials Default Values - FR4* [online], [cit. 4.6.2021] Dostupné z: https://www.multi-circuit-boards.eu/fileadmin/user_upload/downloads/leiterplatten_design-hilfe/e_multi_cb_material-standard-values.pdf

Přílohy

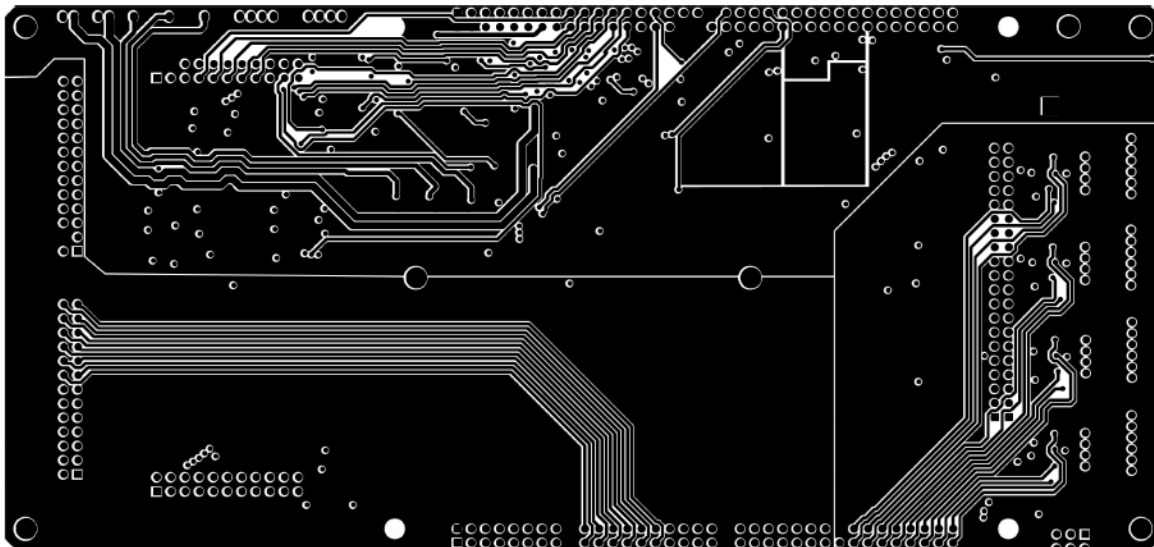
Příloha A: DPS - Gerber vrchní strany



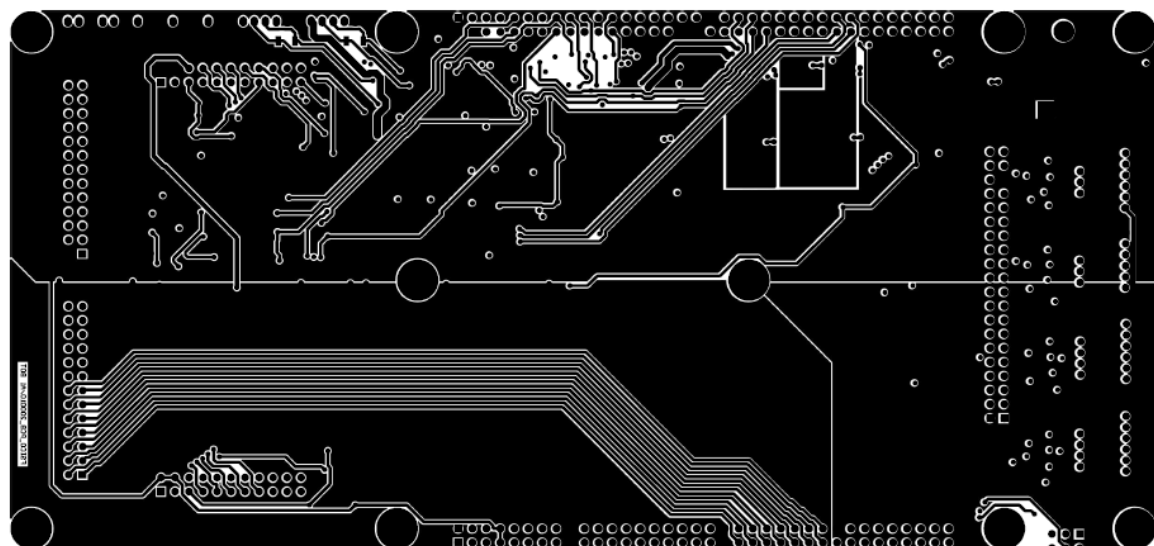
Příloha B: DPS - Gerber vnitřní strany 1



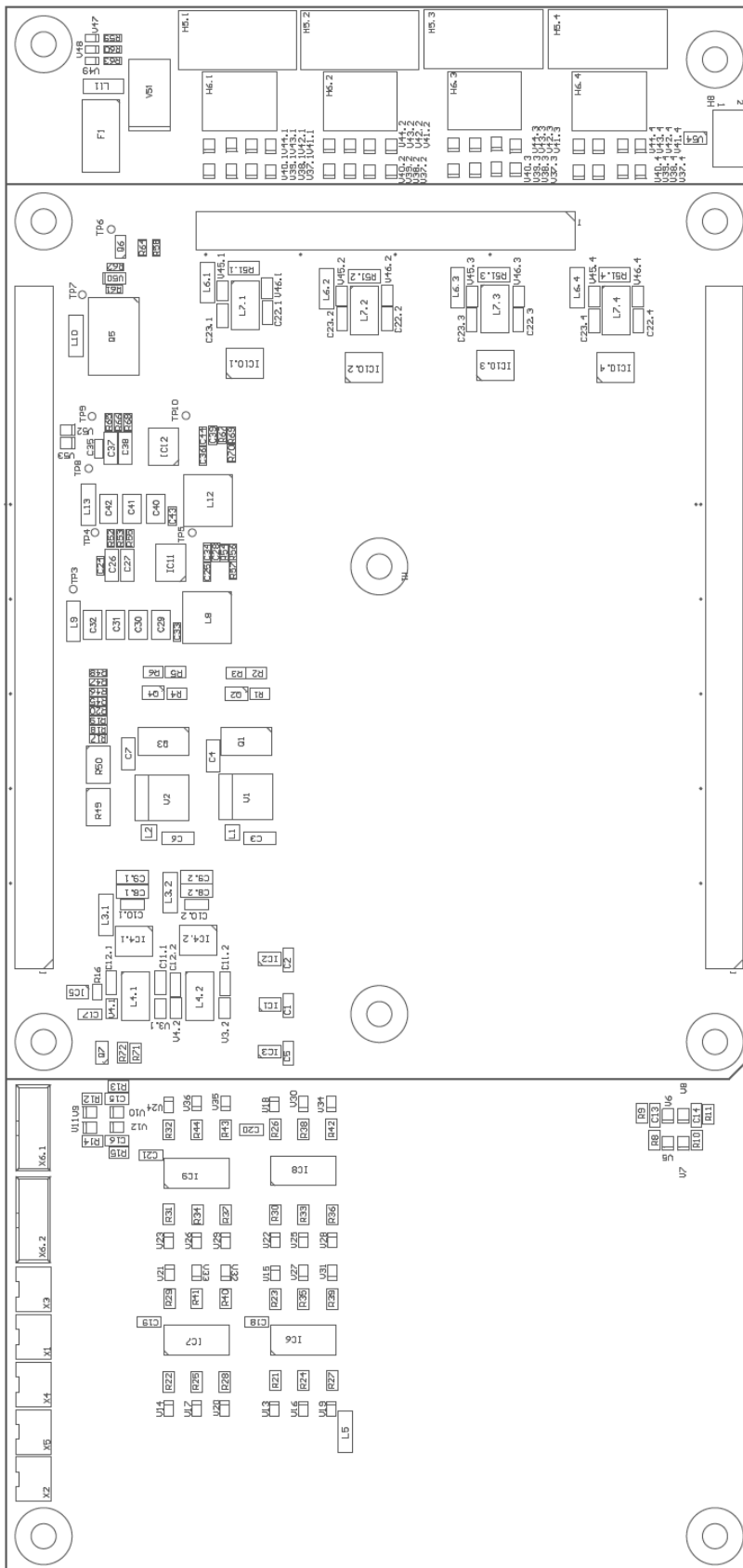
Příloha C: DPS - Gerber vnitřní strany 2



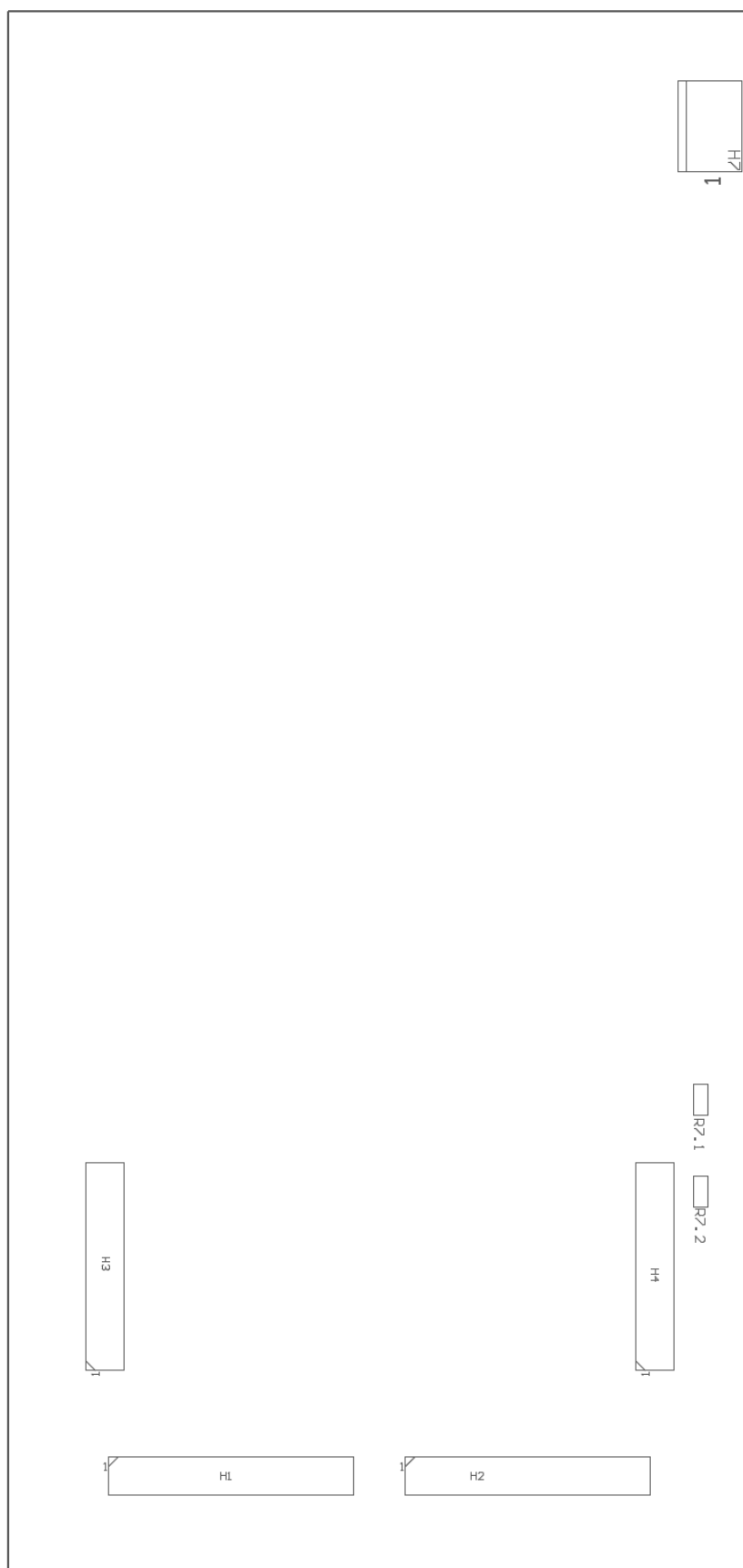
Příloha D: DPS - Gerber spodní strany



Příloha E: DPS – rozmístění součástek vrchní strany



Příloha F: DPS – rozmístění součástek spodní strany



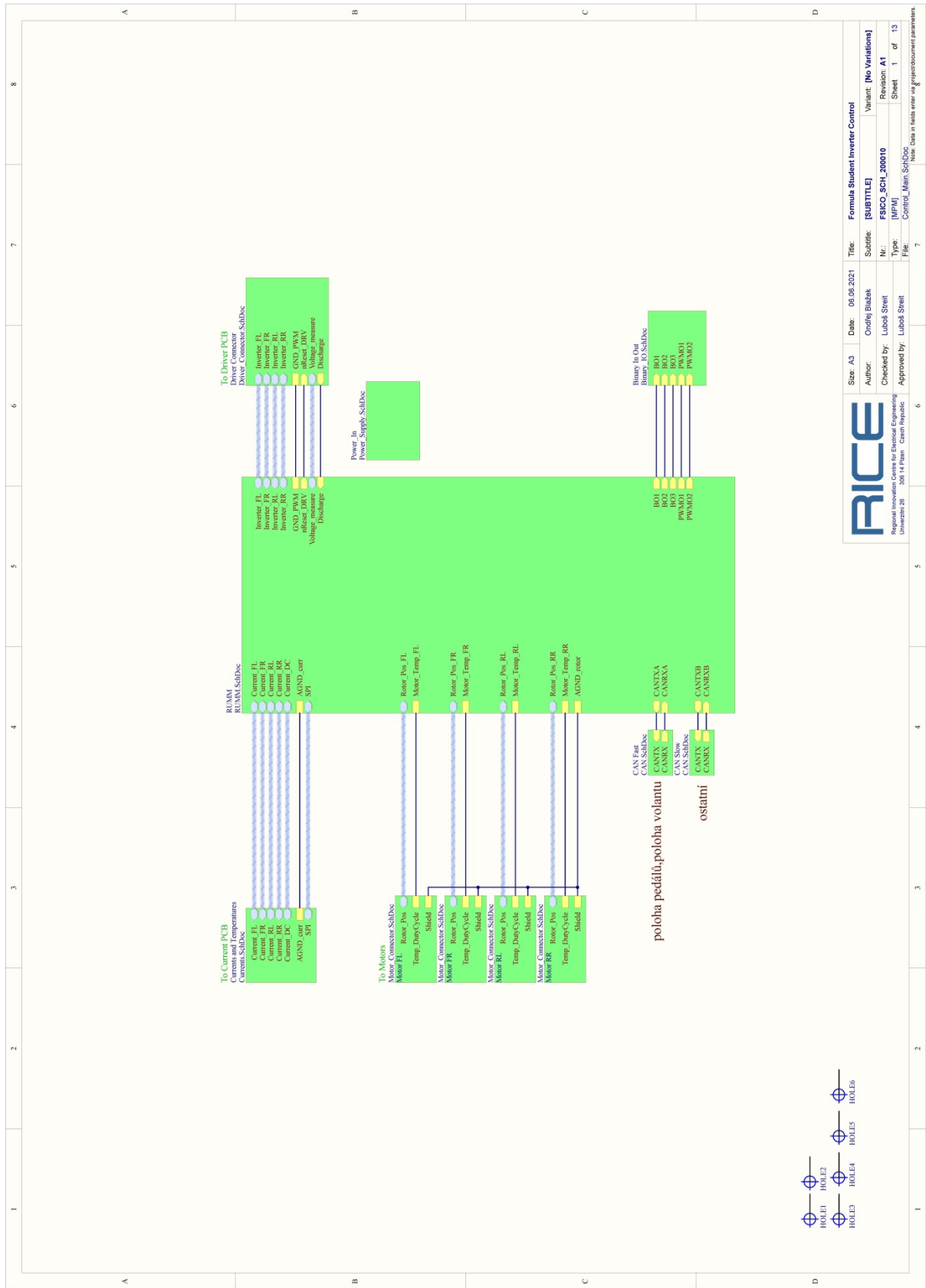
Příloha G – BOM (Bill of materials)

Číslo součástky	Popis	Označení	Výrobce	Výrobní číslo	Počet
CAP_000028	CAP CER 100p 50V C0G 5% 0603	C28, C39	Murata	GRM1885C1H101JA01D	2
CAP_000047	CAP CER 220p 100V C0G 5% 0805	C11.1, C11.2, C12.1, C12.2, C22.1, C22.2, C22.3, C22.4, C23.1, C23.2, C23.3, C23.4	TDK Corporation	C2012C0G2A221J	12
CAP_000158	CAP CER 100n 50V X7R 10% 0603	C24, C33, C35, C43	Murata	GRM188R71H104KA93D	4
CAP_000159	CAP CER 100p 16V X7R 10% 0805	C13, C14, C15, C16	AVX	0805YC101KAT2A	4
CAP_000228	CAP CER 100n 50V X7R 10% 0805	C1, C2, C5, C10.1, C10.2, C17, C18, C19, C20, C21	AVX	08055C104KAT2A	10
CAP_000381	CAP CER 1.0UF 16V X7R 10% 0603	C25, C36	TDK Corporation	C1608X7R1C105K	2
CAP_000409	CAP CER 10u 35V X7R 10% 1206	C3, C4, C6, C7, C8.1, C8.2, C9.1, C9.2, C26, C27, C37, C38	Taiyo Yuden	GMK316AB7106KL-TR	12
CAP_000420	CAP CER 10.0uF 10V X5R 20% 0603	C34, C44	TDK Corporation	C1608X5R1A106M	2
CAP_000589	CAP CER 22UF 25V X7R 20% 1210	C29, C30, C31, C32	Kemet	C1210C226M3RACTU	4
CAP_000636	CAP CER 47UF 10V X7R 10% 1210	C40, C41, C42	Murata	GRM32ER71A476KE15L	3
CON_000012	CON 3x2pin header 100mill 5,4mm	H11	Fischer Elektronik	SL2211206G	1
CON_000039	CON Receptacle 2x20 100 mils	H10	Fischer Elektronik	BL640	1
CON_000062	CON Receptacle 2x36 100 mils	H8, H9	Fischer Elektronik	BL672	2
CON_000137	CON JST, header, THT, 2mm, 20mOhm, max 2A, 100V	H6.1, H6.2, H6.3, H6.4	JST	S4B-PH-K-S (LF)(SN)	4
CON_000140	CON JST, header, THT, 2mm, 20mOhm, max 2A, 100V	H5.1, H5.2, H5.3, H5.4	JST	S7B-PH-K-S (LF)(SN)	4
CON_000156	CON Header VERT, Male Pins, Pins 2, 12A, 250V, Pitch 200 mil, large pads	H7	Phoenix	1755736	1
CON_000270	CON JST, header, THT, 2mm, 20mOhm, max 2A, 100V	X1, X2, X3, X4, X5	JST	B2B-PH-K-S(LF)(SN)	5
CON_000289	CON Receptacle 2x11 100 mils	H3, H4	Fischer Elektronik	BL622	2
CON_000294	CON Receptacle 2x13 100 mils	H1, H2	Fischer Elektronik	BL626	2
CON_000538	CON JST, direct header, THT, 2mm, 20mOhm, max 2A, 100V	X6.1, X6.2	JST	B5B-PH-K-S(LF)(SN)	2
DIO_000031	DIO schottky 60V 3A	V1, V2	DIODES incorporated	B360-13-F	2
DIO_000048	DIO Diode zener 12V; 500mW; SOD123	V50	DIODES incorporated	MMSZ5242B	1

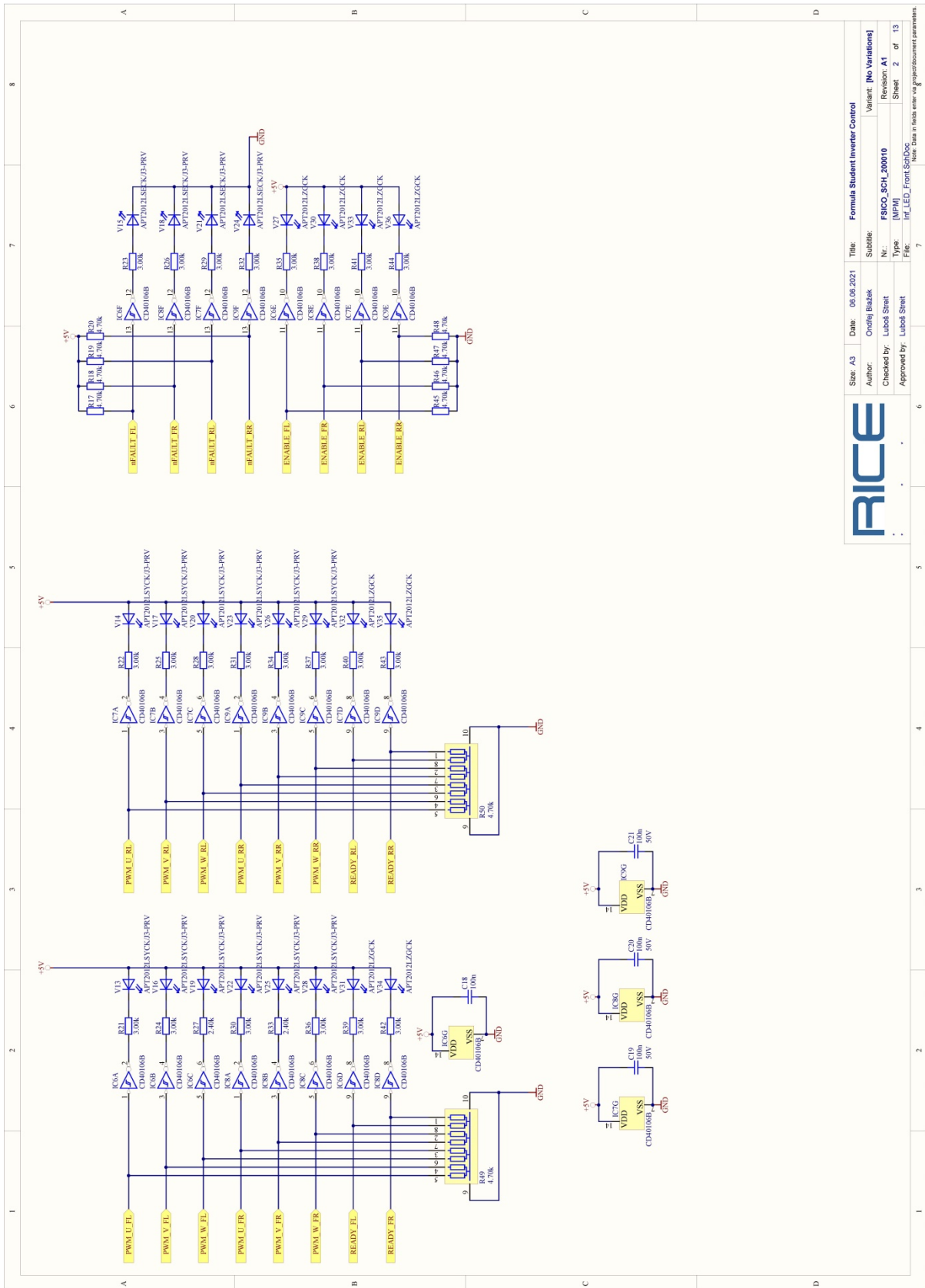
Číslo součástky	Popis	Označení	Výrobce	Výrobní číslo	Počet
DIO_000090	DIO low leakage diode Ir=5nA 75V 200mA SOD323	V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12, V37.1, V37.2, V37.3, V37.4, V38.1, V38.2, V38.3, V38.4, V39.1, V39.2, V39.3, V39.4, V40.1, V40.2, V40.3, V40.4, V41.1, V41.2, V41.3, V41.4, V42.1, V42.2, V42.3, V42.4, V43.1, V43.2, V43.3, V43.4, V44.1, V44.2, V44.3, V44.4, V52, V53	NXP	BAS416	42
EMI_000022	EMI 1806 180R/ 100MHz 3000mA 0,025R	L9, L10, L11, L13	Murata	BLM41PG181SN1D	4
EMI_000023	EMI 1806 470R/ 100MHz 2000mA 0,05R	L3.1, L3.2, L5, L6.1, L6.2, L6.3, L6.4	Murata	BLM41PG471SN1D	7
EMI_000034	EMI cm 300R/ 100MHz 300mA 0,16R WESL1/Wurth	L4.1, L4.2, L7.1, L7.2, L7.3, L7.4	Würth Elektronik	744212510	6
ICS_000031	ICS CAN transceiver 3.3V 8-SOIC	IC4.1, IC4.2	Texas Instruments	SN65HVD232D	2
ICS_000225	ICS schmitt noninverting, single gate	IC5	Texas Instruments	SN74LVC1G17DBVR	1
ICS_000360	ICS high side switch 13,5V 1A	IC1, IC2, IC3	Micrel	MIC2514YM5	3
ICS_000466	ICS RS485 transceiver 3,3V 8-SOIC	IC10.1, IC10.2, IC10.3, IC10.4	Texas Instruments	SN65HVD75D	4
ICS_000524	ICS CMOS Hex Smitt Triger	IC6, IC7, IC8, IC9	Texas Instruments	CD40106BM96	4
ICS_000689	ICS Step down converter, Ui=4.5-36V, Iout=3A	IC11, IC12	Texas Instruments	LMR23630ADDAR	2
IND_000026	IND 100u 214mA 2x2mm iron powder	L1, L2	Coilcraft	XPL2010-104MLB	2
IND_000083	IND 10u 3A 6.8x6.5mm iron powder	L8, L12	Vishay	IHLP2525CZER100M01	2
MOD_000036	Mixed module with TMS320F28377S and EP3C25	M1	University of West Bohemia	RUMM_170095	1
OPT_000005	OPT LED green 570nm 2mA 3,92mcd 0603	V47, V48, V49	OSRAM	LG L29K-G2J1-24-Z	3
OPT_000082	OPT LED yellow, 2mA, 25mcd	V13, V14, V16, V17, V19, V20, V22, V23, V25, V26, V28, V29	kingbright	APT2012LSYCK/J3-PRV	12
OPT_000084	OPT LED red, 2mA, 40mcd	V15, V18, V21, V24	kingbright	APT2012LSECK/J3-PRV	4
OPT_000085	OPT LED green, 2mA, 50mcd	V27, V30, V31, V32, V33, V34, V35, V36	kingbright	APT2012LZGCK	8
PDV_000005	Varistor 0805 12V 0,1J bidir	V3.1, V3.2, V4.1, V4.2, V45.1, V45.2, V45.3, V45.4, V46.1, V46.2, V46.3, V46.4	AVX	VC080512A250DP	12

Číslo součástky	Popis	Označení	Výrobce	Výrobní číslo	Počet
PDV_000015	Fuse 8AT 125VDC +holder Littelfuse HF154	F1	Littelfuse Inc.	0154008.DR	1
PDV_000069	PDV ESD - Rail Clamp Array	V54	Littelfuse Inc.	SRV05-4HTG	1
PDV_000119	TVS 30V 1500V 5% unidir	V51	Littelfuse Inc.	TP1.5KE30A	1
RES_000073	RES 0603 1.00k 1% 100ppm SMD thick film	R60	Panasonic	ERJ3EKF1001V	1
RES_000077	RES 0603 1.50k 1% 100ppm SMD thick film	R70	Panasonic	ERJ3EKF1501V	1
RES_000080	RES 0603 2.00k 1% 100ppm SMD thick film	R56	Panasonic	ERJ3EKF2001V	1
RES_000081	RES 0603 2.20k 1% 100ppm SMD thick film	R57, R59, R63	Panasonic	ERJ3EKF2201V	3
RES_000089	RES 0603 4.70k 1% 100ppm SMD thick film	R17, R18, R19, R20, R45, R46, R47, R48	Panasonic	ERJ3EKF4701V	8
RES_000097	RES 0603 10.0k 1% 100ppm SMD thick film	R64, R69	Panasonic	ERJ3EKF1002V	2
RES_000113	RES 0603 47.0k 1% 100ppm SMD thick film	R54, R58, R67	Panasonic	ERJ3EKF4702V	3
RES_000121	RES 0603 100k 1% 100ppm SMD thick film	R55, R61, R62, R68	Panasonic	ERJ3EKF1003V	4
RES_000149	RES 0603 1.50M 1% 100ppm SMD thick film	R52, R53, R65, R66	Panasonic	ERJ3EKF1504V	4
RES_000221	RES 0805 120R 1% 100ppm SMD thick film	R2, R5, R71	Panasonic	ERJ6ENF1200V	3
RES_000249	RES 0805 1.80k 1% 100ppm SMD thick film	R8, R10, R12, R14	Panasonic	ERJ6ENF1801V	4
RES_000252	RES 0805 2.40k 1% 100ppm SMD thick film	R27, R33	Panasonic	ERJ6ENF2401V	2
RES_000254	RES 0805 3.00k 1% 100ppm SMD thick film	R21, R22, R23, R24, R25, R26, R28, R29, R30, R31, R32, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44	Panasonic	ERJ6ENF3001V	22
RES_000255	RES 0805 3.30k 1% 100ppm SMD thick film	R3, R6, R72	Panasonic	ERJ6ENF3301V	3
RES_000256	RES 0805 3.60k 1% 100ppm SMD thick film	R9, R11, R13, R15	Panasonic	ERJ6ENF3601V	4
RES_000259	RES 0805 4.70k 1% 100ppm SMD thick film	R1, R4, R16	Panasonic	ERJ6ENF4701V	3
RES_000391	RES 1206 120R 1% 100ppm SMD thick film	R7.1, R7.2, R51.1, R51.2, R51.3, R51.4	Panasonic	ERJ8ENF1200V	6
RES_000519	RES array 1608 4.70k 5% 200ppm SMD thick film	R49, R50	Panasonic	EXB-E10C472J	2
TRA_000020	TRA NPN 50V 100mA SOT23	Q6	Fairchild	BC847BMTF	1
TRA_000031	signal NMOS 30V 75mOhm 2.1nC	Q2, Q4, Q7	Vishay	SI2304DDS-T1-GE3	3
TRA_000034	TRA PMOS 40V 6.7A 44mOhm 21nC DPAK	Q5	Fairchild	FDD4243	1
TRA_000100	TRA MOSFET, N CH, 100V, 3.3A + Diode SOT223I	Q1, Q3	On Semiconductor	FDT86113LZ	2

Příloha H: Blokové schéma obvodového řešení



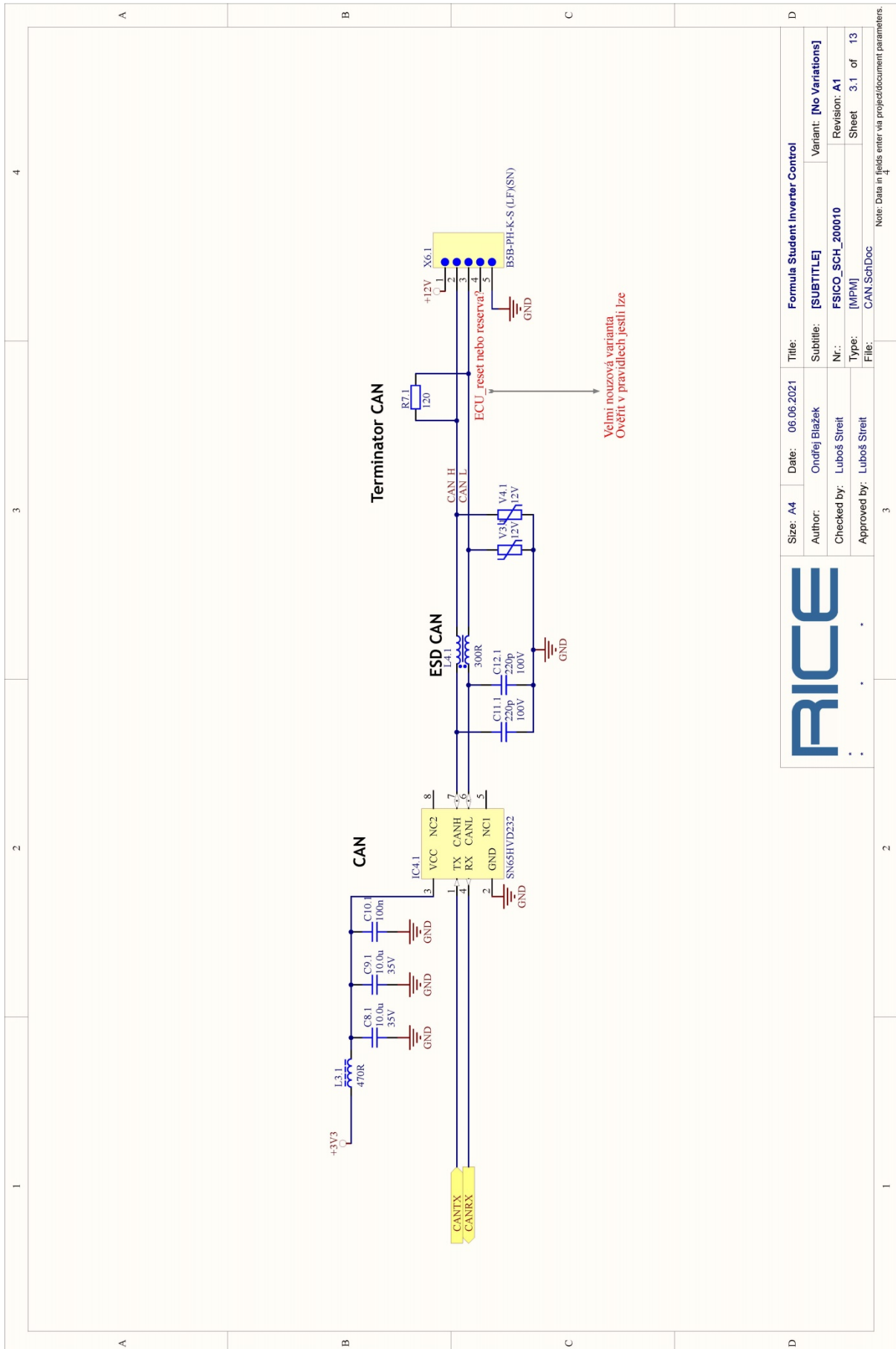
Příloha I : Schéma signalizačních LED



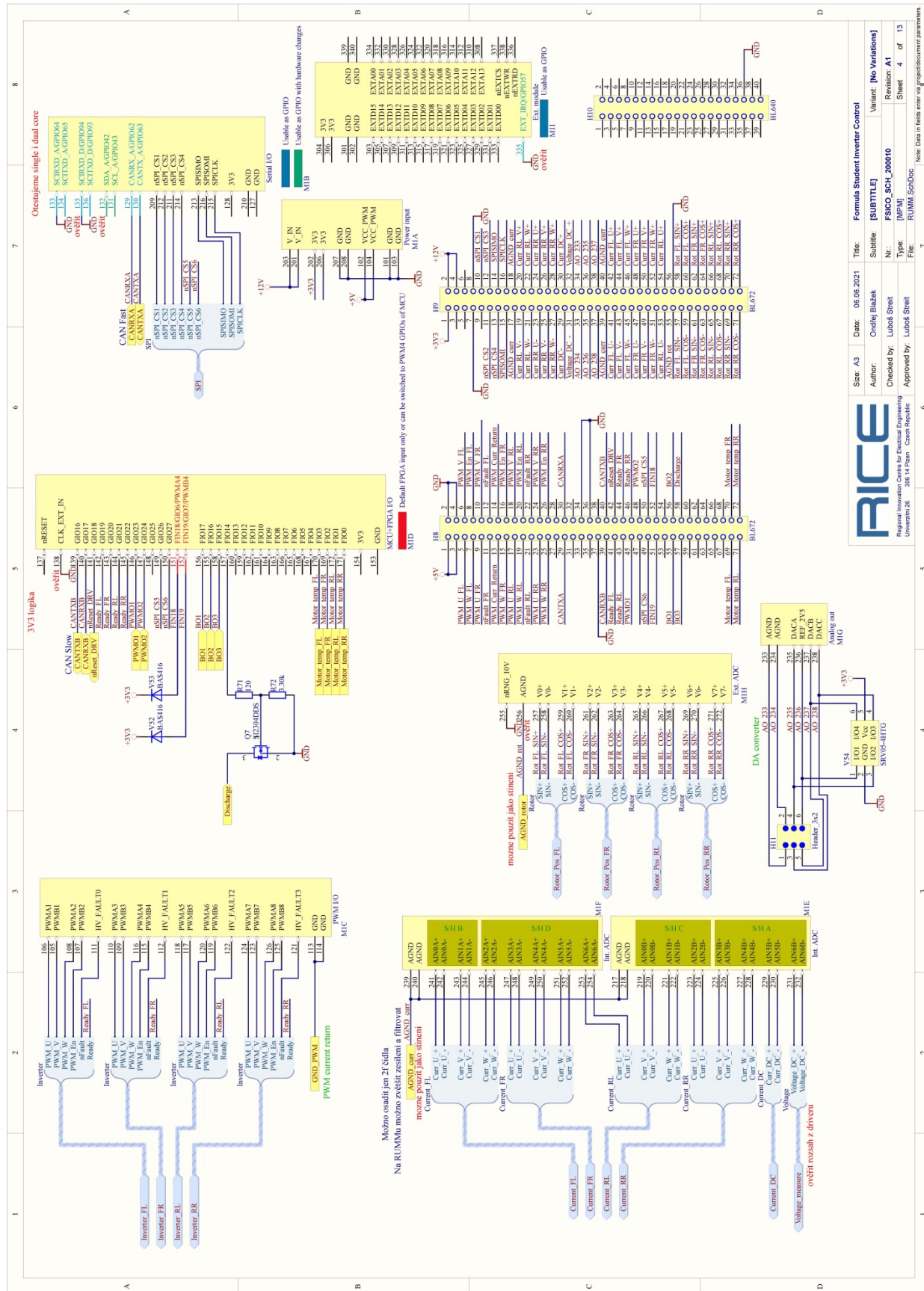
Size: A3	Date: 06.05.2021	Title: Formuła Student Inverter Control	Variant: [No Variations]
Author: Ondřej Blažek	Subtitle:	Nr.: FSICO_SCH_200010	Revision: A1
Checked by: Luboš Štíhl	Type: [IMPA]	Sheet: 2 of 13	
Approved by: Luboš Štíhl	File: IRL_LED_Front_SchDoc	Note: Data in cells enter via spreadsheet parameters	



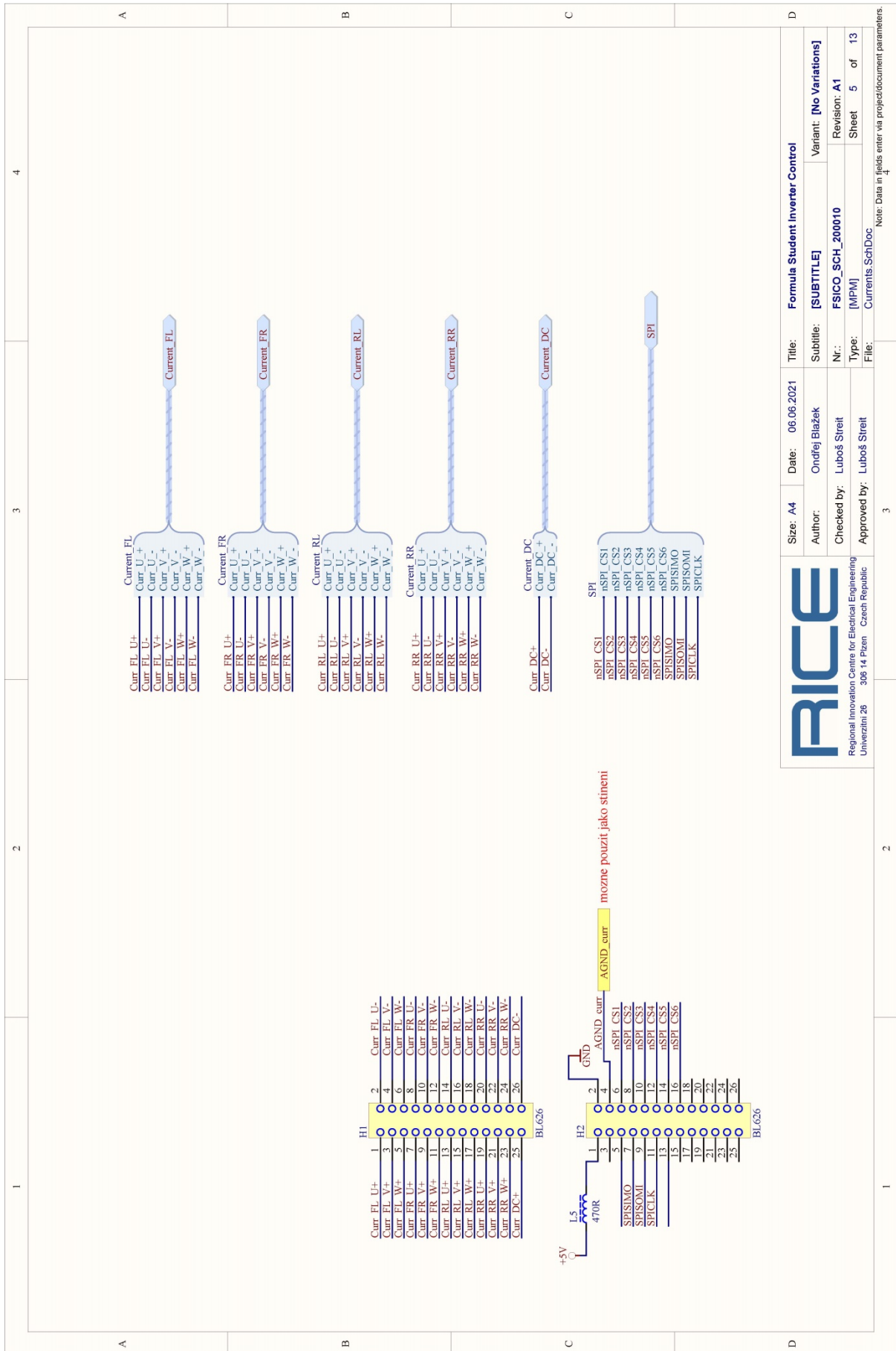
Příloha J: Schéma sběrnice CAN



Příloha K: Schéma zapojení řídicí jednotky RUMM



Příloha L: Schéma zapojení pro měření proudů

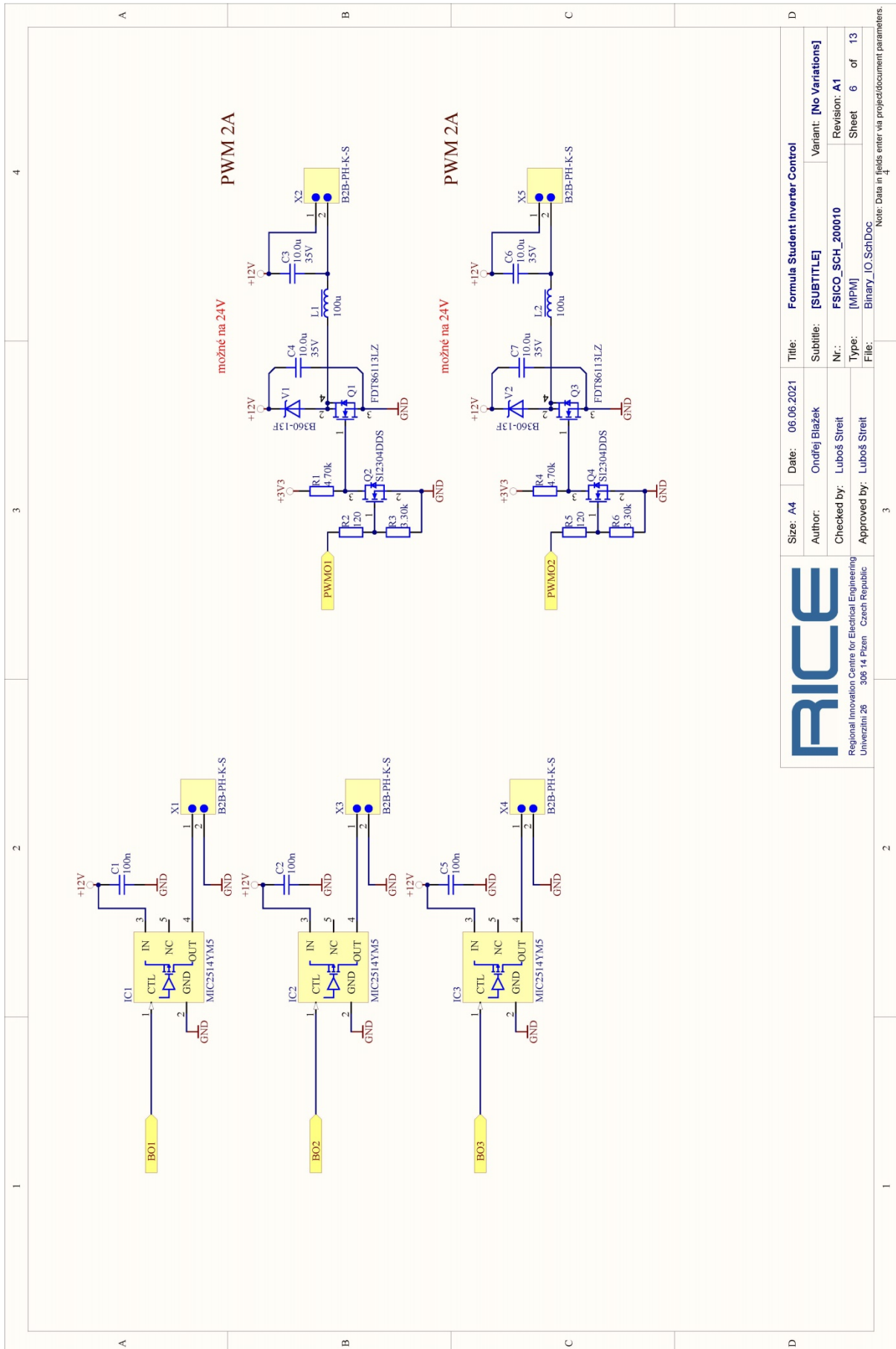


Size: A4	Date: 06.06.2021	Title: Formula Student Inverter Control
Author: Ondřej Blažek	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Streit	Nr.: FSICO_SCH_200010	Revision: A1
Approved by: Luboš Streit	Type: [MPM]	Sheet 5 of 13
	File: Currents.SchDoc	

Note: Data in fields enter via project/document parameters.



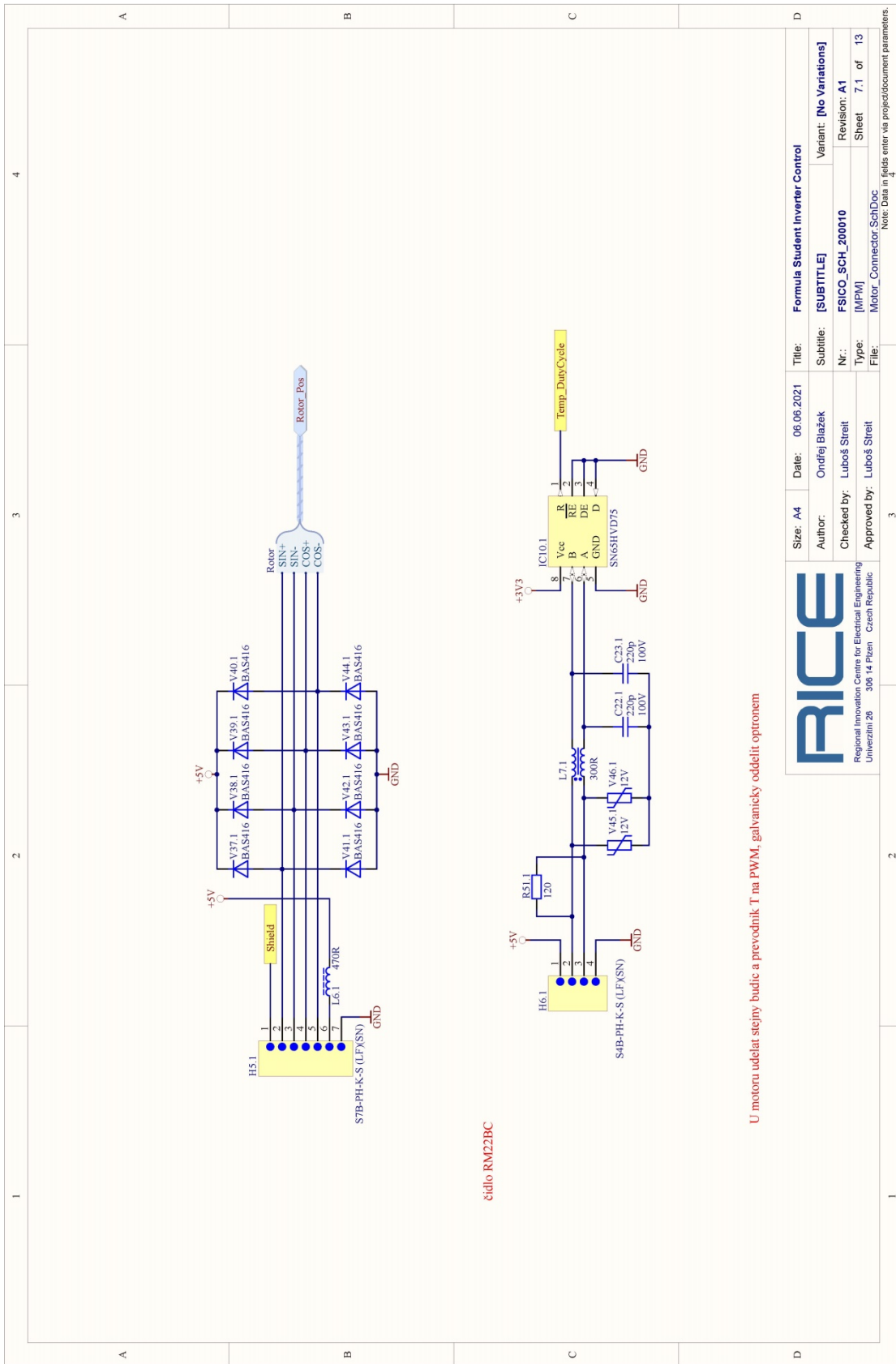
Příloha M: Schéma zapojení binárních obvodů



Regional Innovation Centre for Electrical Engineering
 Univerzity 26 306 14 Pízen Czech Republic

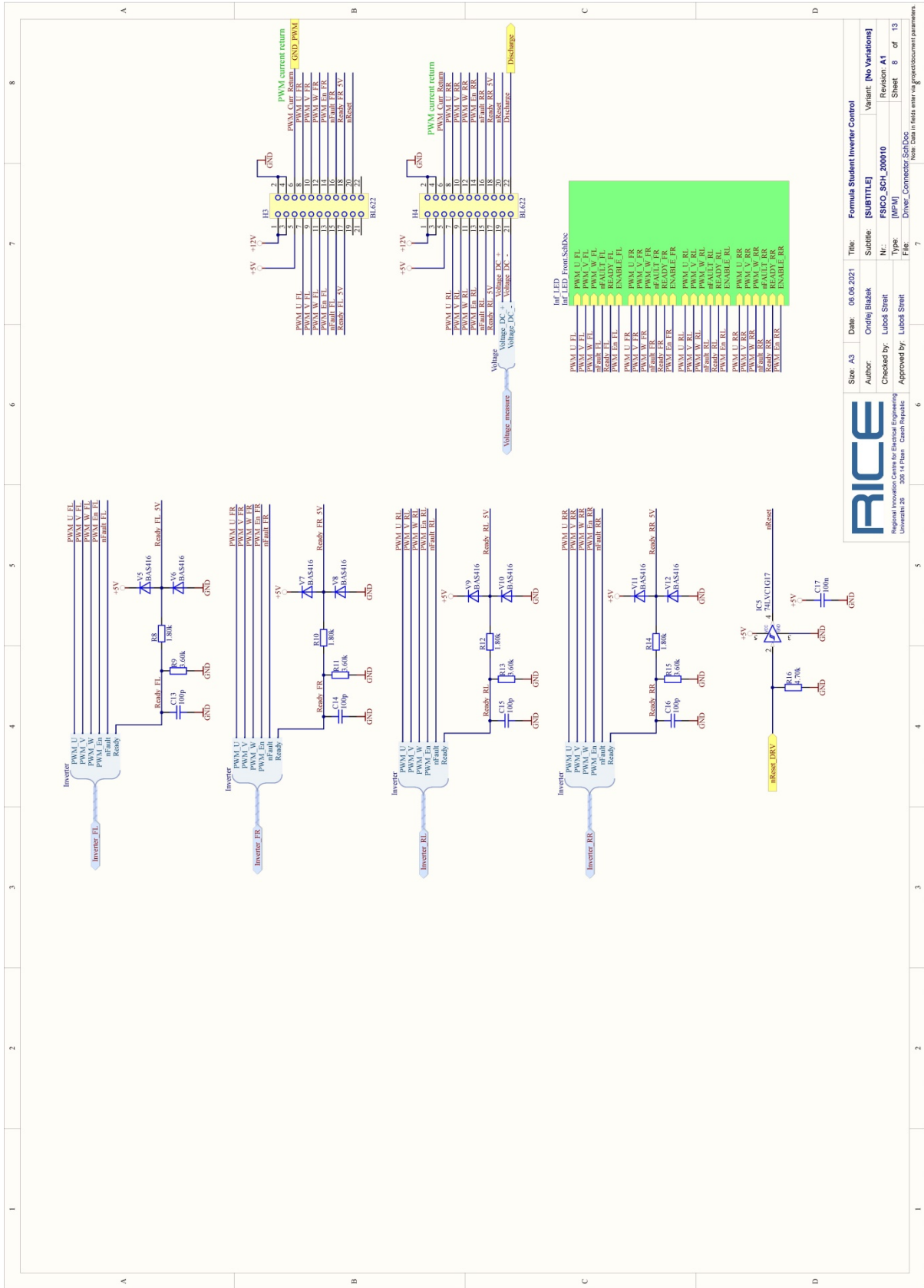
Size: A4	Date: 06.06.2021	Title: Formula Student Inverter Control
Author: Ondřej Blažek	Subtitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Streit	Nr.: FSICO_SCH_200010	Revision: A1
Approved by: Luboš Streit	Type: [MPM]	Sheet 6 of 13
	File: Binary_IO.Sch.Doc	Note: Data in fields enter via project/document parameters.

Příloha N: Schéma zapojení pro měření poloh rotorů a teplot vinutí



U motoru udelet stejny budic a prevodnik T na PWM, galvaniicky oddelit optromem

Příloha O: Schéma zapojení signálů pro drivery



Size: A3	Date: 06.05.2021	Title: Formula Student Inverter Control
Author: Ondřej Blažek	SubTitle: [SUBTITLE]	Variant: [No Variations]
Checked by: Luboš Štáhl	Nr.: FSICO_SCH_200010	Revision: A1
Approved by: Luboš Štáhl	Type: [MPM]	Sheet: 8 of 13
	File: Drive_Connector_SchDoc	

Notes: Data in cells enter via spreadsheet parameters.

Příloha P: Schéma zapojení napájecích zdrojů

