



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚNIČ PRO MOTORY FORMULE STUDENT

MOTOR INVERTER FOR FORMULA STUDENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Maroš Macko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Maroš Macko

ID: 211233

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Měnič pro motory Formule Student

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je návrh výkonného měniče pro VUT studentskou formuli. Napájení systému je tvořeno bateriemi o napětí 600 V, které pohání dva synchronní motory s permanentními magnety (PMSM). V rámci návrhu se zaměřte na výkonovou spínací část a řídicí nízkonapěťovou logiku. Pro komunikaci s dalšími jednotkami použijte sběrnici CAN, pro diagnostiku a konfiguraci jednotky využijte rozhraní ethernet. Celý systém musí splňovat podmínky soutěže Formule Student.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 23.5.2023

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

doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá výkonovým meničom pre trakčné motory monopostu Formula Student. Súčasť práce je návrh a implementácia tohoto systému. Je popísaný návrh hlavných vysokonapäťových dosiek a výber vhodných súčiastok. Ďalej je navrhnutá pomocná doska, ktorá má na starosti komunikáciu a meranie diagnostických veličín. Systémy musia spĺňať pravidlá súťaže Formuly Student.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Výkonový menič, trakčný systém, PMSM, IGBT, Formula Student, TU Brno Racing

ABSTRACT

This thesis is focused on a power inverter for traction motors for Formula Student car. Part of the work involves the design and implementation of this system. The main high-voltage power board design and the selection of suitable components are described. Furthermore, a secondary board is designed, which is used for communication and diagnostic measurements. All systems must comply with the rules of the Formula Student competition.

KEYWORDS

Power inverter, traction system, PMSM, IGBT, Formula Student, TU Brno Racing

MACKO, Maroš. *Měnič pro motory Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2023, 118 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Maroš Macko
VUT ID autora: 211233
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečnéj práce: Měníč pro motory Formule Student

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

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

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie a podnetné návrhy k práci. Tiež by som sa chcel poďakovať tímu TU Brno Racing – obzvlášť členom sekcie Electric Powertrain, Software and Driverless a Drivetrain and Cooling. Vďaka patrí aj tímovým sponzorom za finančnú podporu, bez ktorých by táto práca nevznikla. Osobitne ďakujem firme siliXcon s.r.o. za konzultácie, ako aj za poskytnutie a úpravu firmvéru pre naše účely. V neposlednom rade ďakujem bratovi Martinovi za pomoc pri renderovaní umeleckých náhľadov DPS.

Obsah

Úvod	11
1 Motivácia	12
1.1 Dragon e1 (eD1)	12
1.2 Dragon e2 (eD2)	13
1.3 Požiadavky pre Dragon e3 (eD3)	16
2 Návrh systému a schém	18
2.1 Topológia systému	18
2.2 Topológia spínania	19
2.3 Výber spínacieho tranzistora	19
2.4 Výber komponentov a návrh subsystému HVPB	21
2.5 Výber komponentov a návrh subsystému SCM	28
2.6 Návrh kondenzátorovej dosky medziobvodu	33
2.7 Prednabíjanie kondenzátorov	37
2.8 Vybíjanie kondenzátorov	41
2.9 Umiestnenie meniča	45
2.10 Snímanie polohy motora	49
2.11 Výpočet mŕtveho času spínania	50
3 Návrh dosiek plošných spojov	52
3.1 Skladba DPS	52
3.2 Cena systému meniča	55
4 Implementácia systému	56
4.1 Príprava na použitie v súťaži Formula Student	56
4.2 Osadzovanie	56
4.3 Firmvér pre systém SCM	58
4.4 Oživovanie a testovanie vysokonapätovej časti	59
4.5 Detekcia a ladenie parametrov	60
4.6 Plány na zlepšenie systému pre Dragon e4	64
Záver	65
Bibliografia	66
Zoznam symbolov a skratiek	72
Zoznam veličín	75

Zoznam príloh	76
A Schéma systému HVPB	77
B Schéma systému SCM	94
C Verejný katalógový list meniča	104
D Predvýrobný náhľad dosky HVPB	109
E Preklad relevantných pravidiel	114

Zoznam obrázkov

1	Odhalenie monopostu Dragon e3 (2022/2023).	11
1.1	Výkonová časť meniča TG Drives, detail na IGBT tranzistor.	12
1.2	Motor Fischer (s prevodovkou pre eD3).	14
1.3	Náhľad dosky HVPB monopostu eD2 (bez nízkonapäťovej dcérskej dosky).	15
1.4	Kompletný menič monopostu eD2.	15
2.1	Blokový diagram systému meniča pre eD3.	18
2.2	Blokový diagram vysokonapäťovej cesty meniča.	19
2.3	3D náhľad DPS Isoloop.	25
2.4	3D náhľad hornej strany DPS systému HVPB.	27
2.5	Citlivosť meraného NTC termistora s prepínaným zosilnením PGA.	31
2.6	3D náhľad hornej strany DPS systému SCM.	32
2.7	Závislosť zvlnenia napätia na kapacite medziobvodu.	34
2.8	3D náhľad kondenzátorovej dosky.	36
2.9	Závislosť maximálneho výkonu prednabíjacieho rezistora na dobe impulzu.	40
2.10	Vybíjací odpor L50J10KE.	42
2.11	Schéma riadenia odpájania vybíjacieho odporu.	43
2.12	Rez auta a pohľad na menič (modrá farba) z boku.	46
2.13	Náhľad rozloženia konektorov a kabeláže v meniči.	46
2.14	Rez auta a pohľad na menič (modrá farba) spredu.	47
2.15	Dáta z merania EMI prúdovou sondou R&S EZ-17 pre analógový signál polohy tlmiča pre náklon.	48
2.16	Priebeh (spracovaného) výstupu diferenčného sin/cos enkodéru.	50
3.1	Skladba štvorvrstvej dosky POOL servisu firmy Gatema.	52
3.2	Výpočet šírky ciest pre ethernet v programe Altium Designer.	53
3.3	Nastavenie odstupe vysokonapäťových ciest v programe Altium Designer.	54
4.1	Proces lisovania (press-fit) výstupných konektorov.	57
4.2	Prostredie STM32CubeMX pri úprave konfigurácie systému SCM.	58
4.3	Testovanie a verifikácia meniča s motorom.	59
4.4	Kalibrácia senzora a meranie BEMF príkazom identrun.	63
4.5	Časová závislosť merania napätia na fázach.	64

Zoznam tabuliek

1.1	Porovnanie parametrov motorov.	16
1.2	Súhrn špecifikácii a požiadavok na menič eD3.	17
2.1	Vybrané parametre potenciálneho modelu SiC MOSFET[12] a Si IGBT[13].	21
2.2	Porovnanie senzorov na meranie fázových prúdov.	24
2.3	Výpočet ekvivalentného odporu TS.	37
2.4	Súhrn údajov potrebných k výpočtu prednabíjacieho odporu.	38
2.5	Porovnanie vlastného prednabíjacieho odporu s komerčným riešením.	40
2.6	Vybrané parametre tranzistora UF3N170400B7S (pri 25 °C).	42
2.7	Súhrn špecifikácii a požiadavok na menič eD3.	47
2.8	Parametre pre výpočet deadtime.	50
3.1	Súhrn cien jednotlivých subsystémov.	55
E.2	Vyžadovaná vzdialenosť medzi TS a LVS	116

Úvod

Elektrický menič slúži na zmenu parametrov elektrickej energie – napätia, prúdu a frekvencie. Táto práca sa zaoberá vývojom výkonového dvojúrovňového meniča pre účely závodenia elektrickej formuly univerzitného tímu Formula Student TU Brno Racing. Systém je napájaný z 600 V batérie a napája dva motory s výkonom 35 kW typu PMSM (Permanent magnet synchronous motor – synchronný motor s permanentnými magnetmi). So zvyškom auta má menič komunikovať po zbernici CANbus a Ethernet. Musí tiež spĺňať všetky technické a bezpečnostné požiadavky Formula Student, aby systém a auto prešlo technickou kontrolou na súťažiach.

Formula Student (FS) je študentská súťaž, v ktorej je cieľom postaviť jednomiestne závodné auto formulového typu, ktoré je schopné závodit s ďalšími tímami po celom svete. Vznikla ako európska verzia americkej súťaže Formula SAE, ktorá funguje od roku 1981 a do Európy prišla v roku 1998. Súťaž nie je len o postavení čo najrýchlejšieho auta, ale takisto o obhájení celkového konceptu, cieľov a finančného plánovania. Tímy sú posudzované profesionálmi, dodávateľmi a výrobcami z oblasti automobilového priemyslu a motor-športu. [1]

TU Brno Racing funguje ako Formula Student tím už od roku 2010 pod záštitou Fakulty strojného inžinierstva VUT a každý rok od svojho vzniku postaví nové auto pre túto súťaž. Tím začal jazdiť s formulou na spaľovací motor, v roku 2019 začal aj s vývojom prototypu s elektrickým pohonom a túto sezónu (2022/2023) tím pracuje na vývoji tretej elektrickej formuly s názvom Dragon eD3. [2]



Obr. 1: Odhalenie monopostu Dragon e3 (2022/2023).

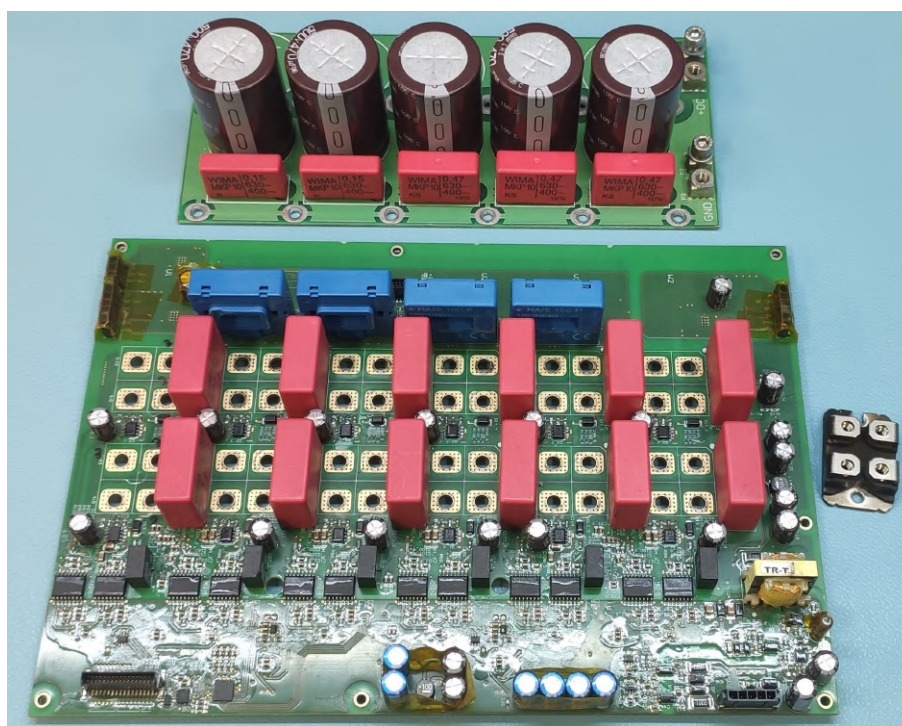
Dúfam, že táto práca nájde uplatnenie ako istý manuál a úvod do problematiky návrhu vysokonapäťového systému pre generácie nových nádejných členov tímu TU Brno Racing.

1 Motivácia

Pre požiadavky na nový výkonový menič tímu TU Brno Racing je vhodné prejsť si históriou riešení, ktoré sa používali v predchádzajúcich generáciách elektrickej formuly Dragon e1 a e2. Sledovaním ich funkčnosti a problémov mohli byť nasledovne stanovené ciele pre nový menič monopostu Dragon e3. Autor práce sa podieľal na modifikovaní, či implementovaní spomenutých riešení.

1.1 Dragon e1 (eD1)

Monopost Dragon e1 (eD1)[3] vznikal paralelne s vývojom poslednej spaľovacej formule tímu TU Brno Racing ako vedľajší projekt (tzv. proof-of-concept), kde bol cieľ zoznámiť sa s novými výzvami, ktoré prináša elektrifikácia vo svete Formula Student. Preto bola pre toto auto vybraná prestavba staršieho spaľovacieho monopostu Dragon 7 (D7)[4], kde sa zadná časť trubkového rámu znovu navrhla, aby sa do nej zmestila batéria a hnacie ústrojenstvo. Bol zvolený osobitný náhon kolies zadnej nápravy, t.j. dva motory a prevodovka, spojené s poloosou na kolesá.



Obr. 1.1: Výkonová časť meniča TG Drives, detail na IGBT tranzistor.

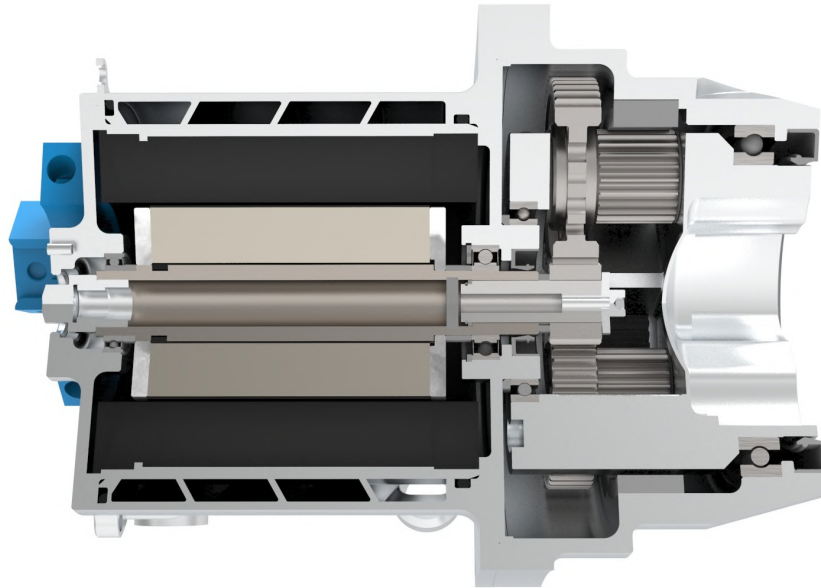
Pohon bol riešený s firmou TG Drives z Brna, ktorá tímu poskytla menič a motory. PMSM motory boli typu TGN6-2400-60-400/T5KX-S11 – parametre sú vypísané a porovnané s eD2 a eD3 v tabuľke 1.1. Menič pozostával z troch dosiek plošných

spojov (DPS) – riadiacej jednotky TGZ a experimentálnej 450 V výkonovej DPS (bez oficiálnej dokumentácie) s kondenzátorovou dcérskou doskou. Originálna kapacita 4700 μF (elektrolytické kondenzátory) + 3 μF (filmové kondenzátory) bola modifikovaná na 2350 μF + 3 μF z dôvodu šetrenia hmotnosti a náročnosti na pomocný prednabíjací a bezpečnostný vybíjací obvod. Namiesto kondenzátorov boli na dosku umiestnené prepäťové ochrany vo forme TVS diód a varistorov. Ďalšie vybrané parametre pohonu eD1 sú na porovnanie v tabuľke 1.2.

Na tranzistory bol tímom navrhnutý vodný chladič, ktorý bol pomerne objemný, keďže výkonová doska TG Drives pozostávala s diskretných IGBT tranzistorov (s integrovanou diódou). Cieľom do ďalších sezón bolo použitie tranzistora typu 6-pack, kde sú v jednom puzdre všetky tranzistory s diódami a integrovaným termistorom – to umožní menší a ľahší návrh chladiča.

1.2 Dragon e2 (eD2)

Monopost Dragon e2 môžeme nazvať prvou elektrickou formulou tímu TU Brno Racing, ktorá bola navrhnutá úplne od začiatku na mieru elektrickému pohonu. Preto sa aj zdvihli požiadavky na celkové mechanické vlastnosti auta. Dragon e1 vážil 217 kg, čím nepatrila medzi najľahšie Formula Student monoposty. Aj z tohoto dôvodu sa rozhodlo prejsť na motory od firmy Fischer (obr. 1.2), ktorá ich vyrába pre tímy formou polotovaru – dodávajú vinutie zaliaté do dodaného statoru, spolu s vývodmi na vodiče a s teplotným senzorom. Takisto nalepia magnety na rotor, ktorý im dodajú tímy. Vodný plášť, ako aj zvyšné časti motora (pripojenie na prevodovku, typ a spôsob upevnenia senzora polohy motora) je takisto v rukách jednotlivých tímov. Tieto motory majú nižší výkon ako motory na Dragon e1 (viď. porovnanie v tabuľke 1.1), keďže sú určené hlavne na umiestnenie priamo do všetkých štyroch kolies (tzv. hub motor). Dragon e2 ich ale používal iba na poháňanie zadnej nápravy, kde sa zachoval koncept prevodovky v monokoku (resp. v ráme eD1). Toto rozhodnutie bolo urobené hlavne z množstva nových a neznámych procesov potrebných na prechod na pohon všetkých štyroch kolies (kde je v podstate nevyhnutné mať motor v kolesách). Okrem motorov sa podstatne odľahčila batéria aj menič.

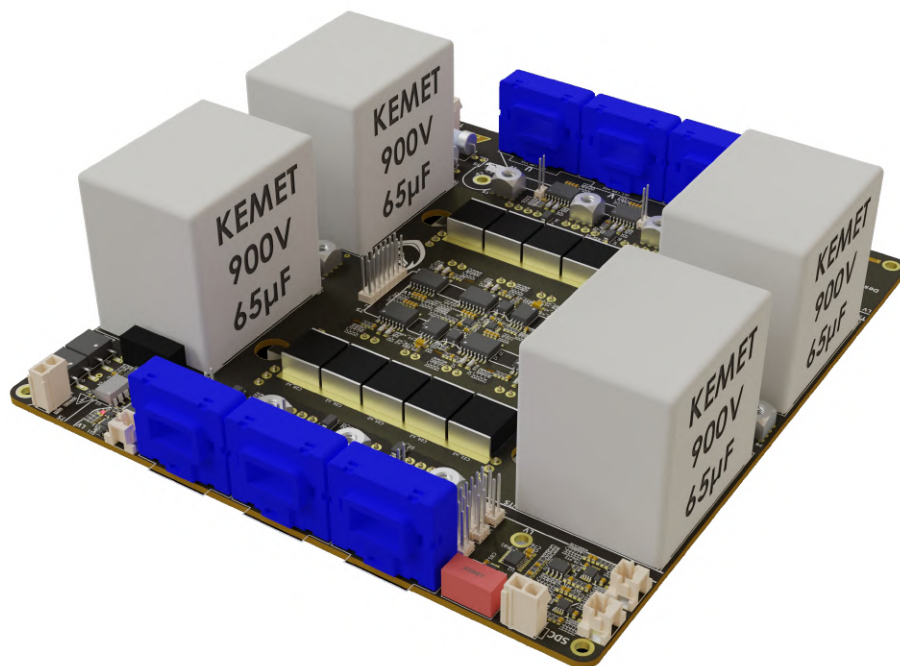


Obr. 1.2: Motor Fischer (s prevodovkou pre eD3).

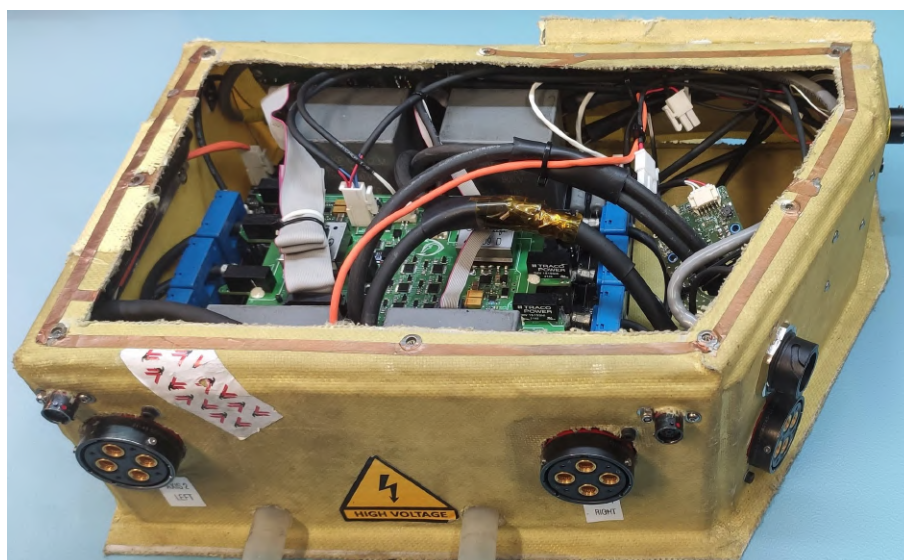
Keďže firma TG Drives v tej dobe nedisponovala meničom, ktorý by vyhovoval našim požiadavkám (napájacie napätie 600 V), dohodlo sa s nimi na kompromise – poskytli nám riadiacu dosku (FPGA s riadením motora, servisný Ethernet, CANbus, pripojenie enkodéra pre motor) a popis rozhrania s výkonovou doskou. Rozhranie pozostávalo z SPI zbernice (a na to určených zariadení, ktoré sa museli nachádzať na našej doske – SPI I/O expandéru a analógového multiplexeru), riadiacich PWM signálov a ďalších. Na základe tohoto rozhrania bol s minimálnymi limitáciami alebo pomocou od firmy TG Drives vytvorený autorom tejto práce istý predchodca návrhu pre monopost eD3.

Ak nerátame riadiacu dosku TGZ, menič pozostával z dvoch DPS. Vysokonapäťová doska s názvom HVPB (High voltage power board) obsahovala dva tranzistorové moduly (6-packy), kondenzátory pre vysokonapäťový medziobvod, budiče tranzistorov, analógový frontend pre meranie PT1000 čidiel a ďalšie. Pomocná doska LVPB (Low voltage power board) sa nachádzala nad doskou HVPB a poskytovala galvanicky izolované napájanie pre všetky budiče tranzistorov, napájanie pre všetky obvody z 24 V napájania auta, obvody pre generovanie mŕtveho času (angl. deadtime) pre tranzistory a pripojenie ďalších dosiek – TGZ a TSAL (Tractive system active light - kontrolka aktívneho trakčného systému). Celková kapacita medziobvodu bola 260 μF poskladaná paralelným spojením štyroch metalizovaných polypropylénových kondenzátorov priamo na doske plošných spojov.

Na tranzistory bol tímom navrhnutý vodný chladič, ktorý bol oproti meniču eD1 omnoho menší a ľahší vďaka použitiu jedného tranzistorového modulu.



Obr. 1.3: Náhľad dosky HVPB monopostu eD2 (bez nízkonapätovej dcérskej dosky).



Obr. 1.4: Kompletný menič monopostu eD2.

Tab. 1.1: Porovnanie parametrov motorov.

		eD1 (TG Drives)	eD2, eD3 (Fischer)
U	[V]	400	600
I _{nom}	[A]	63.3	22.6
T _{nom}	[N m]	30	11.1
n _{nom}	[rpm]	6000	13250
P _{nom}	[kW]	25	15.4
I _{peak}	[A]	85	61
T _{peak}	[N m]	48	29.1
n _{max}	[rpm]	8000	20000
P _{peak}	[kW]	34	35.4
k _e	[V _{rms} /rpm]	0.034	0.031
L _{Ph}	[μH]	270	393
m	[kg]	9.5	4.5

Ďalšie vybrané parametre pohonu eD2 sú na porovnanie v tabuľke 1.2.

1.3 Požiadavky pre Dragon e3 (eD3)

Najväčším problémom pohonu Dragon e2 bol softvér meniča. Logická doska ovládajúca vlastnú výkonovú dosku bola stále od firmy TG Drives. Okrem iných problémov (nedostatočne stabilná prúdová regulácia, tvrdé vypínanie meniča pri akejkoľvek chybe, nespoľahlivá inicializácia a komunikácia) nás najviac trápila neschopnosť meniča odbudzovať motor (tzv. flux-weakening alebo field-weakening). To je potrebné, ak sa motor točí takou rýchlosťou, že spätne indukované napätie (tzv. BEMF) sa rovná napätiu medziobvodu (t.j. napätiu na kondenzátoroch meniča – v našom prípade napätie batérie). Vtedy je nutné riadiť motor v režime odbudzovania, ktorý časť prúdu (v závislosti na otáčkach, želanom prúde a ďalších parametroch motora) používa na to, aby oslaboval permanentné magnety motora za cenu zníženia krútiaceho momentu. Tým sa znižuje elektrická konštanta motora ($V_{\text{rms}}/\text{rpm}$) a tým sme schopní dostávať motor do vyšších otáčok.[5]

Motor od firmy Fischer bol navrhnutý tak, že sa do tejto oblasti pri 600 V napájaní dostane pri 12000 rpm (maximálna rýchlosť motora je 20000 rpm). Tento algoritmus nebola schopná firma TG Drives implementovať v internom algoritme regulácii motora, a beh tohoto algoritmu mimo hlavnej regulačnej slučky meniča nepripadal do úvahy – regulácia by nebola dostatočne rýchla a nestabilita alebo chyba v komunikácii by mohla mať katastrofálny dopad. Strata správnej regulácie v režime odbudzovania spôsobí strmé prepätie priamo úmerné otáčkam a prúd

Tab. 1.2: Súhrn špecifikácii a požiadavok na menič eD3.

	eD1 (TG Drives)	eD2 (vlastný návrh)	eD3 (požiadavky)
U_{\max} [V]	400	600	600
I_{peak} [A]	200	100	100
I_{nom} [A]	70	50	50
f_{sw} [kHz]	10/20	20	20
m [kg]	6	3.7	< 3
w [mm]	440	380	< 300
l [mm]	190	300	< 280
h [mm]	150	120	< 100
V [L]	12.5	13.7	< 8.5

by nekontrolovateľne tiekol cez diódy v tranzistoroch naspäť do kondenzátorov medziobvodu a do batérie. To môže spôsobiť odpálenie poistky či zničenie súčiastok, ktoré by neboli dimenzované na takto veľké, respektíve rýchle prepätie a nadprúd.

Preto pripadali do úvahy dve možnosti. Úplne vlastný firmvér na vlastnej platforme (FPGA, DSP alebo MCU), alebo nájsť alternatívnu komerčnú možnosť riadenia. Napriek tomu, že by sme radi vyvinuli plnohodnotné vlastné riešenie vrátane softvéru a regulácie, jedna sezóna a nedostatok voľných ľudských zdrojov nás presvedčila siahnuť po spolupráci s externou firmou. Ako ideálny kandidát sa naskytila firma siliXcon s.r.o sídliaca v Biskupiciach pri Luhačoviciach (okres Zlín). Tá sa venuje takmer exkluzívne vývoju hardvéru a softvéru meničov určených na batériový pohon (elektrické motorky, bicykle, skateboardy a iné OEM aplikácie)[6].

Firma prejavila záujem o spoluprácu formou prípadovej štúdie aplikovania ich algoritmov a unikátnych spôsobov riadenia elektrických motorov. Keďže momentálne línia produktov firmy siliXcon pozostáva zo zariadení s maximálnym napájacím napätím do 100 V (avšak s maximálnym prúdom presahujúcim 400 A), prototyp s napájacím napätím 600 V pre firmu predstavuje istú platformu skúmania nových technologických možností. Táto spolupráca je teda vzájomne prospešná – z našej strany sa nebolo potrebné starať o samotné riadenie motora a mohli sme sa sústrediť na iné časti vývoja elektrického pretekárskeho monopostu. Od firmy siliXcon sme dostali schému zapojenia mikrokontroléra, pre ktorý je ich operačný systém pripravený, ako aj firmvér (s názvom ESC5), ktorý upravovali našim požiadavkám.

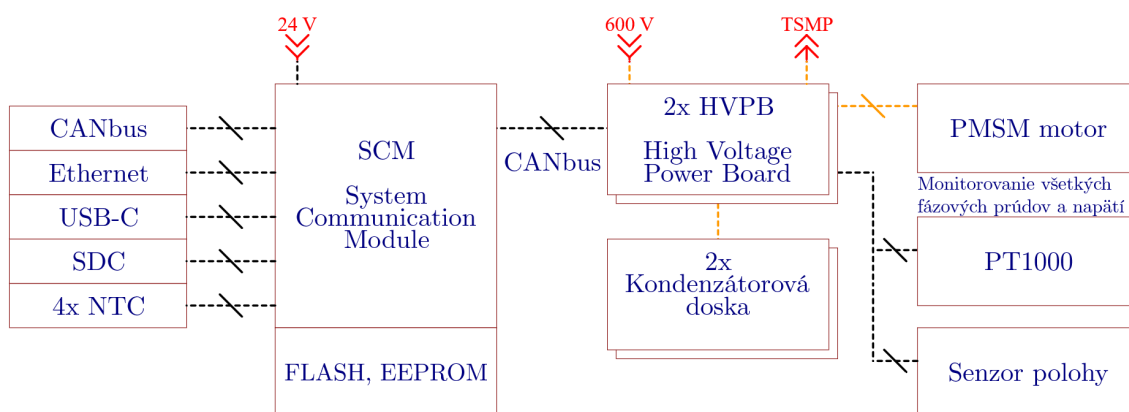
Z mechanických požiadavok je hlavným bodom odľahčenie (to je cieľom v autách tohoto typu vždy) a zmenšenie, hlavne v osi Z (výška meniča), aby bolo možné z auta (ľahšie) vyberať vysokonapäťovú batériu. Celkové zmenšenie meniča a správne nasmerovanie konceptu pomôže aj v budúcnosti, kedy sa bude pravdepodobne prechádzať na pohon všetkých štyroch kolies. Súhrn požiadavok je v tabuľke 1.2.

2 Návrh systému a schém

2.1 Topológia systému

Riadiaci algoritmus ESC5 a jeho vyššie aplikačné vrstvy sú určené pre ovládanie jedného motora. Preto sa menič monopostu eD3 prvý krát navrhuje s osobitnou výkonovou časťou pre oba motory. Toto riešenie má aj ďalšie výhody, ako jednoduchšie servisovanie, jednoduchší návrh a lepšia možnosť zástavby. Okrem dvoch výkonových dosiek s rovnakým názvom ako pri minulom monoposte eD2 (HVPB, High voltage power board - vysokonapäťová výkonová doska) sú súčasťou meniča aj dve kondenzátorové dosky a nový systém s názvom SCM (System Communication Module), ktorý čiastočne nahrádza funkciu dosky TGZ – na starosti má komunikáciu cez Ethernet, CANbus, snímanie diagnostických veličín (teploty vody, chladiča a okolia) a prípadné algoritmy dynamiky vozidla (ako TCS – Traction control system - systém kontroly trakcie alebo vektorovanie krútiaceho momentu – angl. torque vectoring).

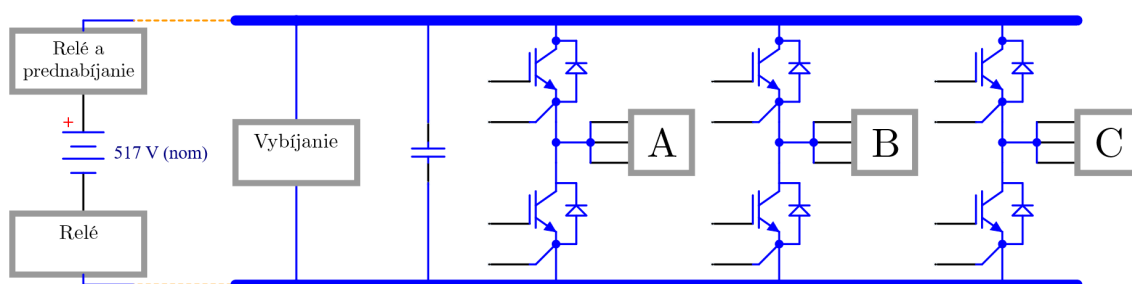
Toto rozdelenie jednotlivých častí meniča umožňuje veľmi kompaktné rozvrhnutie a vysokú hustotu zástavby. Ako najefektívnejšie riešenie bolo po podrobnej analýze vybrané umiestnenie jednotlivých častí meniča vertikálne nad seba - tzv. "sendvičové" usporiadanie. Zdola nahor to je: HVPB s tranzistorom smerom hore, vodný chladič a HVPB otočené o 180 stupňov (tranzistorom dole). Toto umožňuje výrobu len jedného vodného chladiča, ktorý odvádza teplo z oboch strán – z oboch tranzistorových modulov. Kondenzátorové dosky sa pripevnia na boky a systém SCM na prednú stranu meniča. Napriek vertikálnemu usporiadaniu je toto riešenie nižšie ako predchádzajúce verzie (čo je jedným z cieľov) – keďže nás na celkovú výšku meniča nelimituje výška a usporiadanie kondenzátorov. Na obrázku 2.1 je bloková schéma systému meniča.



Obr. 2.1: Blokový diagram systému meniča pre eD3.

2.2 Topológia spínania

Všetko, čo jednotka meniča robí efektívne, smeruje k jedinej veci – správne spínať tranzistory tak, aby sa motor točil podľa požiadaviek. Náš synchronný motor je trojfázový, to znamená, že k nemu vedú 3 vodiče, na ktoré musíme modulovať sínusové napätie so správnou amplitúdou, frekvenciou a fázou. K tomuto sa využíva indukčnosť samotného motora – stačí, aby jednotlivé tranzistory spínali s vysokou frekvenciou plné batériové napájanie na jednotlivé fázy. Keďže je toto spínanie minimálne o jeden rád častejšie ako samotná frekvencia výsledného riadiaceho signálu, môžeme napätie na motore (resp. prúd) považovať efektívne za sínusové.



Obr. 2.2: Blokový diagram vysokonapätovej cesty meniča.

Táto topológia sa odborné nazýva ako trojfázový dvojúrovňový napätový menič. Je to najjednoduchšia forma trojfázového meniča z pohľadu ovládania a počtu súčiastok (plocha, cena) – oproti viacúrovňovým meničom, ktoré používajú rôzne usporiadanie viacerých tranzistorov a kondenzátorov na vytvorenie hladšieho sínusového priebehu (t.j. viac diskretných úrovní napätia). [7] Viacúrovňové meniče majú pre porovnanie radu výhod – zníženie vysokého du/dt (ktoré oslabuje izoláciu), zníženie elektromagnetického rušenia (EMI), zníženie nadbytočného akustického ruchu či zvýšenie efektivity.[8] Pre ich komplexnosť, cenu (násobné množstvo tranzistorov), zástavbu a výraznú komplikáciu riadiacich algoritmov pre nás momentálne táto topológia nie je až tak výhodná.

2.3 Výber spínacieho tranzistora

Pre naše napájacie napätie (600 V) a požadovaný prúd (61 A) môžu byť použité ako spínacie výkonové prvky IGBT tranzistory, aj perspektívnejšie SiC MOSFETy. Maximálne napätie tranzistora musí byť zvolené s dostatočnou rezervou, aby vydržal aj krátke prepäťové situácie (napríklad pri spätnej indukcii napätia). To môže pri nami použitom motore (s elektrickou konštantou 0.031 V/rpm a maximálnych otáčkach 20 000 rpm dosiahnuť až 620 V_{rms} (877 V_{peak})). Jasnou voľbou sú teda výkonové

tranzistory s maximálnym napätím (V_{CE}) 1200 V. Najbližšie dostupné triedy sú 600 V, resp. 650 V (nedostatočná) a 1700 V (zbytočne predimenzovaná – potenciálne väčší a ťažší tranzistor s väčšími stratami).

Boli nájdení ideálni kandidáti na použiteľné tranzistory z oboch technológií, s ohľadom na parametre priamo ovplyvňujúce efektívnosť (dynamické a statické straty), ale aj na veľkosť, hmotnosť alebo chladenie. Porovnanie je v tabuľke 2.1.

IGBT tranzistory majú dva typy nosičov elektrického prúdu – elektróny a diery. Injektovaním minoritných nosičov (dier) do driftovej oblasti efektívne znižujú jej odpor. Avšak nevýhodou tohoto bipolárneho fungovania je jav nazývaný "tail current". Je to zvyškový prúd pretekajúci tranzistorom počas jeho vypínania, ktorý je následkom akumulovaných minoritných nosičov a ich rekombinácie. [9] Tento jav nenastáva pri MOSFEToch a aj vďaka tomu vidno v tabuľke 2.1 viac než 13-násobnú redukciu stratovej energie pri zatváraní SiC MOSFETu (pri teplote 25 °C).

Použitie SiC MOSFETu má v našej aplikácii aj isté nevýhody. SiC MOSFETy vyžadujú na správnu operáciu zväčša +15 V na zapnutie (rovnako ako Si IGBT) avšak -2 až -9 V na vypínanie (pre moderné IGBT väčšinou stačí 0 V a Miller clamp funkcionálna [10]). Keďže SiC MOSFET má omnoho nižšie prahové napätie a kratšiu odozvu zapnutia ako Si IGBT, zákmity vypínacieho prúdu a vysoké du/dt resp. di/dt spolu s parazitnou indukčnosťou by mohli spôsobiť nechcené zapnutie tranzistora. [11] To vyžaduje zložitejšiu formu napájania budičov tranzistora a znamená to väčšiu komplexitu, plochu a cenu. Celkovú finančnú náročnosť je vidno aj na samotných tranzistoroch – pre náš menič by sme len za IGBT tranzistory zaplatili 380 €, s použitím SiC technológie by tranzistory vyšli na takmer trojnásobok – na 1000 €. Táto cena sa ďalej akumuluje, keďže počas testovania musíme rátať s najhorším scenárom a byť pripravený na výmenu (v prípade poruchy) alebo na výrobu novej revízie hardvéru meniča.

Ďalšie problémy, ktoré by sa museli riešiť pri použití SiC tranzistorov, vznikajú ako následok ich rýchleho spínania, kde sa vyskytuje vysoké du/dt . To vďaka neprispôsobeniu impedancie vodičov a motora, parazitných indukčností a ďalších parazitných elementov vytvára napäťové špičky na vedení a termináloch motora, prípadne aj na termináloch meniča (spôsobené odrazmi). To môže ďalej spôsobovať degradáciu izolácie na vinutí motora, ktorá môže byť vo výsledku deštruktívna. [14][15] Tieto následky vyžadujú používanie dobre navrhnutých pasívnych (R)LC filtrov a/alebo tlmivky CMC [16]. Keďže sú nami používané algoritmy riadenia motora navrhnuté na spínanie 20 kHz, táto spínacia frekvencia je ešte stále bežná pre IGBT tranzistory. Výhody SiC by sa výraznejšie prejavili pri spínaní pomocou vyšších frekvencií, kde by sme mohli ušetriť napríklad na kapacite meniča, čo by ho odľahčilo a zmenšilo.

Zvážení jednotlivých výhod a nevýhod bol pre túto sezónu vybraný Si IGBT modul FS150R12N2T7_B54. Ten je postavený na modernej 7. generácii IGBT

Tab. 2.1: Vybrané parametre potenciálneho modelu SiC MOSFET[12] a Si IGBT[13].

		FS150R12N2T7_B54	3 x CAB011M12FM3
Výrobca	-	Infineon	Wolfspeed
Technológia	-	Si IGBT	SiC MOSFET
Napätie V_{CE}	V	1200	1200
Trvalý prúd	A	150	105
Špičkový prúd	A	300	218
Prúd diódou	A	150	55
V_{CEsat}	V	1.55 - 1.8	-
R_{DSon}	m Ω	-	10.5 - 14
E_{On}	mJ	20.5	1.28
E_{Off}	mJ	9.42	0.71
Cena (12/2022)	€	190	500

tranzistorov rady TRENCHSTOP od Infineon technologies. Okrem zníženia spínacích strát a zníženého V_{CEsat} napätia táto generácia umožňuje aj krátkodobé teplotné preťažovanie až do 175 °C. [17] Nami vybraný model je tiež dostupný v puzdre používajúcom press-fit technológiu.

2.4 Výber komponentov a návrh subsystému HVPB

Subsystém s názvom HVPB (High voltage power board - vysokonapäťová výkonová doska) obsahuje všetko esenciálne na spínanie jednej osi (napájanie jedného motora). Po výbere tranzistora je potrebné navrhnuť zvyšok obvodu tak, aby mohlo správne prebiehať spínanie a riadenie motora.

Dôležitou časťou návrhu spínania je výber budičov tranzistorov, ich napájanie a prípadná izolácia. Pri nízkonapäťových meničoch býva spojená zem samotného spínania a zem kontroléra. Napájanie spodných (low-side) tranzistorov býva zo spoločného zdroja určeného pre budenie tranzistorov a napájanie horných (high-side) tranzistorov býva implementované pomocou bootstrap kondenzátoru. Pri vysokonapäťových meničoch to ale bežné nie je, budenie tranzistorov a ich napájanie je izolované od napájania samotného kontroléra a každý tranzistor má svoj plávajúci zdroj (aby sa zabránilo prúdom v zemných slučkách pri vysokom di/dt). Táto izolácia (medzi logikou spínania a samotnými tranzistormi) nemusí spĺňať všetky bezpečnostné požiadavky na galvanickú izoláciu typu "reinforced", ak sa použije dodatočná izolácia medzi logikou a zvyškom auta. Tým sa dá ušetriť plocha na DPS, ak sú požiadavky na izoláciu náročné.[18] Podľa našich pravidiel, kde musí byť izolácia len 4 mm, je výhodnejšie nájsť všetky súčiastky ktoré budú pravidlám vyhovovať

a zvyšok komunikácie a napájania nechať neizolované.

Pri výbere izolovaného budiča tranzistorov je kľúčových niekoľko parametrov. Izolačné napätie musí vydržať v našom prípade podľa pravidla EV 1.2.1 aspoň 1800 V (AC RMS) 1 minútu (takisto ako všetky ostatné súčiastky poskytujúce galvanickú izoláciu). Ďalší významný parameter je (hlavne pre budiče horných tranzistorov) imunita voči common-mode prechodným dejom, ktorý je priamo závislý na napájacom napätí a rýchlosti spínania tranzistoru ($\text{kV}/\mu\text{s}$). Musíme si tiež zistiť veľkosť prúdu, ktorým chceme tranzistor zapínať a vypínať, aby to daný budič zvládal. V neposlednom rade hľadáme budiče s ďalšími funkcionalitami, ako je aktívna Miller clamp ochrana alebo vstavaná nadprúdová detekcia a ochrana.

Všetkým spomínaným požiadavkom vyhovoval 1ED34x1Mc12M od firmy Infineon technologies. Poskytuje 3 varianty maximálneho budiaceho prúdu – 3, 6 a 9 A (v oboch smeroch – t.j. ako zdroj, aj ako nora – angl. source a sink), takže nás výber prúdového zaťaženia nelimituje pri návrhu. Poskytuje tiež nastaviteľnú dobu vypínania IGBT počas núdzového vypnutia, a nastaviteľnú dobu detekcie nadprúdu pomocou dvoch rezistorov. Do budúca (pri vlastnej implementácii riadiaceho firmvéru) existuje aj takmer totožná verzia 1ED38x0Mc12M, ktorá ma omnoho viac konfigurovateľných možností a tiež dokáže poskytovať detailnejšiu diagnostiku vysokonapätovej strany sprístupnenú cez rozhranie I2C (ktoré nahrádza vývody pre konfiguračné rezistory).

Budič bol doplnený externými súčiastkami pre správnu funkcionálnu. Dva paralelne zapojené N-MOSFET tranzistory (pre zníženie odporu a pre redundanciu) poskytujú aktívnu ochranu typu Miller-clamp, ktorá drží hradlo tranzistora počas prechodných dejov na potenciále emitora. Dióda so sériovým odporom určeným na základe maximálneho saturačného napätia V_{CE} (grafickou metódou, vid. schéma v prílohe A) slúži na tzv. desaturačnú ochranu – detekciu nadprúdu pomocou merania napätia na otvorenom tranzistore.[19] Dva rezistory – osobitne pre nabíjanie aj vybíjanie hradla tranzistora – boli zvolené tak, aby sa dostali rovnako rýchlo k prahovému napätiu tranzistora aj pri nabíjaní, aj pri vybíjaní. Keďže toto napätie nie je v strede napájacieho napätia, hodnoty rezistorov sa líšia. Minimálna hodnota rezistora je určená maximálnym špičkovým prúdom, ktorý je budič schopný dodať (6 A, pre nedostupnosť verzie s 9 A výstupom). Keďže sa hradlo tranzistora správa ako kondenzátor, špičkové prúdy majú impulzný tvar a sú relatívne vysoké. Preto je nutné zvoliť radu rezistorov určené pre pulzné zaťažovanie. Bola vybrané hodnoty z rady CMB0207, ktorá je detailne popísaná v kapitole venujúcej sa prednabíjaniu kondenzátorov medziobvodu. Zvolením najmenšieho možného odporu je spínanie rýchle a efektívne, tranzistor má najmenšie straty, avšak za cenu zvýšenia generovania elektromagnetického rušenia (EMI). Táto hodnota sa dá v prípade nutnosti doladiť.

Všetky IGBT tranzistory majú svoje vývody potrebné na ovládanie (gate a emitor) vyvedené na jednej strane puzdra, čím uľahčujú umiestnenie budičov (oproti

tranzistoru používaného v modeli pre Dragon e2). Takisto, samostatne vyvedený emitor pri low-side tranzistoroch (čiže efektívne mínus vysokého napätia) pomáha znižovať rušenie spôsobené samotnými prúdmi tečúcimi z kolektoru do emitora. Týmto eliminujeme napätové kmitanie obvodu ovládania hradla gate spôsobené vysokým di/dt . Takisto sa stane samotné spínanie čistejšie, čím redukuje zbytočne generované EMI.[20]

Jedna z najkľúčovejších veličín riadenia PMSM motora je hodnota fázového prúdu. Meranie pomocou bočníku je v našom prípade veľmi nepraktické, keďže by obe strany meracieho rezistora plávali počas spínacieho deju o plné batérové napätie, čím sa nedajú použiť bežne používané metódy. Navyše samotné meranie musí byť galvanicky oddelené od procesora, keďže ten je pripojený na nízkonapäťovú zem. Táto izolácia musí byť podľa pravidiel (príloha E) aspoň 1600 V.

Predchádzajúca verzia meniča (pre Dragon e2) používala na toto meranie senzor HAIS100-P od firmy LEM využívajúci Hallov efekt. [21] Ten sa montuje priamo na DPS a prúd meria buď vstavaným vodičom, ktorý sa zaspájkuje na dosku, alebo sa cez jeho otvor prevedie meraný vodič. Pre menič eD2 sa použil senzor s dierou, keďže sme takto vedeli skrátiť potrebnú vzdialenosť od konektoru (očko vodiča končilo v tele senzoru a za sensorom sa mohol kábel priamo otáčať), avšak tento senzor obsahuje radu nevýhod pre návrh meniča pre eD3. K hľadaniu alternatívy nás najviac motivovala nedostatočná šírka pásma, konkrétne 50 kHz. Mnoho komerčných meničov používa na reguláciu iba efektívnu hodnotu prúdu a tým pádom im to vyhovuje (alebo si ju aj priamo ďalej znižujú a filtrujú v hardvéri a/alebo softvéri), avšak pokročilé algoritmy siliXcon ESC5 pracujú s navzorkovanými dátami počas spínacej periódy a používajú ich v ďalších krokoch riadenia alebo detekcie parametrov motora.

Detailným prieskumom dostupných možností bol nájdený dokonalý kandidát, integrovaný obvod TLI4971 od firmy Infineon technologies[22]. Je v miniatúrnom SMD puzdre, šírka pásma je až 240 kHz a ma širokú škálu programovateľných parametrov (rozsah merania, typ výstupu, limity komparátorov na detekciu nadprúdu), ktoré si ukladá do internej EEPROM pamäte. Na meranie využíva dvojicu Hallových senzorov v diferenciálnom režime, kde cez nich prúd preteká kolmo s vonkajším zapojením puzdra. Týmto vie senzor odstrániť parazitný vplyv blízkych paralelne tečúcich prúdov (v našom prípade prúdy do ostatných fáz). Keďže sa mikrokontrolér s A/D prevodníkom nachádza na druhej strane DPS, môžeme využiť možnosť plne diferenciálneho výstupu. Potom ho vieme previesť pri mikrokontroléri jednoduchým zapojením s operačným zosilňovačom naspäť na unipolárne napätie presne vystredené na polovicu referenčného napätia (indikujúce nulový prúd). Týmto sa dosiahne vysoké potlačenie spoločného (angl. common-mode) rušenia, ktoré sa s rovnakou fázou nabalí na oba vodiče diferenčného signálu cestou okolo rušivého spínania tranzistorov. Porovnanie nového senzoru s riešením z predošlej sezóny je v tabuľke 2.2.

Tab. 2.2: Porovnanie senzorov na meranie fázových prúdov.

		LEM HAIS100-P (eD2)	Infineon TLI4971 (eD3)
Rozsah merania	[A]	± 150	± 120
Šírka pásma	[kHz]	50	240
Veľkosť	[mm]	33x14x30	8x8x1
Hmotnosť	[g]	20	<1
Sériový odpor	[m Ω]	-	0.22
Orientačná cena	[€]	20	5

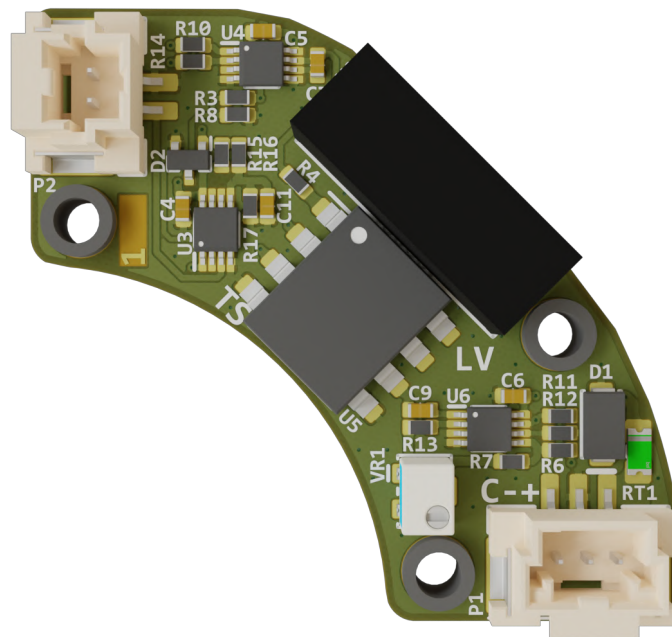
Nezanedbateľnou výhodou tohoto senzoru je aj jeho nízka hmotnosť, ktorá oproti minulej generácii meniča odľahčí celý systém o takmer 120 g. Keďže je senzor TLI4971 v SMD puzdre osadený priamo na doske plošných spojov a môže ním tiecť až 120 A, návrh s týmto čipom nie je triviálny – bližšie je postup opísaný v ďalšej kapitole. Toto puzdro má ale aj svoje výhody, oproti alternatívnym senzorom v puzdrách s vývodmi (ACS732KLATR, MCA1101, CT431-ESWF65MR) je výrazne menší a má bezkonkurenčne nízky sériový odpor.

Ďalšou potrebnou veličinou pre funkciu meniča je (izolované) meranie napätia na medziobvode. Firmvér ESC5 vyžaduje aj meranie napätia na výstupe jednotlivých fáz – toto sa používa na diagnostiku funkčnosti tranzistorov, na meranie parametrov motora (odpor, indukčnosť, BEMF) a pre reguláciu motora v prípade používania riadenia bez použitia senzora (tzv. sensorless). Pre tento účel sa používal v meniči pre eD2 integrovaný obvod AMC1311 od firmy Texas Instruments, ktorý dosahuje v svojej drahšej verzii šírku pásma až 275 kHz a na svojom výstupe má priamo diferenčné napätie, podobne ako súčasný prúdový senzor. Žiaľ, počas návrhovej fázy bola táto súčiastka neustále nedostupná, s neistou predpoveďou skladových zásob do budúcnosti. Preto sa hľadala dostupná alternatíva, ktorá by mala podobné parametre – hlavne minimálnu šírku pásma 200 kHz a galvanickú izoláciu aspoň 1800 V. Samostatný integrovaný čip, ktorý spĺňa všetky tieto požiadavky nebol nájdený.

Existuje rada špeciálnych optočlenov, ktoré svojou konštrukciou a vhodným pomocným obvodom eliminujú nevýhody klasických optočlenov na prenos analógových hodnôt. Problém, ktorý riešia, je hlavne vysoká nelinearita, závislosť na teplote či odchýlka charakteristiky spôsobená rozdielmi vo výrobnom procese. Riešením je použitie tzv. lineárneho optočlenu, ktorý kompenzuje tieto nedokonalosti použitím jednej vysielacej diódy a dvoch precízne zosúladených prijímacích diód. Jedna sa nachádza na primárnej – vysielacej strane a druhá na sekundárnej strane integrovaného obvodu. Tieto príjmacie diódy nie sú samy o sebe špeciálne alebo lineárne, avšak výrobným procesom a usporiadaním v integrovanom obvode je garantovaná

zhoda ich nelinearít, resp. vplyvu teploty na ich prenosovú charakteristiku. Takisto sú obe osvecované rovnakým množstvom svetla z vysielacej diódy. Pomocou prijímacej diódy na primárnej strane vieme pomocou spätnej väzby (vhodným zapojením operačných zosilňovačov) regulovať prúd vysielacou diódou tak, aby mal prenos napätia požadovanú charakteristiku.

Na tento účel bol vybraný integrovaný obvod HCNR201-500E od firmy Broadcom, ktorý má z dostupných lineárnych optočlenov pre nás najlepšie parametre. [23] Udávaná nelinearita je 0.01 % a šírka pásma presahuje 1 MHz. Vstupné merané napätie treba najprv znížiť na akceptovateľnú úroveň (pomocou rezistorového deliča) a nasledovne pomocou operačných zosilňovačov regulovať vysieláciu diódu. Pri vysokých hodnotách rezistorového deliča zaváži každá parazitná kapacita (ochrannej diódy, vstupu zosilňovača či samotnej cestičky na DPS), preto bol rezistorový delič paralelne doplnený kapacitným deličom. Jeho hodnoty boli vypočítané na základe predpokladu parazitných kapacít tak, aby celkový delič prenášal obdĺžnikový signál bez skreslenia. Je vhodné si nechať rezervu, aby sa pri malej zmene kapacity (v rámci tolerancie) nestal delič pre vysoké frekvencie nižšou impedanciou. To by mohlo spôsobiť vysokonapäťové prekmity. Hodnota kompenzačnej kapacity bola nasledovne verifikovaná a upravená experimentálne.



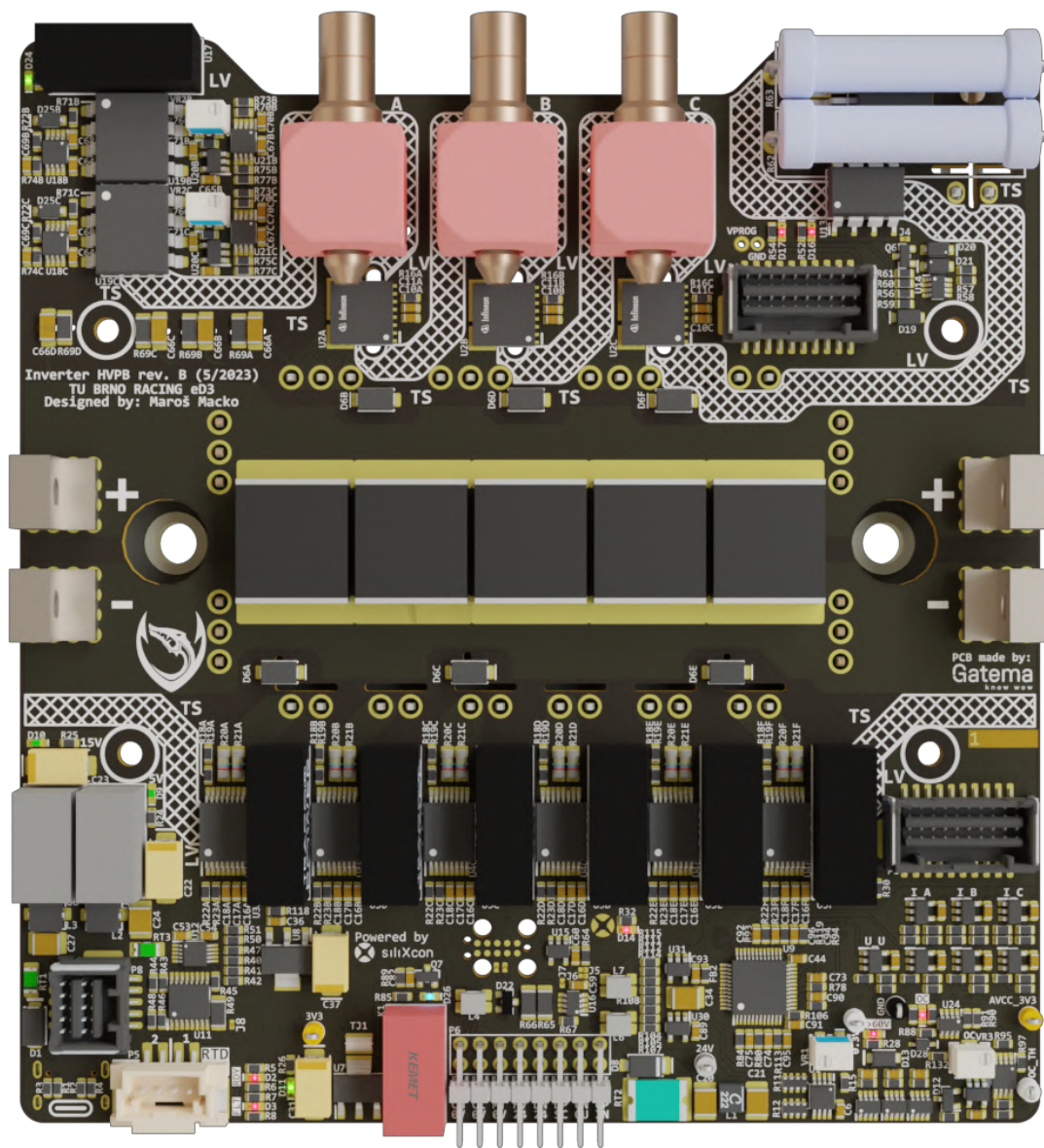
Obr. 2.3: 3D náhľad DPS Isoloop.

Na meranie teplôt senzora PT1000 umiestneného v motore bol navrhnutý izolovaný analógový prevodník používajúci podobnú architektúru na izolovanie napätia, ako pri meraní fázového napätia na HVPB. Samotný senzor je zaliaty vo vinutí motora, avšak výrobca negarantuje dielektrické vlastnosti použitého epoxidu. Obvod je doplnený

o budenie senzoru PT1000 zdrojom konštantného prúdu 1 mA. Na izolovanej strane je potom napätie prevedené na prúdovú slučku 4-20 mA pomocou obvodu známeho ako Howlandova prúdová pumpa [24]. Prevodom na prúdovú slučku čiastočne eliminujeme problémy s prenosom analógového signálu (menšie rušenie, potlačenie vplyvu poklesu napätia).

Prúd sa prevádza na HVPB naspäť na napätie pomocou uzemneného rezistora a nasledovne je vzorkovaný rovnakým $\Delta\Sigma$ A/D prevodníkom ako na systéme SCM – vid. ďalšia podkapitola. Tento prevodník je umiestnený na separátnej zbernici dI2C (Differential inter-integrated circuit). Pre zariadenia sa táto zbernica nelíši od klasickej zbernice I2C, avšak fyzická vrstva oboch prenášaných signálov (SCL a SDA) je implementovaná pomocou diferenčného páru terminovaného na začiatku a konci zbernice (u nás na oboch koncoch HVPB). Tento prevod vykonáva integrovaný obvod PCA9615 [25]. Doska plošných spojov bola navrhnutá tak, aby mechanicky pasovala okolo senzora pozície priamo na motore. Systém dostal názov Isoloop (od anglického popisu funkcionality – Isolated current loop) a 3D náhľad je na obrázku 2.3.

Kompletná schéma navrhnutého systému HVPB sa nachádza v prílohe A a náhľad výrobných dát v prílohe D. 3D náhľad dosky plošných spojov je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: 3D náhľad hornej strany DPS systému HVPB.

2.5 Výber komponentov a návrh subsystému SCM

Subsystém s názvom SCM (System communication module - komunikačný modul) má za úlohu komunikovať s autom cez zbernicu CANbus a cez Ethernet poskytovať diagnostické spojenie s firmvérom jednotlivých procesorov na doskách HVPB. S nimi komunikuje cez zbernicu CANbus, ktorá je od zvyšku auta separovaná. Tiež komunikuje s A/D prevodníkom nachádzajúcim sa na HVPB a takisto má svoje vlastné A/D na snímanie diagnostických veličín (teploty vody, chladiča, okolia vzduchu).

Jednotka SCM priamo spája jednotlivé dosky HVPB, mechanicky aj elektricky je s nimi spojená cez svoje konektory na spodnej strane DPS. Napájanie a digitálna komunikácia medzi HVPB a medzi autom je implementovaná práve tu, teda stačí jeden konektor na pripojenie sa k celému systému. Napájanie nízkonapäťových jednotiek v aute, vrátane meniča, je dodávané galvanicky izolovaným DC/DC meničom, ktorý je umiestnený vo vysokonapäťovej batérii (tzv. TSAC – Tractive system accumulator container - trakčná batéria). Toto napätie je oproti autám na spalovací pohon, ktorým môže (hlavne pri štartovaní a výkyvoch otáčok motora) napätie prechodne kolísť v rozmedzí -70% až $+320\%$ [26], regulované na 24 V s relatívne vysokou stabilitou (rádovo jednotky percent).

Menič je najväčším zdrojom rušenia v elektrickom aute, preto musíme ošetriť napájacie aj dátové linky dostatočnou filtráciou. Toto filtrovanie je potenciálne obojsmerné, rušenie môže byť generované interne naším systémom, napríklad spínanými zdrojmi, a takisto sa môže indukovať na vodičoch vedúcich k samotnej jednotke. Filtrovanie vstupného napájania zabezpečuje CMC cievka spolu s filtračnými kondenzátormi. Vstup je tiež ošetrený voči nechcenému prepólovaniu jednoduchou ochranou pozostávajúcou z PTC "polyfuse" termistora (tzv. resetovateľná poistka) a diódy schopnej vydržať prúdovú špičku, kým zareaguje poistka. CANbus zbernica je tiež vybavená CMC cievkou na odfiltrovanie rušenia, spolu s ESD diódami pred aj za cievkou. Dvojitá ochrana je použitá pre prípad, že by sa na zbernici objavil asymetrický zákmit, ktorý by indukčnosťou cievky mohol vytvoriť vysoké prepätie (napríklad pri skratovaní napájania na jeden z diferenčných vodičov). [27]

Ako komunikačný protokol je v aute používaná zbernica CAN (Controller area network). Pre naše použitie má radu výhod, ako implicitný systém automatického predchádzania kolízií a prioritizácie správ. Takisto má vysokú odolnosť voči rušeniu, keďže sa signál prenáša po krútenej dvojlinke terminovanej na svojich koncoch $120\ \Omega$ rezistormi. Pre kompatibilitu bol zvolený štandard 2.0B s maximálnou rýchlosťou 1 Mbit/s, oproti novšiemu štandardu CAN-FD (Flexible Data Rate). Ten ponúka vyššie prenosové rýchlosti (do 5 Mbit/s) a flexibilnú dĺžku jednotlivých paketov (oproti 2.0B, ktorý má stanovenú dĺžku na 0 až 8 bajtov).[28] To znamená menšiu réžiu pri posielaní správ dlhších ako 8 bajtov (ktoré musia byť v štandarde CAN

2.0B rozdelené na viacero paketov so svojou hlavičkou, kontrolným CRC súčtom atď.). Je ale zatiaľ menej zaužívaný a má horšiu hardvérovú a softvérovú podporu. Takisto by v našom prípade veľmi nepomohol, keďže menič vyžaduje pravidelne posielať a prijímať vopred dané veličiny s vysokou frekvenciou a nie s veľkým počtom sériových dát.

V tíme TU Brno Racing sú zaužívané 32-bitové mikrokontroléry (angl. skratka MCU) od firmy STMicroelectronics (skrátene ST alebo STM), hlavne z rady G4 a H7. Ethernet podporuje iba rada STM32H7, čiže voľba série je jasná. Fungujú na architektúre ARM, konkrétne Cortex-M7 (spolu s Cortex-M4, v prípade modelov s dvoma jadrami). Bol zvolený model STM32H745[29], pre svoju unikátnu dvojjadrovú architektúru – vieme funkčne oddeliť kritické a menej kritické, resp. náročné funkcionality. Procesory z rady H7 ponúkajú širokú škálu periférií, ktorých vstupy a výstupy je možné podľa potreby presúvať medzi viacerými vývodmi na puzdre. Majú zabudovanú hardvérovú podporu pre protokol CAN-FD (2x). K tomu poskytujú viackanálové 16-bitové A/D (Analog - Digitál) a D/A (Digitál - Analog) prevodníky, komplexný systém vnorených prerušovaní, niekoľko rozhraní USART, I²C, SPI spolu s veľkým množstvom 16 aj 32-bitových čítačov. Pracovnú frekvenciu majú maximálne na 240 (jadro M4) až 480 (jadro M7) MHz. Samozrejmosťou je komplexný časovací systém s jednotkami PLL, ktoré zaručia dostupnosť takmer ľubovoľného hodinového kmitočtu procesoru a periférií, pri použití kryštálu alebo oscilátoru pracujúceho na nižšej frekvencii (napr. 8 MHz).

Periférie MCU boli rozšírené 16 Mbit SPI Flash pamäťou W25Q16JVSSIQ [30] a EEPROM pamäťou M9551[31]. Flash pamäť je určená na aktualizáciu firmvéru cez zbernicu CAN alebo Ethernet. To umožní nahrávanie cez počítač aj vtedy, keď budú jednotky nedostupné – umiestnené v aute. EEPROM pamäť je vhodná na ukladanie kalibračných hodnôt alebo nastavení, ktoré ostanú nezmenené aj po aktualizácii firmvéru.

Na implementáciu komunikačného protokolu Ethernet je potrebné použiť externý integrovaný obvod nazývaný Ethernet PHY (physical layer transceiver). STMicroelectronics ponúka ovládač pre obvod LAN8742A[32], ktorý bol použitý. S mikrokontrolérom komunikuje pomocou protokolu RMII, ktorý je v podstate redukovaná forma protokolu MII (Media-independent interface). Samotné dáta sa prenášajú pomocou osobitnej dvojbitovej zbernice pre odosielanie a prijímanie (TXD[0:1] a RXD[0:1]). Spolu s kontrolnými signálmi TX_EN a CRS_DV sa tiež zbernicou prenáša signál REF_CLK, čo je 50 MHz digitálny hodinový signál, slúžiaci na synchronizáciu dátových bitov. Paralelne s týmto vysokorýchlostným rozhraním sú dva signály s nižšou rýchlosťou – MDIO a MDC (management data, management data clock), ktoré slúžia na inicializáciu a zmenu parametrov PHY. Čip potrebuje na svoju funkciu 25 MHz kryštálový oscilátor, ktorý môžeme nahradiť digitálnym hodinovým signálom. Na to

sa hodí funkcia MCO (Microcontroller clock output) mikrokontroléra STM32H7. Pomocou internej PLL periférie vieme tento hodinový signál nastaviť na správnu frekvenciu a pripojiť na PHY obvod – tým ušetriť cenu a miesto za oscilátor a rezonančné kondenzátory. [33] Bol použitý štandardný RJ-45 konektor s integrovanými transformátormi (tzv. magnetmi), čím je možné ušetriť miesto na DPS. Takisto sa osadzuje technológiou SMT a časť svojho tela má pod úrovňou dosky, čo umožňuje zmenšenie celkového obalu meniča, keďže je s ním tento konektor v kontakte.

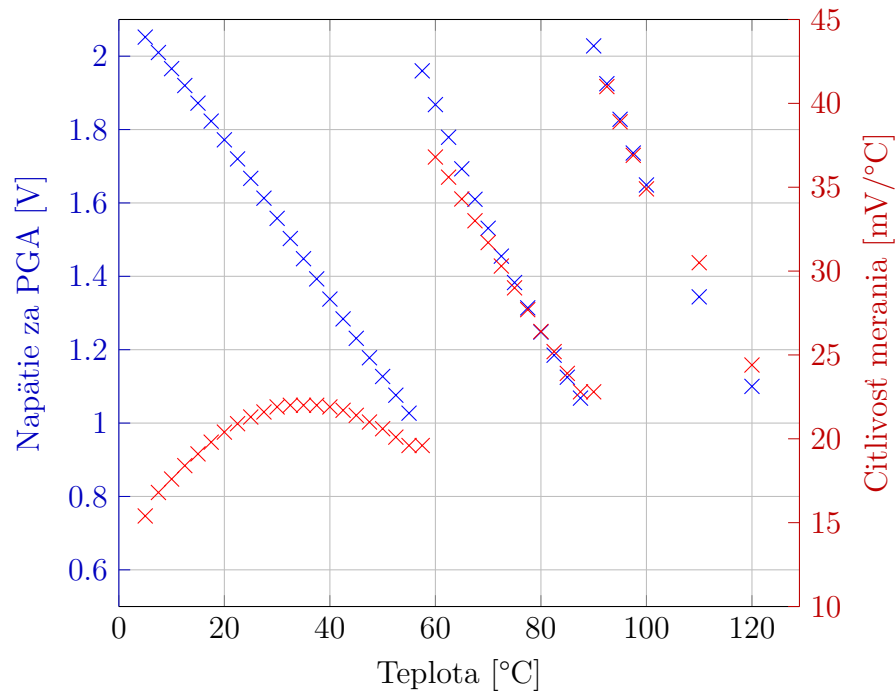
Na meranie pomocných NTC čidiel v meniči (teplota chladiaceho vodného okruhu a teplota povrchu chladiča) bol použitý u nás zaužívaný $\Delta\Sigma$ A/D prevodník ADS122C04IPW[34], pre ktorý máme vyladenú softvérovú podporu. Ponúka bipolárny prevod štyroch kanálov v ľubovoľnej kombinácii multiplexovania, dva zosúladené zdroje prúdu (na prípadnú diagnostiku senzorov alebo napájanie čidiel), programovateľné zosilnenie pomocou interného PGA (Programmable gain amplifier - zosilňovač s programovateľným ziskom), presnú 2.048 V napäťovú referenciu a komunikáciu cez I2C zbernicu. Teploty vodného okruhu sa merajú pred a za chladičom tranzistora na výpočet odvodu tepla do vody – pre účely výpočtu efektivity celkového hnacieho ústrojenstva a pre výpočet efektivity prenosu tepla samotného chladiča. Prenesené teplo vieme vyjadriť z rovnice 2.1.

$$E[\text{J}] = m[\text{kg}] \cdot c[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}] \cdot \Delta T[\text{K}] \quad (2.1)$$

Namiesto hmotnosti použijeme vo vzorci prietok vody (\dot{V}) získaný z prietokového senzoru umiestneného v sérii s našim vodným chladiacim okruhom a ako výsledok dostaneme priamo prenesený výkon (vzorec 2.2).

$$P[\text{W}] = \dot{V}[\text{L/s}] \cdot c[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}] \cdot \Delta T[\text{K}] \quad (2.2)$$

Zo vzorca 2.2 je zjavné, že presnosť merania tepelného prenosu je priamo závislá na rozdiel meraných teplôt, nie na ich absolútnej hodnote. Tým nás výraznejšie zaujíma presnosť a rozlíšenie merania, keďže rozdiel teplôt na takomto výmenníku tepla býva minimálny, hlavne pri nízkych hodnotách tepelných strát. Z analýz požiadavok na interpretovanie meraných údajov vzišla požiadavka dokázať merať rozdiel teplôt menší ako 0.05 °C. [35] Táto požiadavka je iba pre dynamické meranie, absolútna chyba merania teploty môže byť samozrejme vyššia. Pre tento účel bolo navrhnuté zapojenie NTC termistorov s kombináciou pull-up a pull-down rezistora, aby sme posunuli nelinearitu a citlivosť merania smerom k očakávanému pracovnému bodu. Takisto sa ráta s dynamickým prepínaním zisku jednotlivých kanálov, čím vieme dosiahnuť vysoký dynamický rozsah v širokej pracovnej oblasti, a voľné kanály vieme využiť na meranie ďalších diagnostických veličín – viď. obrázok 2.5 s hodnotami citlivosti merania a s meraným napätím.



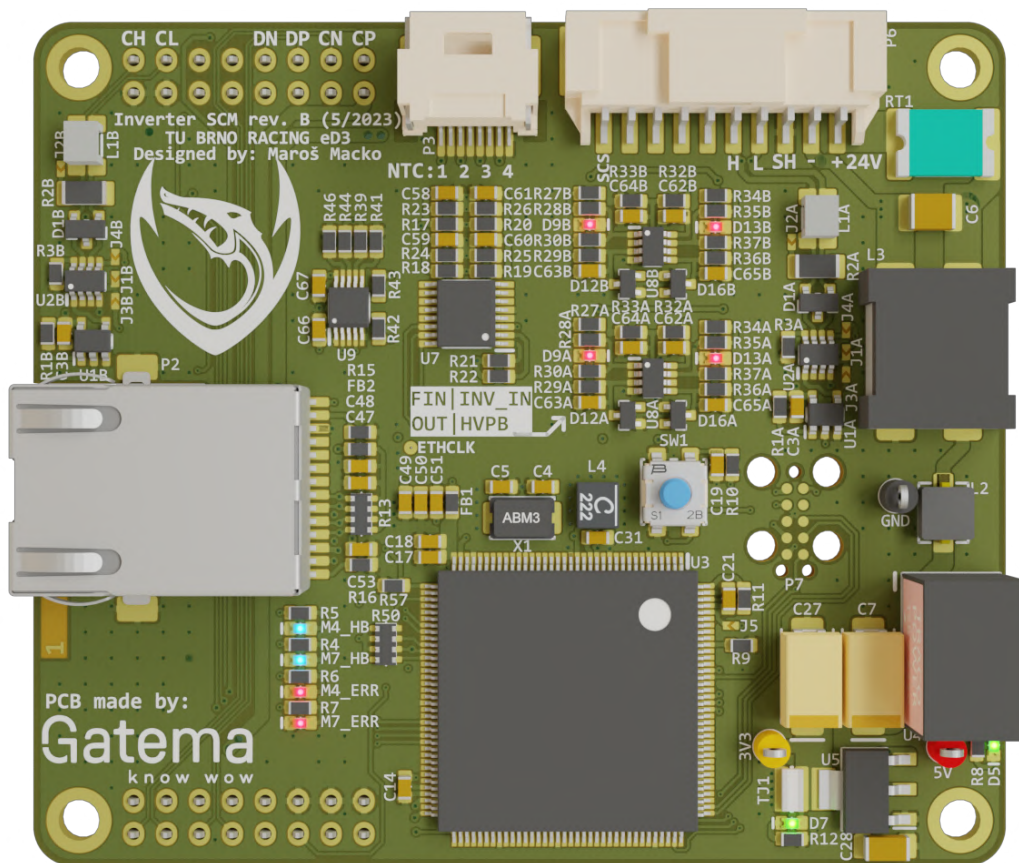
Obr. 2.5: Citlivosť meraného NTC termistora s prepínaným zosilnením PGA.

Komplikovanejšie zapojenie spolu s kombináciou programovateľného zosilnenia má za výsledok náročnejšie symbolické vyjadrenie výpočtu hľadaného odporu (meracieho NTC). Z všeobecne známych vzorcov Ohmovho zákona, vzorca pre paralelné rezistory a vzorca pre výpočet meraného A/D kódu (pre bipolárny A/D prevodník) vieme odvodiť vzorec do nasledovnej symbolickej podoby:

$$R_{NTC} = \frac{\frac{m}{k} \cdot R_{down} \cdot R_{up}}{R_{down} \cdot (2^{N-1} - 1) - \frac{m}{k} \cdot (R_{down} + R_{up})}, \quad (2.3)$$

kde m je meraný A/D kód, k je hodnota zosilnenia PGA, N je počet bitov a R_{up} a R_{down} sú hodnoty pull-up a pull-down rezistorov pred prevodníkom.

Schéma kompletne navrhnutého systému SCM sa nachádza v prílohe B. 3D náhľad dosky plošných spojov je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: 3D náhľad hornej strany DPS systému SCM.

2.6 Návrh kondenzátorovej dosky medziobvodu

Kondenzátory medziobvodu (t.j. lokálne jednosmerné napájacie napätie pre motor) sa používajú v meničoch na oddelenie vplyvu indukčnosti zo zdroja jednosmerného napätia na spínanie – poskytujú nízkoimpedančnú cestu pre zvlnené prúdy spôsobené rýchlym spínaním tranzistora. Tieto prúdy sú závislé na výstupnej indukčnosti záťaže, na napätí zbernice a na tvare pulzov cez spínacie prvky a diódy. Kapacita medziobvodu tiež zohráva úlohu pri znižovaní zvodovej indukčnosti spínania. Neeliminovanie nadbytočnej parazitnej indukčnosti vedie k neefektívnosti v dôsledku napätových špičiek, ktoré sú vytvárané počas spínania s vysokou rýchlosťou. Ak je parazitná indukčnosť príliš veľká, čas spínania výkonových spínačov sa musí predĺžiť, aby napätové špičky nepoškodili samotné zariadenie. Zvýšenie spínacieho času zvyšuje zapínacie a vypínacie straty v každom výkonovom tranzistore, čo prispieva k väčším spínacím stratám, ktoré sa prejavujú ďalším nadbytočným teplom, ktorý musíme odvieť. Nízka impedancia tejto vysokonapätovej cesty je základom pre efektívny dizajn meniča. Vnútorne ESL a ESR kondenzátorov a ich puzdro je kľúčom k zníženiu parazitnej indukčnosti. [36].

Keramické kondenzátory (alebo iné technológie kondenzátorov) sú pre túto aplikáciu bez výhrad nepoužiteľné – pre kombináciu požiadavok na maximálne napätie a hustotu efektívnej kapacity. Špeciálne rady keramických kondenzátorov (ako napríklad CeraLink od výrobcu TDK) by stáli za uváženie pri veľmi veľkých spínacích frekvenciách (pre SiC alebo GaN tranzistory) – pre našu aplikáciu neprinášajú vzhľadom na ich vysokú cenu dostatočné výhody. Pre kapacitu medziobvodu máme na výber prakticky dve technológie – elektrolytické kondenzátory, alebo tenkovrstvé filmové kondenzátory (resp. ich kombinácia). Elektrolytické kondenzátory majú rádovo väčšie parazitné vlastnosti (ESL a ESR), čo môže spôsobiť nutnosť použiť viac ako štvornásobok potrebnej kapacity. [36]

Oproti tomu majú filmové kondenzátory omnoho nižšie straty, ich okrajové podmienky sú jasne definované a netrpia opotrebovaním a vysychaním elektrolytu (ktorý má vplyv u elektrolytických kondenzátorov od zvýšenia vnútorného odporu, cez nadmerné zahrievanie až po katastrofické zničenie). Preto sme sa rozhodli exkluzívne použiť filmové kondenzátory v celom meniči. Tie majú ako bonus tzv. samoliečiacu schopnosť (angl. self-healing) – pri stave prepätia a prerazení dielektrika sa tenká metalizovaná vrstva elektródy vyparí (oproti iným kondenzátorom, kde tento preriez býva deštruktívny). Každým preriezom ale samozrejme mierne klesá kapacita a rastie sériový odpor kondenzátora. [37]

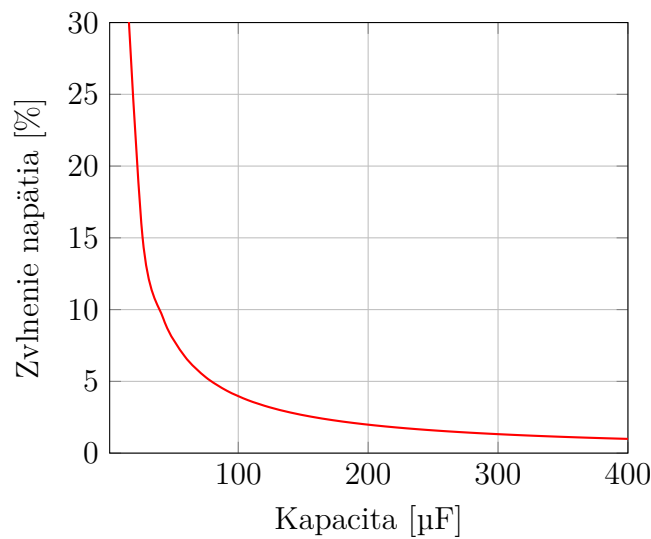
Velkosť potrebnej kapacity vieme odvodiť zo základného vzorca pre prúd kondenzátorom (vzorec 2.4) a upraviť do podoby 2.5.

$$i_c = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.4)$$

$$C = \frac{i_c \cdot \Delta t}{\Delta U} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{i_c}{\Delta U \cdot f_{sw}}$$

Nasledovne musíme určiť prúd kondenzátorom. Pre motory s permanentným magnetom, ktorých účinník sa pohybuje v rozmedzí 0.7 až 0.9, vieme určiť maximálny prúd kondenzátora v závislosti na modulačnom indexe. Analyticky je jeho maximum 0.55 až 0.65-násobkom fázového prúdu.[38] Pri našom maximálnom fázovom prúde 61 A vychádza špičkový prúd kondenzátormi 40 A. Túto hodnotu neskôr použijeme pri výbere kondenzátorov na kontrolu, či ich daný (paralelný) počet spĺňa maximálne hodnoty povolené technickým listom, resp. či sa nebudú nadmerne zahrievať.



Obr. 2.7: Závislosť zvlnenia napätia na kapacite medziobvodu.

Závislosť kapacity na voliteľnom parametre zvlnenia medziobvodu si môžeme znázorniť na obrázku 2.7 dosadením vypočítaných hodnôt. Môžeme vidieť, že pri vyšších hodnotách kapacity sa účinky pridávania dodatočnej kapacity znižujú (efektom lomenej funkcie $1/C$) a nemá zmysel pridávať extrémne vysoké hodnoty kondenzátorov. Maximálne akceptovateľné zvlnenie bolo po konzultáciách s tvorcami regulačného softvéru zvolené na 5 %, čo je v prepočte na naše maximálne napätie 30 V.

Po dosadení do vzorca vychádza minimálna kapacita meniča pre jednu osu ako $67 \mu\text{F}$, resp. $134 \mu\text{F}$ pre obe osi meniča (vzorec 2.6).

$$C = \frac{0.65 \cdot 61 \text{ A}}{30 \text{ V} \cdot 20\,000 \text{ Hz}} \quad (2.6)$$
$$C = 67 \mu\text{F}$$

Požadovanú minimálnu kapacitu dvojosého meniča zdvojnásobujeme ako aproxiáciu najhoršieho prípadu, teda že každá osa meniča spína v tom istom momente. Ak by boli jednotlivé osi synchronizované a udržiavali by si vzájomný fázový posun medzi spínaním, dala by sa celková kapacita výrazne zmenšiť. To ale vyžaduje pokročilý zásah do vnútornej nízkoúrovňovej štruktúry ovládania spínania a takisto systém spoľahlivej synchronizácie, k čomu momentálne nemáme dosah.

Najnáročnejšia požiadavka na veľkosť meniča (viď. tabuľka 1.2) bola zníženie celého meniča o minimálne 20 mm. Najvyššou súčiastkou meniča eD2 boli kondenzátory medziobvodu. Okrem miesta, ktoré zaberali samotné kondenzátory, svojím tvarom znemožňovali efektívne využitie okolného miesta. Boli použité len 4 samostatné kondenzátory a svojím tvarom a pomermi strán efektívne určovali veľkosť meniča. So znižujúcou výškou dostupných kondenzátorov sa drasticky mení použiteľná kapacita a neboli nájdené alternatívy použitých kondenzátorov, ktoré by spĺňali požiadavky. Preto sa kondenzátory presunuli po stranách meniča na samostatné dosky plošných spojov. Takto je možné umiestniť najnižšie dostupné kondenzátory určené pre túto aplikáciu a upraviť ich počet tak, aby vyhovoval požiadavkám.

Proces výberu zahŕňal úpravu veľkosti dosky a experimentovanie s umiestnením jednotlivých kondenzátorov a uchytenie samotnej kondenzátorovej dosky. Ako najlepší kandidát bol vybraný kondenzátor DCP4L045006D rady DC-LINK MKP 4 od nemeckej firmy WIMA.[39] Má kapacitu $5 \mu\text{F}$ a je určený na maximálne napätie 800 V. Na miesto, ktoré bolo vyhradené kondenzátorom sa ich vošlo viac ako potrebné vypočítané minimum. To sa využilo, a pridali sa pozície pre celkovú kapacitu jednej kondenzátorovej dosky $95 \mu\text{F}$. Jeden kondenzátor má výrobcom určený prúd na ohrev o 10°C na hodnotu $4.5 \text{ A}_{\text{rms}}$, čo je po zrátaní paralelných kondenzátorov rovné prúdu $85.5 \text{ A}_{\text{rms}}$ – viac než dvojnásobok očakávaného prúdu. Tým pádom sa nemusíme báť o nadmerné prehrievanie kondenzátorov a znižovanie ich napäťových limitov, poprípade životnosti.

Na mechanické a elektrické prepojenie bol vybraný konektor REDCUBE, ktorý sa do dosky lisuje technológiou press-fit a doska sa k nemu pripevní pomocou skrutky M4.[40] Kvôli pravidlám je nutné zabezpečiť tzv. positive locking, teda zabezpečenie pred uvoľnením. Na to sa použijú skrutky s prevítanou hlavičkou a zakrútený bezpečnostný drôt.

3D náhľad návrhu kondenzátorovej dosky je na obrázku 2.8.



Obr. 2.8: 3D náhled kondenzátorovej dosky.

2.7 Prednabíjanie kondenzátorov

Pripojenie batérie k meniču je realizované troma nezávislými mechanickými relé (nazývanými AIR, Accumulator isolation relay - izolačné relé akumulátora) – majú na starosti spínanie kladného pólu, spínanie záporného pólu a spínanie prednabíjacieho odporu. Prednabíjací rezistor (angl. precharge) je nutný z dôvodu veľmi nízkej impedancie trakčného systému (súčet všetkých odporov po ceste TS je v tabuľke 2.3).

Tab. 2.3: Výpočet ekvivalentného odporu TS.

počet	predmet	celkový odpor [mΩ]
136	batériový článok	163
2 m	TS kabeláž	3
1	poistka	2
2	relé	1
		169

Ak by sa interné kondenzátory nenabíjali postupne, pre tento odpor trakčného systému (169 mΩ) a maximálne napätie batérie (591.6 V) by bol špičkový prúd v čase zopnutia

$$I = \frac{U}{R} = \frac{591.6 \text{ V}}{169 \text{ m}\Omega} \cong 3500 \text{ A.} \quad (2.7)$$

Je teda zjavné, že potrebujeme nejaký spôsob, ktorý bude tento prednabíjací prúd limitovať, kým sa kondenzátory nenabijú na dostatočnú úroveň a nasledovne sa nezopne hlavné relé s minimálnym spínacím prúdom. Nami používané relé (LEV100H) má v špecifikácii životnosť pri spínaní a rozopínaní potenciálu 400 V len 500 cyklov pri 200 A, 1000 cyklov pri 100 A ale len 50 cyklov ak spína a rozopína 50 A pri 1000 V. Ak sa relé len spína (vypínanie je predpokladané počas nulového prúdu), počet cyklov je pri 50 A a 400 V až 25 000. Výrobca neudáva viacero kombinácií spínacích napätí a prúdov, ale je zjavné, že ak minimalizujeme spínací prúd, vieme výrazne predĺžiť životnosť relé. Takisto vieme túto hodnotu monitorovať a zaznamenávať pre diagnostické účely predvídania prípadného zlyhania.

Pre výpočet hodnoty potrebného rezistora si musíme určiť čas prednabíjania a špičkový spínací prúd, čím určíme percento na ktorý medziobvod meniča nabijeme pred plným zapnutím hlavného relé. Percento prednabíjania musí byť podľa pravidiel väčšie ako 95 %. Celkový čas nabíjania kondenzátorov môžeme teoreticky zvoliť akýkoľvek, avšak ak bude nastavený príliš vysoko, mohol by pri dynamických disciplínach na súťažiach zbytočne zdržovať – hlavne, ak by bolo nutné systém reštartovať.

Takisto je pri technickej kontrole auta na súťažiach nutné mnohokrát zapnúť auto do stavu "TS On" (t.j. nabiť kondenzátory v meniči). Čas určený na splnenie technickej kontroly je obmedzený a zbytočné zdržiavanie by mohlo viesť k časovému sklzu a potenciálnemu premeškaniu istých bodovaných disciplín. Ideálne chceme mať čas prednabíjania pod 1.5s. Potrebné údaje k výpočtom sú uvedené v tabuľke 2.4.

Tab. 2.4: Súhrn údajov potrebných k výpočtu prednabíjacieho odporu.

C_{DClink}	Kapacita meniča	191 μF
U_{bat}	Maximálne napätie	591.6 V
R_{TS}	Odpor TS	169 m Ω
I_{AIR_max}	Maximálny AIR prúd	50 A
$t_{precharge}$	Doba prednabíjania	<1.5 s

Potrebné percento prednabitia kondenzátorov vypočítame jednoducho pomocou Ohmovho zákona ako

$$1 - \frac{I_{max} \cdot R_{TS}}{U_{bat}} = 1 - \frac{50 \text{ A} \cdot 169 \text{ m}\Omega}{591.6 \text{ V}} = 98.57\%. \quad (2.8)$$

Vzorec pre hodnotu odporu vyjadríme úpravou funkcie pre hodnotu napätia na kondenzátore v čase.

$$\begin{aligned} U_C(t) &= U \cdot (1 - \exp(\frac{-t}{R \cdot C})) \\ \frac{U_C(t)}{U} &= 1 - \exp(\frac{-t}{R \cdot C}) \\ 1 - \frac{U_C(t)}{U} &= \exp(\frac{-t}{R \cdot C}) \\ \ln(1 - \frac{U_C(t)}{U}) &= \frac{-t}{R \cdot C} \\ R &= -\frac{t}{\ln(1 - \frac{U_C(t)}{U}) \cdot C} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Hodnota $\frac{U_C(t)}{U}$ je vlastne naše percento prednabitia, a tak dosadením dostávame hodnotu

$$R = -\frac{1.5 \text{ s}}{\ln(1 - 0.9857) \cdot 191 \mu\text{F}} \cong 1950 \Omega. \quad (2.10)$$

Kritické a limitujúce požiadavky pre tento rezistor je tiež špičkový výkon P_{peak} , priemerný výkon P_{avg} a celková stratová energia E . Tie vypočítame pred určením presnej hodnoty odporu (resp. jeho sériovo-paralelnej hodnoty), aby sme ich vedeli správne vybrať.

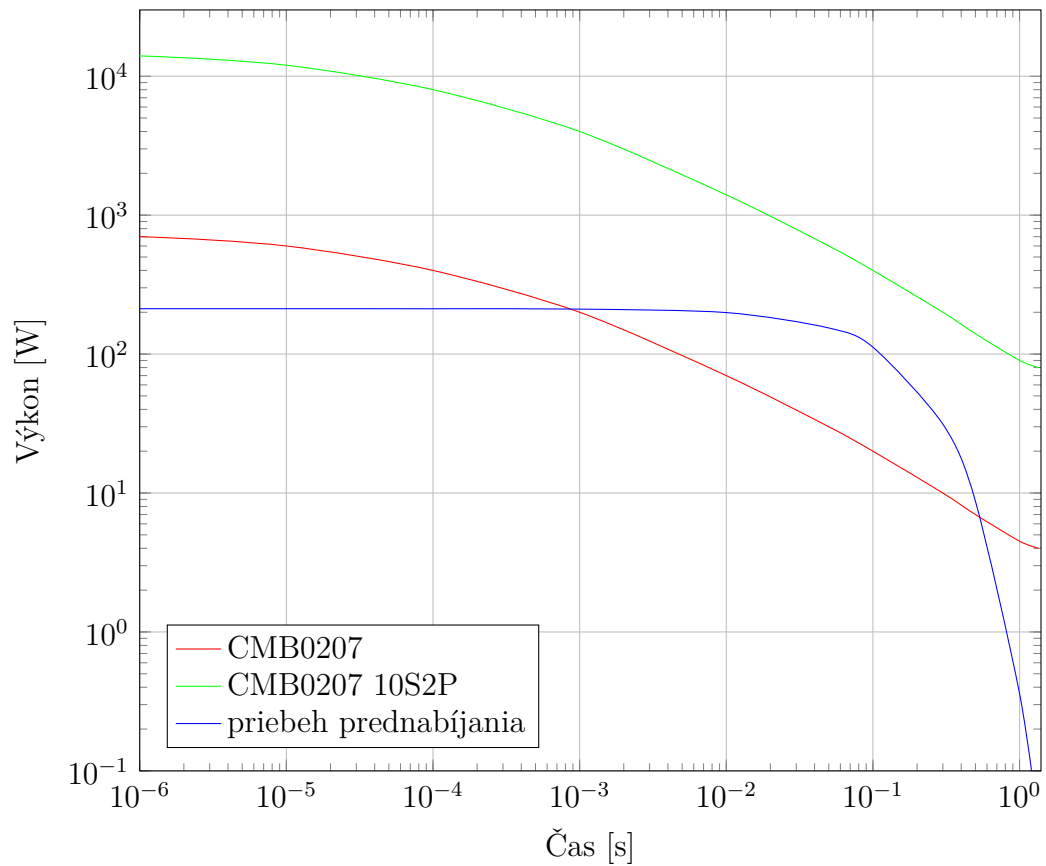
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{bat}^2 = \frac{1}{2} \cdot 191 \mu\text{F} \cdot (591.6 \text{ V})^2 = 33.4 \text{ J} \quad (2.11)$$

$$P_{peak} = \frac{U_{bat}^2}{R} = \frac{(591.6 \text{ V})^2}{1950 \Omega} = 179.4 \text{ W} \quad (2.12)$$

$$P_{avg} = \frac{E}{t} = \frac{33.4 \text{ J}}{1.5 \text{ s}} = 22.2 \text{ W} \quad (2.13)$$

Hľadáme teda rezistor ktorý musí byť schopný zvládnuť takmer 180 W impulzy. Tieto charakteristiky musí navyše podľa pravidiel spĺňať aj pri teplote okolia 85 °C (viď. príloha E, pravidlo EV 4.5.3). Okrem hmotnosti nás tiež limitujú bežne dostupné rezistory svojím technickým listom, kde málokedy povoľujú takto výrazné preťažovanie, hlavne pri vysokých teplotách – maximálny výkon sa im znižuje lineárne s teplotou okolia. Pre ušetrenie hmotnosti a miesta bolo navrhnuté vlastné riešenie, ktoré je vyskladané sério-paralelným usporiadaním rezistorov CMB 0207 od firmy Vishay. [41] Rezistor CMB 0207 je vo forme MELF puzdra a ich odporový element je vyrobený z tenkého uhlíkového filmu. Svojou konštrukciou sú veľmi vhodné do aplikácií, ktoré vyžadujú vysoké pulzné zaťažovanie, kde oproti klasickým tenkovrstvým alebo hrubovrstvým rezistorom vydržia násobne väčšie preťažovanie. Hrubovrstvé a tenkovrstvé rezistory (v podobne veľkom púzdre 1206) vydržia veľmi krátke impulzy 20 W (do 200 W pri použití špeciálnej rady). MELF rezistory z uhlíkového filmu vydržia impulzne až 2000 W vďaka svojej unikátnej konštrukcii a vďaka homogénnemu trimovaniu odporu (presnému dostaveniu odporu napr. laserom), čím nevznikajú lokálne namáhané miesta ako pri trimovaní štandardných rezistorov. [42]

Finálna konfigurácia vznikla použitím 20 MELF rezistorov CMB 0207 s hodnotou 330 Ω v konfigurácii 10S2P (10 sériovo, 2 paralelne) spolu s PTC ochranou. Tá je spojená termálne vodivým epoxidom s rezistormi a poskytuje ochranu v prípade nepravdepodobnej udalosti, kde sa skratuje prednabíjacie relé, kondenzátory sa nepodarí nabiť a systém správy batérie túto udalosť nezachytí. Týmto sme dosiahli odpor s hodnotou 1650 Ω. V tabuľke 2.5 je porovnanie nášho riešenia (zahŕňajúce hmotnosť DPS) s použiteľnou alternatívou. Výpočet potrebného množstva rezistorov prebiehal grafickou metódou. Bol vygenerovaný priebeh nabíjania kondenzátorov a vynesená aproximovaná závislosť maximálneho zaťažovania na dobe trvania impulzu, spolu s charakteristikou nami vypočítanej kombinácie – viď. obrázok 2.9. Vidíme, že najkritickejšie miesto je medzi 10 až 100 ms od počiatku impulzu, kde je zvolená rezerva najmenšia.



Obr. 2.9: Závislosť maximálneho výkonu prednabíjacieho rezistora na dobe impulzu.

Tab. 2.5: Porovnanie vlastného prednabíjacieho odporu s komerčným riešením.

Model		Ohmite 270 [43]	Vishay CMB 0207 10S2P
Nominálny výkon	[W]	25	20
Špičkový výkon	[W]	250	14000
Hmotnosť	[g]	43	7

2.8 Vybíjanie kondenzátorov

Podľa pravidla EV 4.9.1 a EV 6.1.5 (viď. príloha E) sa musí v meniči (resp. v jednotke, ktorá sa od meniča nedá odpojiť napríklad konektorom), nachádzať vybíjací obvod (oficiálne angl. discharge circuit). Ten má na starosti vybitie vnútorných kondenzátorov na vysokonapäťovom medziobvode na "bezpečné napätie" – t.j. pod 60 V. Musí trvať menej ako 5 sekúnd a musí sa spustiť vždy, keď sa do meniča nedostáva napájanie z bezpečnostného vypínacieho obvodu – oficiálne SDC (Shutdown circuit - vypínací obvod). Ten prechádza celým autom a všetkými bezpečnostnými jednotkami a vypínacími núdzovými tlačidlami. Ak je všetko v poriadku a nikde nie je odpojený, na svojom konci napája AIR relé v batérii (t.j. vysoké napätie môže byť zopnuté na jej výstup) a odpája tento vybíjací obvod. Musí fungovať aj za podmienok, keď auto stratí napájanie úplne – to znamená, že sa nesmie spoliehať na žiadne iné externé napájanie.

Samotné vybíjanie je uskutočnené obyčajným výkonovým odporom, ktorý zvládne maximálne napätie a je správne dimenzovaný na požadovaný výkon. Keďže chceme, aby boli požiadavky na rezistor čo najmenšie, zvolíme si (s rezervou) dlhú vybíjajúcu dobu – okolo 4.5 s. Vzorec pre tento rezistor odvodíme malou úpravou vzorca 2.9.

$$R = -\frac{t}{\ln\left(\frac{U_C(t)}{V}\right) \cdot C} = -\frac{4.5 \text{ s}}{\ln\left(\frac{60 \text{ V}}{591.6 \text{ V}}\right) \cdot 181 \mu\text{F}} = 10\,864 \Omega \quad (2.14)$$

Najbližšia štandardná hodnota je 10 kΩ, čím sa doba vybitia skrúti na 4.14 s. Napriek tomu, že tento rezistor vybijie kondenzátory a stačilo by, ak by zvládal iba impulzné zafažovanie, z bezpečnostných dôvodov tomu z veľkej časti zabraňuje pravidlo EV 4.9.1. Preto potrebujeme rezistor s výkonovým zafažením aspoň

$$P = U_{bat}^2/R = 35 \text{ W}, \quad (2.15)$$

ktoré zvláda aj pri okolitej teplote 85 °C (pravidlo EV 4.5.3, viď. príloha E).

Tomuto popisu na prvý pohľad vyhovuje rezistor L50J10KE (obrázok 2.10) [43] (50 W, 10 kΩ). Je avšak potrebné overiť výkonové zafaženie pri teplote 85 °C – tento rezistor má lineárne zníženie hodnoty (angl. derating) pri ohrievaní z 50 W pri 25 °C až na 0 W pri 350 °C. Lineárnou interpoláciou určíme výkon pri 85 °C ako

$$\begin{aligned} P_{85^\circ\text{C}} &= P_{25^\circ\text{C}} + (T - 25^\circ\text{C}) \cdot \frac{P_{350^\circ\text{C}} - P_{25^\circ\text{C}}}{350^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}} \\ &= 50 \text{ W} + (85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot \frac{0 \text{ W} - 50 \text{ W}}{325^\circ\text{C}} \\ &\cong 40.7 \text{ W}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

čo je viac ako potrebných 35 W, teda vyhovuje.



Obr. 2.10: Vybíjací odpor L50J10KE.

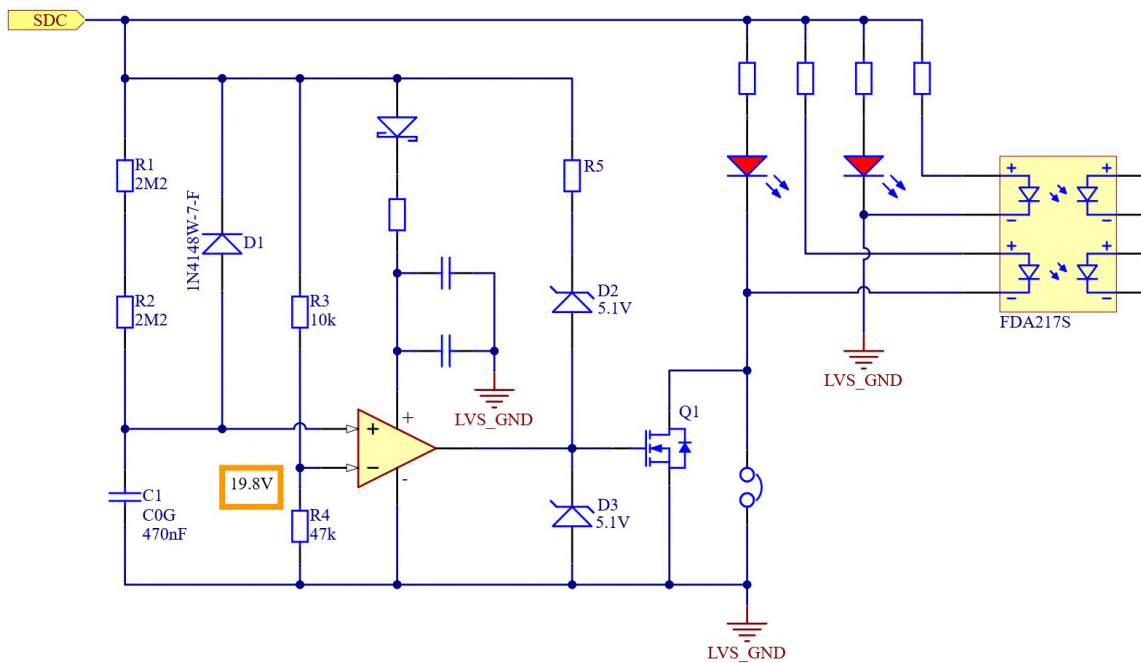
Ďalej potrebujeme spínač, ktorý bude bez priloženého napätia spínať vybíjací rezistor na medziobvod meniča. Radi by sme sa vyhli mechanickým riešeniam (ako normálne zatvorené relé) – pre tieto napätia sú to zbytočne drahé, veľké a ťažké súčiastky s vysokou spotrebou. Väčšina vhodných modelov sa ponúka iba vo formáte NO – bez napätia odpojené. Popisu ale dokonalo sedia unipolárne polovodičové tranzistory s vodivým kanálom – JFET, alebo aj MOSFET so zabudovaným kanálom (angl. depletion mode). Pre naše požiadavky na napätie a vzhľadom na aktuálnu trhovú dostupnosť bola najlepšia možnosť SMT JFET UF3N170400B7S[44].

Tab. 2.6: Vybrané parametre tranzistora UF3N170400B7S (pri 25 °C).

Výrobca		UnitedSiC
Technológia		SiC JFET
Napätie V_{CE}	[V]	1700
Prahové napätie	[V]	-9
Trvalý prúd	[A]	6.8
R_{DSon}	[m Ω]	400
Cena (12/2022)	[€]	9.50

Ak je prítomné napájanie z SDC na izolovanej strane meniča, musíme na hradlo JFETu priviesť záporné napätie, aby sme ho uzavreli a tým vypli proces vybíjania kondenzátorov medziobvodu. Keďže nepotrebujeme spínať tranzistor s vysokou frekvenciou a strmou, ako najelegantnejšie riešenie sa ponúka použitie galvanicky izolovaného tranzistorového budiča s fotovoltaickým článkom ako FDA217 od firmy IXYS[45]. Na primárnej strane má vysokoefektívnu infračervenú LED diódu a na sekundárnej strane fotovoltaický článok, takže nie je potrebné sekundárne napájanie pre budenie tranzistora. Takisto sa na sekundárnej strane nachádza integrovaný vybíjací obvod, ktorý sa postará o vybitie náboja na hradle tranzistora po odpojení napájania primárnej LED diódy.

Na pretekoch Formula Student sme sa stretli s alternatívnymi riešeniami tohoto problému, ako napríklad využívanie faktu, že netreba kondenzátory vybiť úplne, ale je dostatočné dosiahnuť napätie menšie ako 60 V. Tímy používali BJT, respektíve klasické MOSFETy (s indukovaným kanálom), ktorých činnosť vypínali pomocou klasického optočlenu. Toto riešenie má jednu veľkú nevýhodu – nemožnosť úplného vybitia meniča (kvôli biasovaniu tranzistora z vysokého napätia). Napriek tomu, že je toto riešenie podľa pravidiel legálne, pri technickej kontrole auta na súťažiach sa nedá jednoducho a rýchlo overiť prítomnosť a funkčnosť vybíjacieho odporu (napríklad pomocou multimetra) – keďže meracie napätie (ohmmetra) v jednotkách voltov nie je schopné otvoriť vybíjací tranzistor.



Obr. 2.11: Schéma riadenia odpájania vybíjacieho odporu.

Keďže budič FDA217 obsahuje dva nezávislé vstupy, druhý môžeme použiť na implementovanie vlastnej funkcionality, ktorej požiadavka vznikla počas testovania Dragona e1. Občas sa môže stať, že sa SDC obvod vypne iba na chvíľu – napríklad keď pilot zatlačí vypínacie tlačidlo a hneď ho odistí, alebo keď sa nejaký senzor vráti po krátkom výpadku ihneď do funkčného stavu. Preto bol navrhnutý obvod, ktorý po prechode SDC do funkčného stavu drží vybíjací obvod zapojený aspoň ďalšie 3 sekundy.

Rezistory R3 a R4 vytvárajú referenčné napätie, ktoré sa porovnáva s napätím časovacieho kondenzátora C1 nabíjaného rezistormi R1 a R2. Po prekročení doby zapnutého SDC obvodu sa zapne tranzistor Q1, čím sa vybíjací rezistor odpojí (na gate mu je privedené záporné napätie pomocou FDA217S). Dióda D1 slúži na vybitie

časovacieho kondenzátora C1. Kvôli malému prúdu časovacieho obvodu musí mať táto dióda veľmi malý zvodový prúd (angl. leakage current), aby neovplyvňovala funkcionality. Zenerova dióda D2 slúži na zabránenie predčasnej aktivácie, t.j. pri malom napätí SDC, kým začne fungovať komparátor. Zenerova dióda D3 obmedzuje napätie na gate tranzistora Q1 pri vysokom napätí SDC. Ak bude požiadavka túto funkcionality deaktivovať, na DPS je na to určený tzv. solder jumper – mostík, ktorý stačí spojiť trochu spájky. Schéma celkového obvodu je na obrázku 2.11

Monitorovanie vybíjacieho obvodu sa na pretekoch kontroluje pomocou dvoch izolovaných konektorov typu "banana jack", ktoré sa nachádzajú na boku auta a sú priamo pripojené ku kondenzátorom na medziobvode. Nazýva sa TSMP (Tractive system measuring point). Toto vedenie nesmie byť chránené poistkou – na ochranu pred skratom týchto konektorov je každý z meracích bodov pripojený na medziobvod cez 15 kΩ rezistor. Tieto konektory sa využívajú tiež pri simulácii chyby izolácie, kedy sa cez ne pripojí testovací odpor na šasi (zem) auta a čaká sa na reakciu zariadenia IMD (Insulation monitoring device).

Uvažuje sa potenciálny vzájomný skrat týchto meracích rezistorov – celkový stratový výkon jedného rezistora je vypočítaný vo vzorci 2.17.

$$\begin{aligned}
 P_{TSMP} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{bat}^2}{2 \cdot R_{TSMP}} \\
 P_{TSMP} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(591.6 \text{ V})^2}{2 \cdot 15 \text{ k}\Omega} \\
 P_{TSMP} &= 5.834 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

Tieto rezistory musia byť takisto vhodné pre naše pracovné napätie a maximálnu teplotu 85 °C. Hodnoty vybraného rezistora ROX7J15K je potrebné pre účely technickej kontroly auta podložiť výpočtom a interpoláciou. V technickom liste je uvedená maximálna strata 7 W do 70 °C, až po 0 W pri 235 °C. [46] Výpočet rozdelíme do dvoch krokov – najprv pomocou vzorca 2.18 získame maximálne percentuálne vyťaženie pri 85 °C interpolovaním okrajových podmienok.

$$\begin{aligned}
 P_T \% &= \frac{(T - T_{min}) \cdot (P_{min} \% - P_{max} \%)}{T_{max} - T_{min}} + 100 \% \\
 P_{85} \% &= \frac{(85 \text{ °C} - 70 \text{ °C}) \cdot (0 \% - 100 \%)}{235 \text{ °C} - 70 \text{ °C}} + 100 \% \\
 P_{85} \% &= 90.9 \%
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Nasledovne pomocou vzorca 2.19 získame konkrétnu hodnotu zafažovania odporu.

$$\begin{aligned}P_{85} &= P_{85\%} \cdot P_{nom} \\P_{85} &= 90.9\% \cdot 7\text{ W} \\P_{85} &= 6.363\text{ W}\end{aligned}\tag{2.19}$$

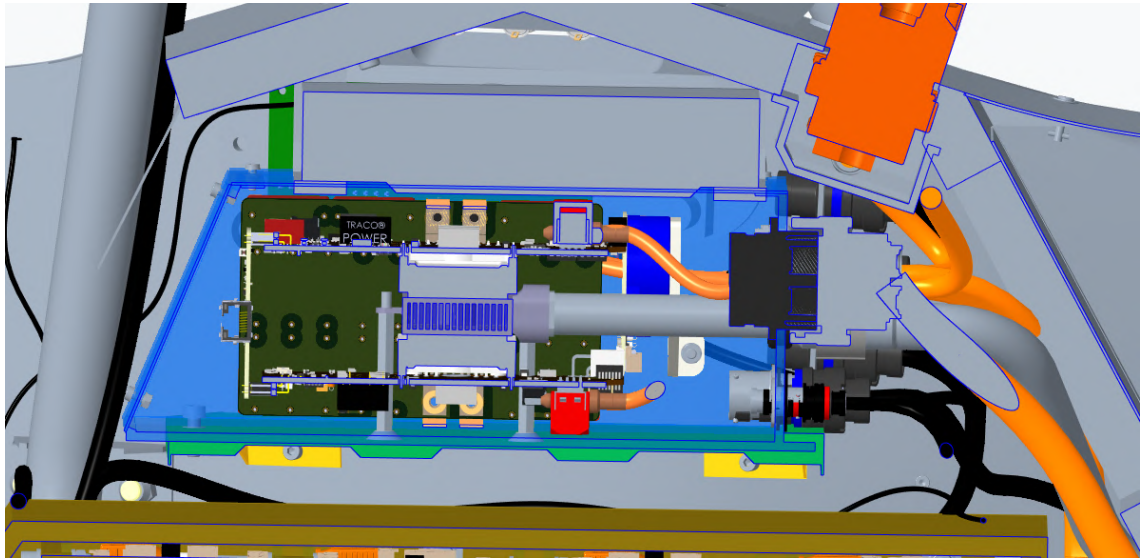
Vypočítaná hodnota (6.363 W) je vyššia ako požadovaná (5.834 W) a tým sú podmienky splnené.

2.9 Umiestnenie meniča

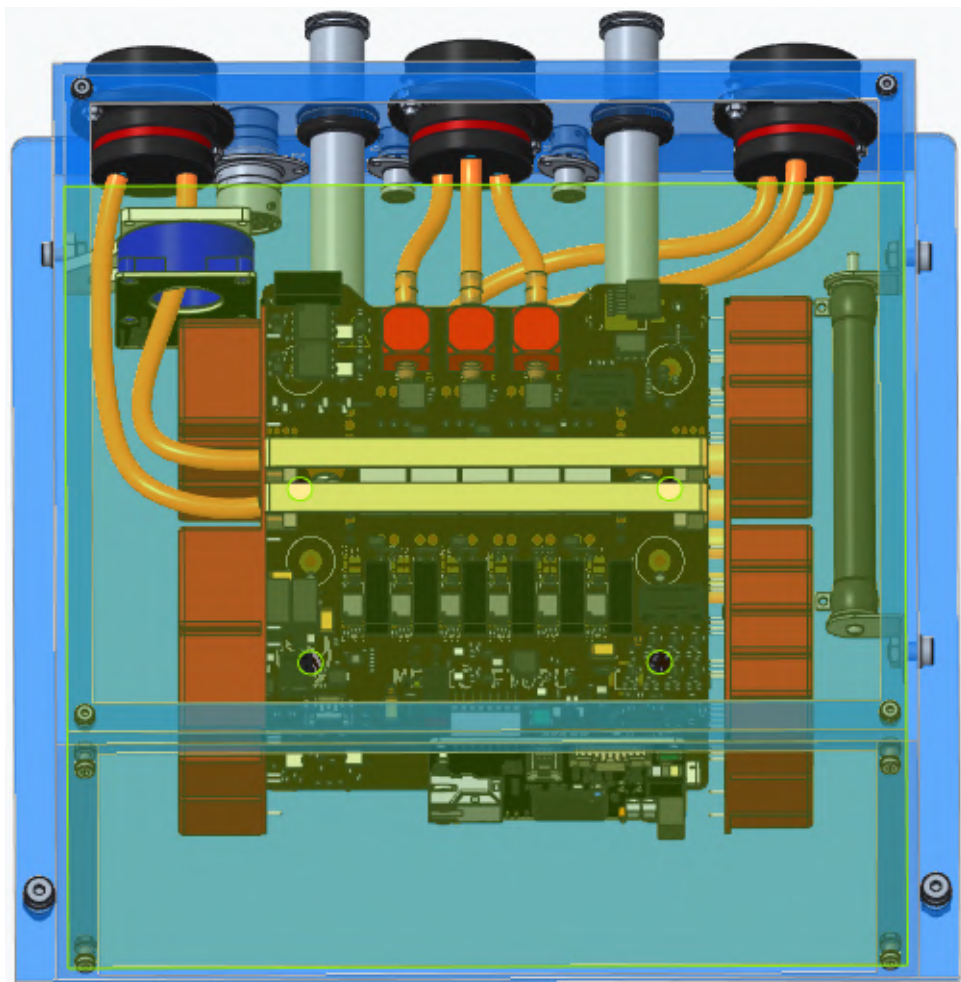
Menič je umiestnený v zadnej časti celokarbónového šasi (alt. monocoque alebo unibody), za sedačkou vodiča nad batériou. Na obrázku 2.12 je vidno jeho umiestnenie, pohľad smerom od ľavého boku auta. Je položený a upevnený na poličke vylaminovanej z aramidu (na obrázku zelená a žltá). Tá je upevnená k bočným stenám šasi štyrmi skrutkami. Menič sa do poličky zasunie, kde ho zozadu prichytáva ohyb na poličke a zpredu sa zaisťuje dvoma skrutkami. Tesne pred meničom (na fotke vľavo) sa nachádza ochranný firewall, nad meničom je umiestnený počítač pre bezpilotné (driverless) ovládanie auta a za meničom sa v hornej časti nachádza HVD (High voltage disconnect - vysokonapäťový prerušovač, vid. pravidlo EV 4.8.1 v prílohe E).

Na obrázku 2.13 vidíme vnútorné usporiadanie súčiastok a kabeláže v meniči. Okrúhly konektor naľavo hore je prívod vysokého napätia z batérie. Jeden z vodičov prechádza cez senzor prúdu, ktorý vyhodnocuje vstupný výkon do meniča. Tento signál je analógovo (a neprogramovateľne) vyhodnocovaný – pokiaľ tento výkon presahuje 5 kW. Táto hodnota je potrebná pre funkčnosť BSPD, ktorú nám určuje pravidlo T 11.6 (príloha E). Vedľa batériového konektora sa smerom doprava nachádzajú výstupné konektory pre motory. Vedľa stredného konektora sa z oboch strán nachádzajú hliníkové vývody vodného chladiča (ktorý dobre vidíme v bočnom reze na obrázku 2.12). Všetky vysokonapäťové vodiče sú označené oranžovou farbou. Na pravej strane meniča je na stene umiestnený vybíjací rezistor.

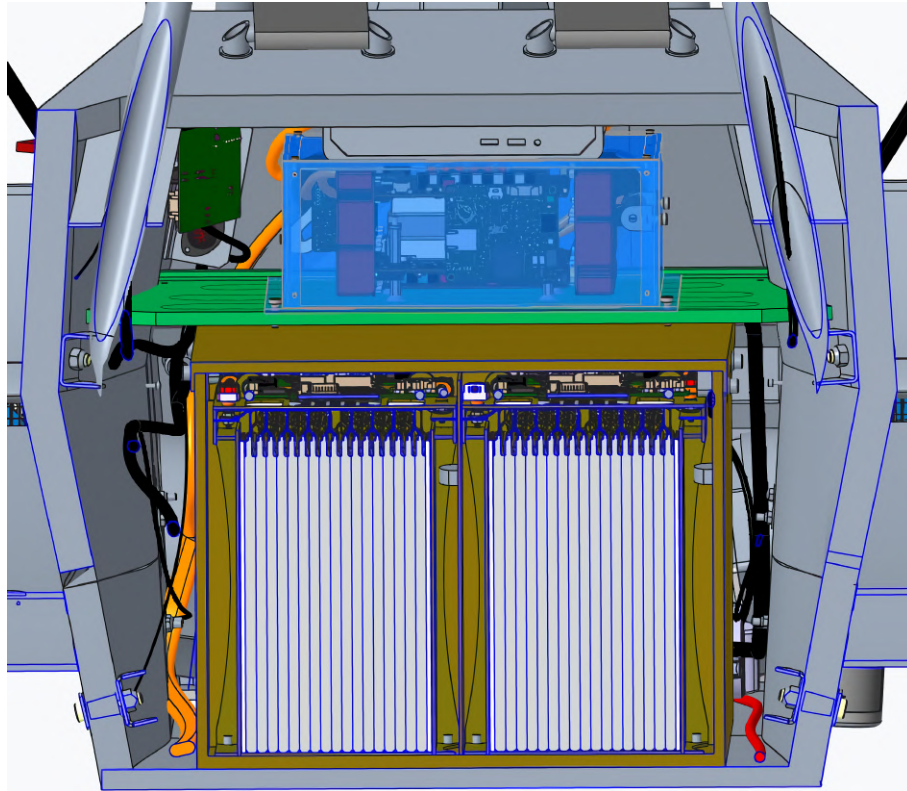
Vhodným návrhom dosiek sa podarilo skonštruovať aramidový izolačný obal (nie je súčasťou tejto práce) s maximálnymi rozmermi 252 x 264 x 99 (cieľ bol 380 x 300 x 100 – vid. tabuľka 2.7). Svojimi tvarmi stien ale zaberá ešte menej miesta ako kváder opisujúci maximálne rozmery, a to konkrétne 5.1 litra. Oproti meničom z generácie Dragon e1 a Dragon e2 je to úspora viac než 50 %.



Obr. 2.12: Rez auta a pohľad na menič (modrá farba) z boku.



Obr. 2.13: Náhľad rozloženia konektorov a kabeláže v meniči.

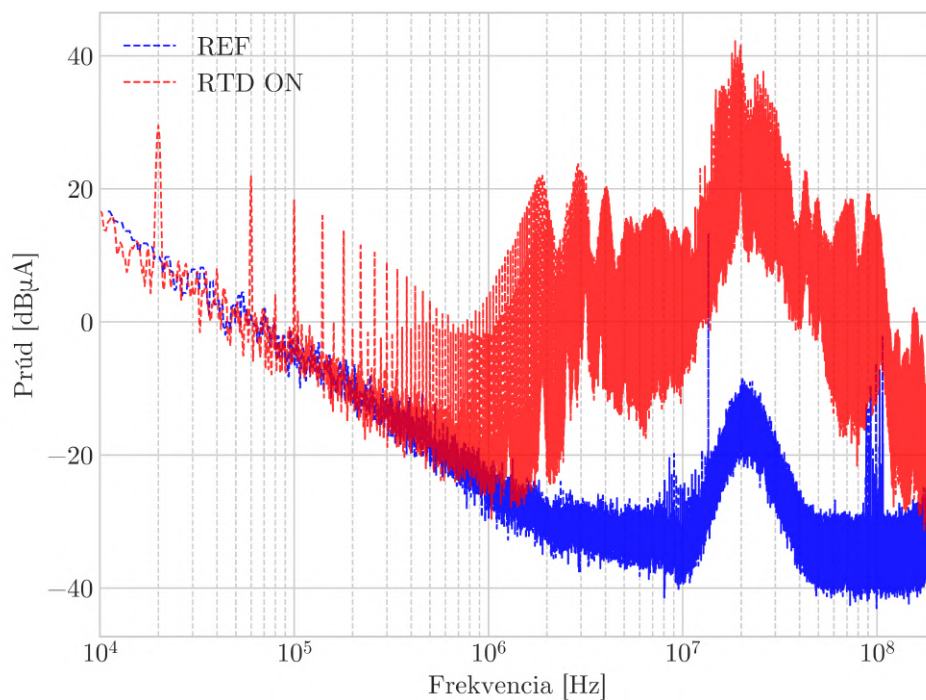


Obr. 2.14: Rez auta a pohľad na menič (modrá farba) spredu.

Tab. 2.7: Súhrn špecifikácii a požiadavok na menič eD3.

	eD1	eD2	eD3 (požiadavky)	eD3 (návrh)
m [kg]	6	3.7	< 3	3
w [mm]	440	380	< 300	252
l [mm]	190	300	< 280	264
h [mm]	150	120	< 100	99
V [L]	12.5	13.7	< 8.5	5.4

Po skúsenostiach s problémami, ktorých príčina bolo elektromagnetické rušenie pochádzajúce z meniča, bola iniciatíva lepšie chrániť a izolovať menič od zvyšku auta. Počas posezónneho testovania auta Dragon e2 sme v spolupráci s doktorom Dřínovským (FEKT UREL) skúmali šum na analógových signáloch a v okolí komponentov v rôznych režimoch. Našli sme výhradne šum zhodný so spínacou frekvenciou a jeho vyšších harmonických. Na grafe 2.15 môžeme vidieť tento priebeh z merania na analógovom signále polohy tlmiča počas jazdného režimu RTD_ON, kde menič spína fázy motora, avšak s ním netočí (v porovnaní so šumovým pozadím sondy a okolia). Pri vyšších frekvenciách to možno vyzerá, že šum nabera tvar spojitého spektra, avšak ak by sme si skúmanú oblasť (>1 MHz) priblížili, našli by sme špičky na násobku spínacej frekvencie o $20 \text{ dB } \mu\text{A}$ väčšie ako spojité spektrum pozadia.



Obr. 2.15: Dáta z merania EMI prúdovou sondou R&S EZ-17 pre analógový signál polohy tlmiča pre náklon.

Možné riešenie by bolo použitie celohliníkového obalu a návrh vhodných filtrov umiestnených hneď na vstupe obalu (aby sa nerušil efekt Faradayovej kliečky). Pre efektívne tienenie EMI nie je potrebný hrubý materiál, avšak nové pravidlá určujú, že pre obaly vysokonapäťových komponentov musí byť použitý plech o hrúbke minimálne 0.5 mm . Toto riešenie ale nebolo preferované vzhľadom na výrazné navýšenie hmotnosti meniča.

Druhou alternatívou by bolo použitie tenkej medenej sieťky, ktorá by bola počas laminácie položená medzi vrstvy elektricky izolujúceho aramidid a správne vyvedená

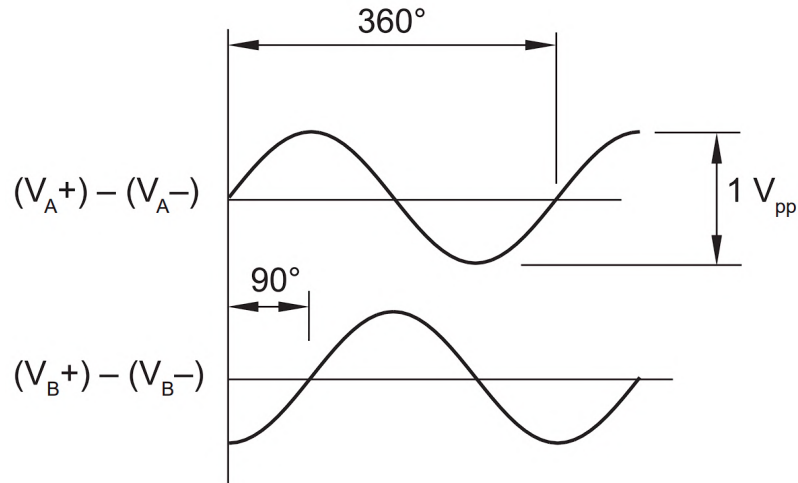
na uzemňujúci kontakt. Počas testovania tohoto riešenia avšak prišla zmena pravidiel, ktorá takúto konštrukciu zakazuje – povolená ostala konštrukcia z výhradne izolujúcich materiálov (okrem spojovacieho materiálu), alebo vodivých – aspoň 0.5 mm hrubých. Cieľ odolného návrhu sa teda presunul inde – minimalizovať šum lepšou filtráciou signálov, optimalizáciou skladby meniča, minimalizovaním analógových signálov a minimalizácia dĺžky súhlasného vedenia kabeláže popri meniči a vodičom k motoru.

2.10 Snímanie polohy motora

Pre správnu reguláciu spínania fáz motora je potrebné vedieť jeho aktuálnu rýchlosť a polohu v rámci otáčky (mechanický a elektrický uhol). Na výber existuje viacero topológií senzorov. Najjednoduchšie a najlacnejšie je použitie hallových sond, ktorým avšak chýba presnosť (len 6 rôznych hodnôt na mechanickú otáčku motora) a odolnosť voči okolitým elektromagnetickým poliam. Ďalšou možnosťou je použitie senzora typu resolver, ktorý je efektívne malý motor-generátor. Ten sa točí spolu s rotorom a snímame jeho polohu meracími cievkami generujúcimi sínusový a kosínusový priebeh pohybu motora. [47]

Pre nadmernú veľkosť resolversu bola vybraná ďalšia alternatíva – senzor na princípe snímania rotácie malého magnetu na rotore – RM22 od firmy RLS. [48] Tento senzor je aj spolu s magnetom oproti konkurencii veľmi malý (najväčší priemer je 22 mm) a zvláda snímať otáčky až do 30 000 rpm s typickou presnosťou $\pm 0.5^\circ$.

V rovnakom tele je dostupný vo viacerých variantách výstupu – lineárny analógový výstup, analógový sin/cos výstup (unipolárna emulácia resolversu), komplementárny analógový sin/cos výstup (bipolárna emulácia resolversu), inkrementálny výstup RS422, BiSS C digitálne rozhranie a SSI digitálne rozhranie. Hneď môžeme vylúčiť inkrementálny výstup (ktorý nepotrebujeme, stačí nám údaj o aktuálnej polohe v rámci otáčky) a unipolárne analógové výstupy (nedostatočná odolnosť voči rušeniu). Po konzultácii s výrobcom sme vylúčili aj digitálne rozhrania. Pre dosiahnutie svojej 13-bitovej presnosti v sebe obsahujú dodatočnú logiku, ktorá zabraňuje chybám monotónnosti a tým sa ich latencia pohybuje okolo 220 μ s (SSI výstup). To je neprijateľné, pretože po prepočte na 20 000 rpm a pre štvorpólový motor to je chyba merania až 26° (pre elektrickú otáčku). Táto chyba sa dá čiastočne kompenzovať, ale iba s predpokladom, že je latencia konštantná. Zároveň to pridáva zbytočnú neistotu merania a komplikácie s ladením kompenzácie. Preto bol zvolený senzor RM22BC s komplementárnym (diferenčným) výstupom polohy sin/cos (obrázok 2.16), ktorý má latenciu okolo 10 μ s.



Obr. 2.16: Priebeh (spracovaného) výstupu diferenčného sin/cos enkodéru.

2.11 Výpočet mŕtveho času spínania

Pre správne ovládanie tranzistorov a minimalizovanie strát je potrebné správne nastaviť mŕtvy čas (angl. *deadtime*). Táto doba nám zabraňuje tzv. prestreleniu (angl. *shoot through*) cez tranzistory – to nastane, ak je na istú dobu (aspoň čiastočne) otvorený horný aj dolný tranzistor danej fázy. Ak tomuto javu nezabráňime, spôsobujeme nadbytočné tepelné straty, alebo môžeme spôsobiť až tepelné zničenie tranzistorov (angl. *thermal runaway*).[49]

Na výpočet odhadu tohoto času použijeme vzorec z manuálu [49]. Nasledovne je odporúčané tieto hodnoty overiť a optimalizovať experimentálne pre rôzne okolité podmienky.

$$t_{dead} = (t_{d_off_max} - t_{d_on_min} + t_{pdd_max} - t_{pdd_min}) \cdot SM \quad (2.20)$$

Jednotlivé parametre sú uvedené v tabuľke 2.8.

Tab. 2.8: Parametre pre výpočet *deadtime*.

maximálne oneskorenie vypínania tranzistora	$t_{d_off_max}$	[ns]	414
minimálne oneskorenie zapínania tranzistora	$t_{d_on_min}$	[ns]	185
maximálne propagačné oneskorenie budiča	t_{pdd_max}	[ns]	262
minimálne propagačné oneskorenie budiča	t_{pdd_min}	[ns]	226
safety margin – bezpečnostný faktor	SM	[-]	1.2

Pomocou daných parametrov vypočítame celkový mŕtvy čas t_{dead} ako

$$t_{dead}[\text{ns}] = (414 \text{ ns} - 185 \text{ ns} + 262 \text{ ns} - 226 \text{ ns}) \cdot 1.2 = 318 \text{ ns}. \quad (2.21)$$

Táto dĺžka sa nastavuje ako počet jednotlivých taktov hodín, kedy časovač mikrokontroléra nezopne vývod na otvorenie horného, ani dolného tranzistora. Interná frekvencia tohoto časovača je v našom prípade 144 MHz, počet taktov vypočítame (a nasledovne zaokrúhlime nahor) nasledovne:

$$ticks[-] = t_{dead} \cdot f = 318 \text{ ns} \cdot 144 \text{ MHz} = 45.79 \cong 46 \quad (2.22)$$

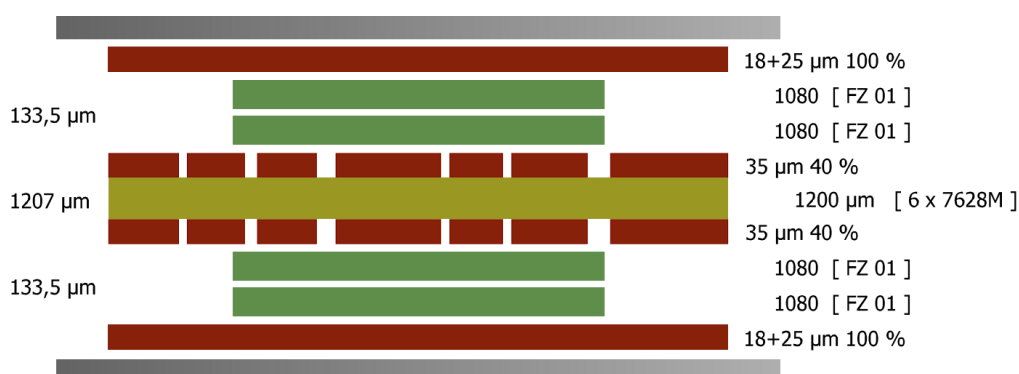
3 Návrh dosiek plošných spojov

3.1 Skladba DPS

Pri návrhu komplexnejších dosiek plošných spojov je nutné detailne analyzovať potreby obvodu a správne určiť skladbu dosiek plošných spojov - nie len počet vrstiev, ale aj typ základného materiálu a predimpregnovaného laminátu (prepregu) a jeho hrúbku. Pre vysokonapäťovú časť nás najviac zaujíma dielektrická pevnosť materiálu a teplotná odolnosť materiálu. Pre signály požadujúce riadenú impedanciu (v našom prípade USB a Ethernet) je zase podstatné vedieť materiálové konštanty materiálu (hlavne relatívnu permitivitu materiálu) pre výpočet hrúbky ciest. Tento výber býva vždy ovplyvnený možnosťami výrobcu plošných spojov, v našom prípade je to firma Gatema PCB a.s. sídliaca v neďalekých Boskoviciach, keďže je sponzorom tímu TU Brno Racing.

Na systéme SCM sa nachádza takmer výlučne digitálna komunikácia (I2C a dI2C, CANbus, Ethernet) a návrh sa dokáže prispôbiť dostupným materiálom. Na obrázku 3.1 je skladba štvorvrstvej DPS dostupnej v ekonomickom POOL servise firmy Gatema. Podľa týchto hodnôt a po vyhľadání parametrov použitého prepregu Isola IS 400 ML[50] môžeme vypočítať parametre ciest na DPS – pre dosiahnutie požadovanej impedancie. Pre výpočet môžeme použiť voľne dostupné kalkulačky, ako napríklad PCB Toolkit od firmy Saturn PCB Design, Inc. V našom prípade sa vieme spoľahnúť priamo na interný výpočet návrhového softvéru Altium Designer, ktorý sa dynamicky prispôsobí zvolenému materiálu a požiadavkám, ktoré priamo aplikuje pri exporte 3D modelu či pri kontrole pravidiel (DRC - Design Rule Check) – viď. obrázok 3.2.

Pri systéme HVPB sú požiadavky náročnejšie vzhľadom na používané napätie 600 V. Pri jednoduchších vysokonapäťových návrhoch sa dajú časti s rozdielnym potenciálom častokrát fyzicky separovať. V našom prípade je ale toto vysoké napätie



Obr. 3.1: Skladba štvorvrstvej dosky POOL servisu firmy Gatema.

Top Ref	Bottom Ref	Width (...)	Trace Gap...	Impedance...	Dev...	Delay...
	2 - Layer 1	0.21113mm	0.25mm	99.99	0.01%	5.5557...
1 - Top Layer	3 - Layer 2	0.15mm	0.31077mm	99.98	0.02%	6.7254...
2 - Layer 1	4 - Bottom Layer	0.15mm	0.31077mm	99.98	0.02%	6.7254...
3 - Layer 2		0.21113mm	0.25mm	99.99	0.01%	5.5557...

Impedance Profile	
Description	ETH
Type	Differential
Target Impedance	100
Target Tolerance	10%

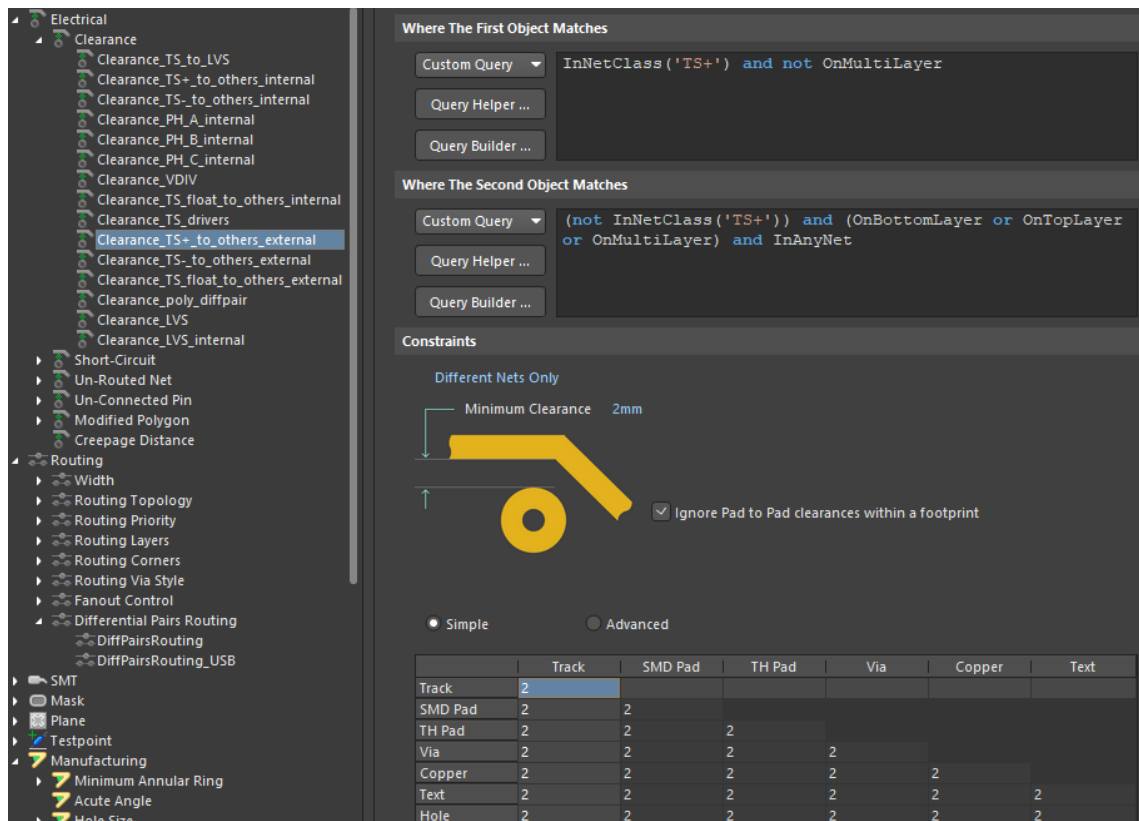
Board	
Stack Symmetry	<input checked="" type="checkbox"/>
Library Compliance	<input type="checkbox"/>
Layers	4
Dielectrics	5
Conductive Thickness	0.156mm
Dielectric Thickness	1.5mm
Total Thickness	1.68mm

Obr. 3.2: Výpočet šírky ciest pre ethernet v programe Altium Designer.

rýchlo spínané a pre správne fungovanie a zníženie generovaného elektromagnetického rušenia (EMI) potrebujeme minimalizovať zvodovú indukčnosť a vzdialenosť medzi referenčnými napäťovými úrovňami (plus a mínus z batérie). Toto vieme efektívne dosiahnuť alternovaním vrstiev v osi Z – striedaním polygónov kladného a záporného napájacieho napätia.

Týmto alternatívnym striedaním potenciálov medzi jednotlivými vrstvami avšak kladieme veľký stres v osi Z – teda cez jednotlivé vrstvy základného materiálu. Použitím náročnejšieho základného materiálu ponúkaného výrobcom Gatema – PCL370HR od firmy Isola so zvýšenou teplotou skelného prechodu (180 °C oproti 150 °C pri POOL servise) sa dostaneme na typickú dielektrickú pevnosť až 54 kV/mm (minimálne 30 kV/mm). [51] Pre niektoré materiály bolo testované, že pre dlhodobé prevádzkovanie (pod vplyvom zmien teploty, vlhkosti a starnutia materiálu) je vhodné túto hodnotu znížiť až o 80%. [52] Pre materiál PCL370HR to výjde na 6 kV/mm. Ak uvažujeme maximálne prepätie ako dvojnásobok nominálneho napätia, minimálna hrúbka dielektrika vychádza po výpočte na 0.2 mm. Po konzultácii s výrobcom sme zvolili celkovú hrúbku DPS na 2 mm a jednotlivé hrúbky sklolaminátu sa pohybujú v rozmedzí od 0.3 do 0.4 mm - tým pádom môžeme slobodne používať nad sebou nasledujúce vrstvy pre rôzne napäťové potenciály. Náhľad výrobnnej skladby DPS je v prílohe D.

Pri veľkých rozdieloch potenciálov je dôležitá horizontálna separácia rovnako ako vertikálna. Vo vnútorných vrstvách bolo pre HVPB zvolené dodržať aspoň 0.5 mm medzery a v externých vrstvách aspoň 2 mm. Čísla boli volené podľa doporučenia normy IPC-2221B, kde je pre 600 V odporúčaná vzdialenosť 0.5 mm pre interné vrstvy a 1.11 mm alebo 3 mm pre vrstvy s, alebo bez ošetrenia povrchu konformným



Obr. 3.3: Nastavenie odstupeu vysokonapäťových ciest v programe Altium Designer.

povlakom. Jednoduchá výpočtová tabuľka kompatibilná s normou IPC-2221B a diskusia k návrhovým pravidlám vysokonapäťového dizajnu je k dispozícii v zdroji [53]. Tieto pravidlá je nutné dodržiavať vzájomne medzi všetkými šiestimi budičmi fáz, medzi jednotlivými fázami a aj medzi napájacím napätím. Aby nedošlo ku chybe počas návrhu, všetky tieto požiadavky boli implementované ako samostatné pravidlá v CAD softvéri Altium Designer, kde bolo dodržiavanie kontrolované počas kreslenia dosky, aj počas finálnej kontroly (viď. obrázok 3.3).

Trochu netradičným požiadavkom systému HVPB je nutnosť nepoužívať ENIG (Electroless nickel immersion gold) ako povrchovú úpravu DPS. Táto povrchová úprava býva vnímaná ako jedna z najlepších, hlavne čo sa týka rovinnosti povrchu a doby spracovania DPS po výrobe. [54] Avšak nikel s hrúbkou 1 až 8 μm , ktorý sa nachádza na povrchu DPS pod vrstvou zlata, prejavuje feromagnetické vlastnosti a tým spôsobuje chyby merania zapríčinené hysteréziou. Preto výrobca odporúča použiť ako povrchovú úpravu HAL (Hot air levelling) alebo imerzný cín. [55]

3.2 Cena systému meniča

Vývoj meniča pre Dragon e3 bol financovaný tímom TU Brno Racing a spoluprácou so sponzormi. V tabuľke 3.1 sú zhrnuté orientačné ceny systémov pre výrobu jedného systému (t.j. bez významných množstevných zliav). Nie sú zarátané náhradné dosky, nadbytočné súčiastky (pre prípad straty pri osadzovaní) ani vývoj alebo prototypy.

Vývoj vlastného meniča začal efektívne sezónou Dragon e2 (koniec roka 2021) a posledná DPS pre Dragon e3 sa zadávala do výroby v máji 2023, preto je veľmi náročné odhadnúť čas (a teda aj cenu) vývoja.

Cena takisto nezahŕňa súčiastky na zakomponovanie meniča do obalu (konektory a protikusy, kabeláž, spojovací materiál), ani chladič alebo samotný aramidový obal.

Tab. 3.1: Súhrn cien jednotlivých subsystémov.

		HVPB	SCM	Kondenzátorová doska	Spolu
Súčiastky	[€]	2x 730	100	2x 40	1640
DPS	[€]	2x 120	40	2x 15	310
Spolu	[€]	2x 850	140	2x 55	1950

4 Implementácia systému

4.1 Príprava na použitie v súťaži Formula Student

Počas pretekov súťaže Formula Student musí prejsť celé auto komplexnou technickou previerkou po mechanickej a elektrickej stránke. Časť relevantných pravidiel je preložená v prílohe E. Prerekvizitou účasti na pretekoch je vyplnenie tzv. ESF (Electrical System Form) dokumentu. Tento musí byť načas odovzdaný a schválený odborníkmi. Menič podlieha hlavne kontrole jeho bezpečnostných prvkov – spôsob implementácie vybíjacieho rezistora a nadprúdová ochrana. Takisto bolo potrebné vypracovať technický list ku kompletnej jednotke meniča – ten sa nachádza v prílohe C. V technickom liste je systém meniča nazvaný "Dragon AMR", ako koncept komerčného názvu. Tiež sa v ňom nachádza 3D náhľad kompletného poskladaného systému v obale meniča (bez bočníc).

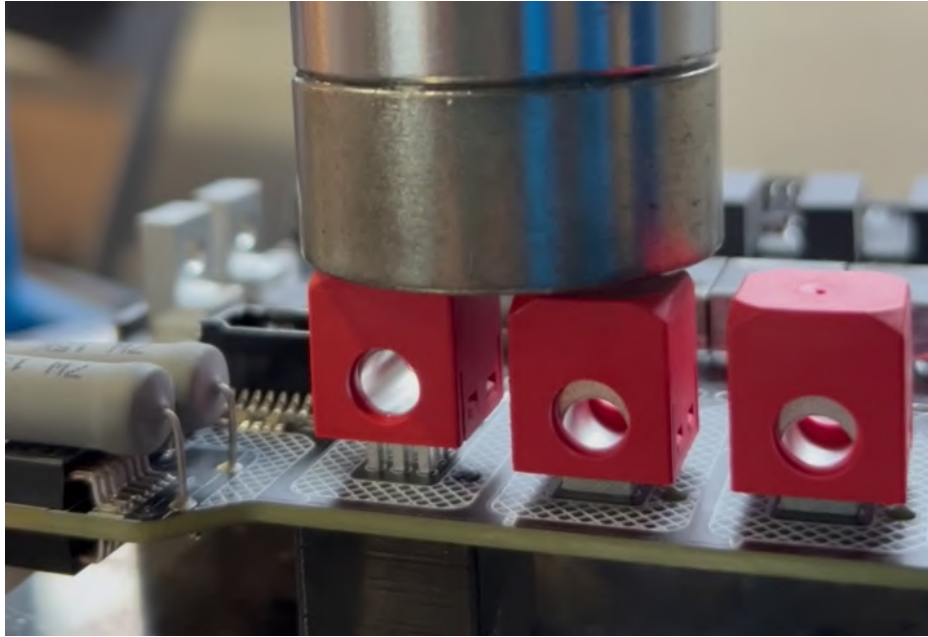
4.2 Osadzovanie

Vzhľadom na prototypové množstvo vyrobených kusov sa jednotlivé dosky osadzovali ručne – pomocou spájkovacej stanice s klasickým hrotom aj s kliešťami (na malé SMT a pomocou teplovzdušnej stanice. Kontrola spájkovaných spojov bola vykonávaná pod stereoskopickým mikroskopom Mantis. Na doskách sa nenachádza žiadne komplikované puzdro (typu BGA), takže neboli nutné pokročilé metódy osadzovania ani kvality kontroly.

Vysokonapäťová doska HVPB má ale isté špecifiká, ktoré určujú nutnú postupnosť v osadzovaní jednotlivých komponentov. Lisovanie konektorov (proces press-fit) a IGBT tranzistora sa odporúča urobiť ako posledný krok, keďže aplikovanie nadmerného tepla na lisovaný spoj ho môže permanentne uvoľniť a narušiť natoľko, že stratí svoju mechanickú stabilitu, navýši sa prechodový odpor a môže dôjsť aj ku delaminácii základného materiálu DPS. [40]

Priebeh procesu lisovania konektorov na dosku HVPB je na obrázku 4.1. Na tento proces bolo nutné vytvoriť niekoľko prípravkov (vyrobených metódou 3D tlače), ktoré držali dosku plošných spojov s osadenými súčiastkami vo vzduchu a v rovine priamo pod lisovaným miestom (aj medzi jednotlivými vývodmi konektorov a tranzistora). V prípade zlého návrhu by mohol nadmerný ohyb spôsobiť prasknutie relatívne krehkých spájkovaných spojov. Na DPS boli pre tieto prípravky navrhnuté dodatočné diery v okolí lisovaného miesta, aby nedošlo k zlému zarovnaniu dosky a prípravku.

Pred samotným lisovaním je potrebné osadiť ďalšiu súčiastku citlivú na nadmerné teplo – SMT metalizované PET filmové kondenzátory nad IGBT modulom tranzistora. Tie majú jasne definovaný profil spájkovania vo vlne aj v pretavovacej peci



Obr. 4.1: Proces lisovania (press-fit) výstupných konektorov.

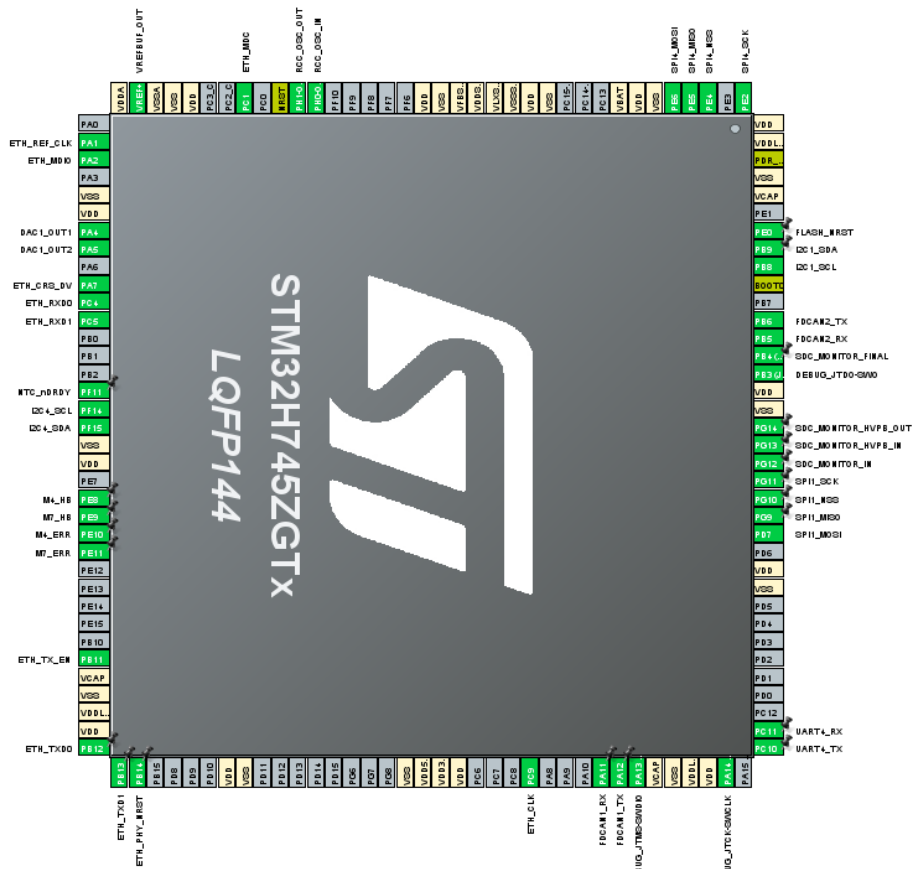
s nastavenou teplotnou špičkou na 250°C – pre menšie púzdra to je dokonca len 220°C . Preto výrobca odporúča použitie olovnatej spájkovacej zliatiny alebo použitie nízkotavných zliatin s prímiesou bizmutu. Ručné osadzovanie je tiež možné, ak sa dodrží čas kontaktu s puzdrom a čas na vychladnutie súčiastky pred spájkovaním druhej strany puzdra (5 sekúnd). [56] Je teda dôležité osadiť ich až po osadení okolitých súčiastok, aby sme predišli nadmernému stresu. Pred spájkovaním je potrebné nalepiť kondenzátory na DPS, keďže pravidlá súťaže (príloha E) určujú, že spájkované prechody vo vysokoprúdovej ceste trakčného systému musia byť dodatočne mechanicky poistené. To isté platí aj pre prúdové senzory, pod ktorými bol nechaný výrez pre jednoduchú aplikáciu lepidla na ich spodnú stranu – tým sa dá lepidlo jednoducho odstrániť v prípade nutnej opravy.

Po dokončení osadzovania je nutné dosku HVPB dôkladne zbaviť tavidlových zvyškov. Pre tieto účely je využívaná ultrazvuková čistička. Po dôkladnom očistení sa môže na dosku aplikovať konformný povlak, ktorý zvýši odolnosť pred kontamináciou povrchu. Tá by mohla znížiť izolačný odpor medzi LVS (Low voltage system - hlavný vypínač nízkonapäťového systému a TS (Trakčný systém). [54] Konformný povlak nie je nutné aplikovať na celú dosku, stačí na miesta separácie trakčného systému a nízkonapäťového systému a v okolí súčiastok s vysokým napätím. Izolačný odpor bol overený testerom RS PRO RS5500, ktorý pri najväčšom možnom kontrolnom napätí (1000 V) nevedel určiť hodnotu izolačného odporu, čo znamená, že bol väčší ako $2\text{ G}\Omega$. To je viac ako dostatočujúce, funkčné auto musí mať celkovú izoláciu väčšiu ako $300\text{ k}\Omega$.

4.3 Firmvér pre systém SCM

Firmvér pre jednotku SCM nie je na rozdiel od firmvéru pre vysokonapäťovú jednotku v správe externej firmy. Je implementovaný v jazyku C s asistenciou konfiguračného softvéru STM32CubeMX (obr. 4.2) a knižníc HAL. V tomto programe vieme graficky prideliť jednotlivé vývody mikrokontroléra k interným perifériám. Po nastavení parametrov periférií, ako aj komplexného hodinového stromu s PLL nasledovne vieme vygenerovať C kód, kde sú všetky periférie pred vstupom do hlavnej slučky programu správne inicializované. Ak upravujeme kód vo vyhradených miestach (alebo najjednoduchšie, iba si importujeme svoje súbory do hlavnej slučky), pri opätovnom generovaní kódu (napr. ak chceme zmeniť parametre periférií) nám CubeMX ponechá naše úpravy nedotknuté. Takto vygenerovaný kód bol upravovaný vo vývojovom prostredí CLion a ladený pomocou rozhrania OpenOCD.

Kód bol po základnej konfigurácii a oživení hardvéru ponechaný ďalšiemu vývoju funkcionalít členom tímu zo sekcie ”Software and Driverless” a tak nie je súčasťou tejto práce.

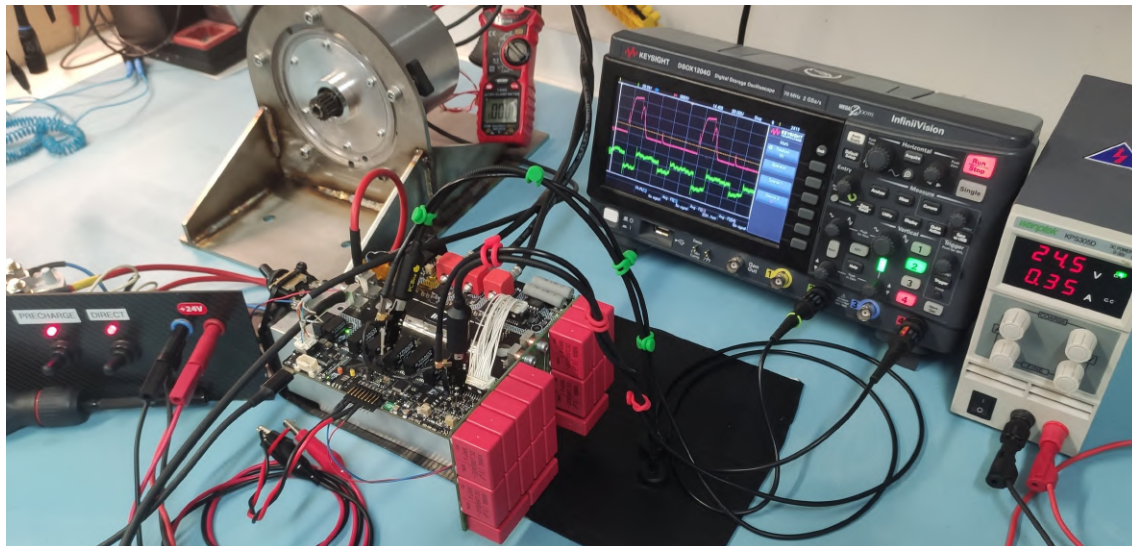


Obr. 4.2: Prostredie STM32CubeMX pri úprave konfigurácie systému SCM.

4.4 Oživovanie a testovanie vysokonapäťovej časti

Po skontrolovaní základných parametrov funkčnosti všetkých obvodov (kontrola skratov, kontrola regulácie jednotlivých napájacích vetiev) je potrebné nahráť do mikrokontroléra HVPB riadiaci firmvér. Na doske plošných spojov sa nachádzajú plôšky s mechanickými dierami pre pripojenie programovacieho konektora Tag-connect. Tým sa cez rozhranie SWD nahrá do mikrokontroléra zavádzač (angl. bootloader). Nasledovne sa všetky operácie (nahrávanie firmvéru, či nastavovanie kontroléra) vykonávajú výhradne cez USB-C konektor či cez systém SCM a jeho rozhranie Ethernet (ktoré so systémom HVPB komunikuje cez separátnu zbernicu CANbus).

Po nahraní firmvéru nasleduje základný funkčný test. Po pripojení USB-C kábla a spustení softvéru LaunchPad spustíme konzolu a prihlásime sa ku kontroléru pomocou mena a hesla (alebo pomocou "guest" prihlasovacích údajov, ktoré ale nemajú plné právomoci). Orientovanie v zložkách je podobné operačnému systému Linux – napríklad pomocou príkazu `ls` a `cd` (vrátane dostupných prepínačov) vieme zobraziť obsah priečinka, resp. pohybovať sa v strome priečinkov. Po zapnutí napájania meniča uvidíme v konzole výpis diagnostiky firmvéru. Ten po spustení skontroluje hardvér, stav jednotlivých tranzistorov (či nie je nejaký z nich v skrute) a stav motora (či je pripojený, odpojený alebo sa točí). Touto diagnostikou sa dá predísť prípadnému katastrofálnemu zlyhaniu ďalších súčiastok, ak niečo nie je v poriadku.



Obr. 4.3: Testovanie a verifikácia meniča s motorom.

4.5 Detekcia a ladenie parametrov

Po prvom spustení meniča je potrebné zmeniť základné parametre a identifikovať parametre motora a senzora. Pomocou príkazov `st` a `pr` vieme v každej zložke zobrazíť informácie o stavových a parametrových premenných, spolu s jednoduchým popisom, rozsahom a predvolenou hodnotou pred prípadnou užívateľskou zmenou. Ako prvé je potrebné nastaviť správny senzor polohy motora – v našom prípade sin/cos enkodéra pomocou príkazu `set /driver/prest 3`. Tiež je nutné v adresári `/driver/` nastaviť pomocou príkazu `set` technické parametre motora (nominálny prúd / napätie motora). Nasledovne môžeme vykonať identifikáciu motora príkazom `identlin`. Menič pomocou série pulzov identifikuje odpor a jednotlivé zložky indukčnosti daného motora. Príkazom `save` sa tieto odmerané hodnoty uložia do permanentnej pamäte. Výpis tohoto príkazu na našom motore vyzerá nasledovne:

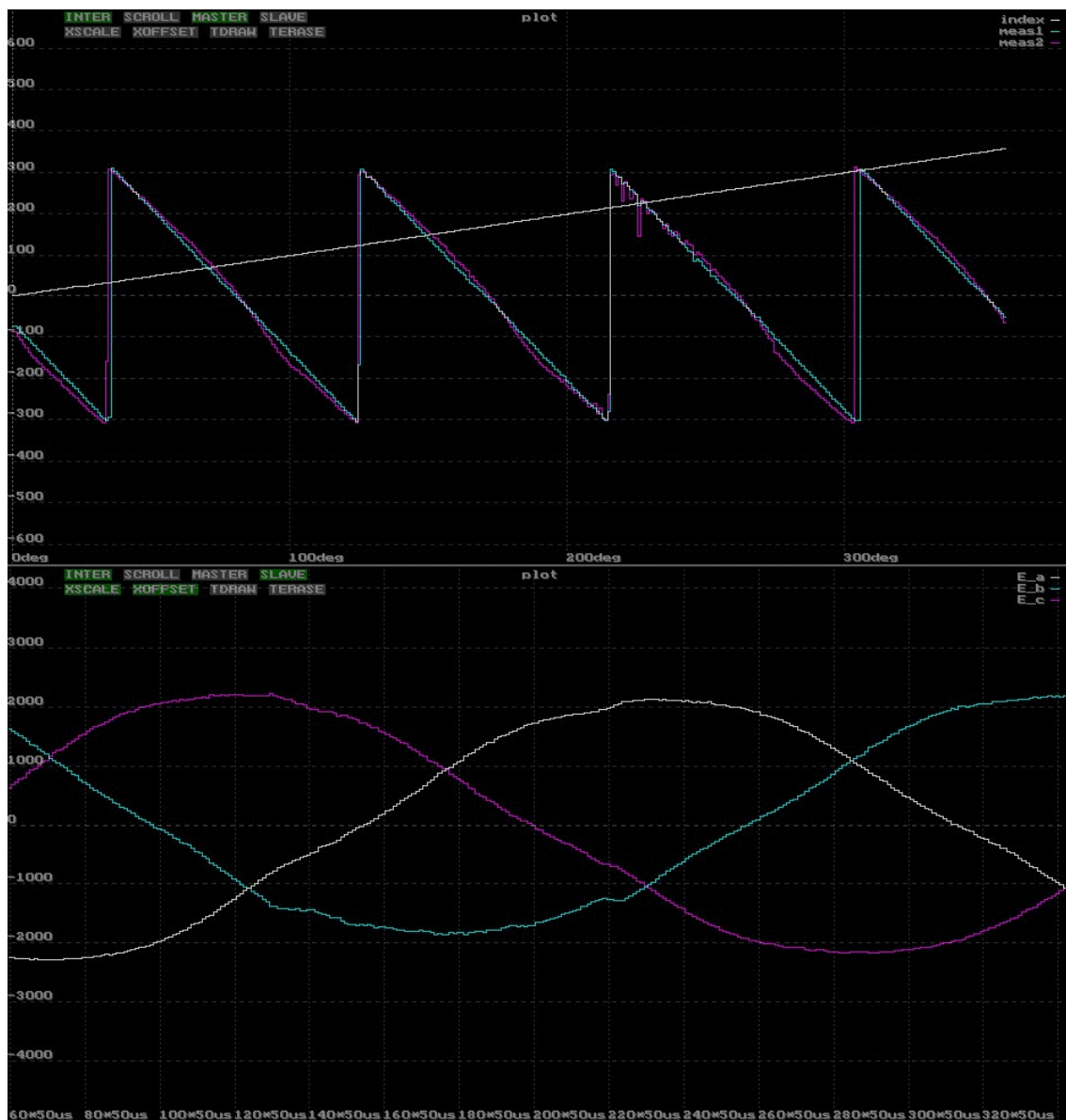
```
inverterHVPB#>identlin
running motor linear identification
DRIVER(59994): errorstate: service
IDENT(60743): PHASE A 186.339 milliOhm
IDENT(61243):   biased D 234.105 microHenry
IDENT(61993):   unbiased D 324.375 microHenry
IDENT(62743):   biased Q 356.950 microHenry
IDENT(63243):   halfbiased Q 391.590 microHenry
IDENT(64243): PHASE B 188.611 milliOhm
IDENT(64743):   biased D 225.990 microHenry
IDENT(65493):   unbiased D 324.452 microHenry
IDENT(66243):   biased Q 346.538 microHenry
IDENT(66744):   halfbiased Q 393.839 microHenry
IDENT(67744): PHASE C 188.442 milliOhm
IDENT(68244):   biased D 243.789 microHenry
IDENT(68994):   unbiased D 332.233 microHenry
IDENT(69744):   biased Q 355.550 microHenry
IDENT(70244):   halfbiased Q 399.776 microHenry
IDENT(71244): PHASE A 210.571 milliOhm
IDENT(71744):   biased D 222.532 microHenry
IDENT(72494):   unbiased D 329.232 microHenry
IDENT(73244):   biased Q 350.043 microHenry
IDENT(73744):   halfbiased Q 391.918 microHenry
IDENT(74744): PHASE B 210.508 milliOhm
IDENT(75245):   biased D 228.601 microHenry
IDENT(75995):   unbiased D 328.942 microHenry
IDENT(76745):   biased Q 349.937 microHenry
IDENT(77245):   halfbiased Q 394.427 microHenry
```


IDENT(78245): PHASE C 216.010 milliOhm
IDENT(78745): biased D 232.632 microHenry
IDENT(79495): unbiased D 335.812 microHenry
IDENT(80245): biased Q 356.758 microHenry
IDENT(80745): halfbiased Q 399.930 microHenry
zero current phase to phase:
266.774 milliOhm, D 438.899 microHenry, Q 590.686 microHenry
zero current saliency: 1.34584, biased saliency: 1.52472
suggested Rt = 133.387 milliOhm
suggested Ld = 219.450 microHenry
suggested Lq = 295.343 microHenry
DRIVER(81106): repeated pre-init
DRIVER(81109): self diag level A
DRIVER(81109): motor is steady
DRIVER(81162): self diag level B
REST(81192): configuring motor sensor mode 3: sincos
DRIVER(81287): initialized

Po identifikácii parametrov motora môžeme spustiť príkaz `identrun`, ktorý asynchrónne roztočí motor. Ak nevyhovujú prednastavené hodnoty (odvodené od nominálnych hodnôt motora), vieme ich pridať za príkaz a špecifikovať si vlastný test. Takisto vieme zväčšiť počet vzorkov merania, čím predĺžime dobu testu, avšak vieme dostať potenciálne presnejšie hodnoty. Pribeh testovacieho roztočenia vyzerá nasledovne:

```
inverterHVPB#>identrun
running motor runtime identification
DRIVER(262370): errorstate: service
IDENT(262770): spinup at 100.0 erad/s/s, 4000 ms, 12.5 A ...
IDENT(266775): identifying ...IDENT(266995): 4237 samples
suggested psi_pm:
    0.058121 [Wb, s*V/rad, Nm/A], Kv = 23.7147 [RPM/V]
suggested roff1: 2020.89
suggested roff2: 2035.83
suggested rpole: -4.0
suggested rangle: -0.726222 rad (-0.231164*PI)
DRIVER(267108): repeated pre-init
DRIVER(267110): self diag level A
DRIVER(267110): motor is rotating
REST(267110): configuring motor sensor mode 3: sincos
DRIVER(267163): initialized
DRIVER(267171): sensor ident visualisation sent to plot0
DRIVER(267178): bemf ident visualisation sent to plot1
```

Týmto vykoná menič kalibráciu použitého senzora (poradie fáz, offset senzoru) a odmeria BEMF parameter motora. Pre náš senzor je vhodné túto identifikáciu nechať prebehnúť aspoň 3x. Výsledok tohoto testovania je tiež nutné uložiť pomocou príkazu `save`. Po zbehnutí identifikácie môžeme skontrolovať, či prebehla identifikácia správne vizuálnou kontrolou v grafe, ktorý pred testom spustíme príkazom `CTRL+S`. Výsledok identifikácie je na obrázku 4.4. Na vrchnom grafe sa nachádza závislosť predpokladaného a vypočítaného elektrického uhla motora na mechanickom uhle. Na spodnom grafe je časová závislosť spätne generovaného napätia meraná na všetkých troch fázach, centrovaná okolo nuly.



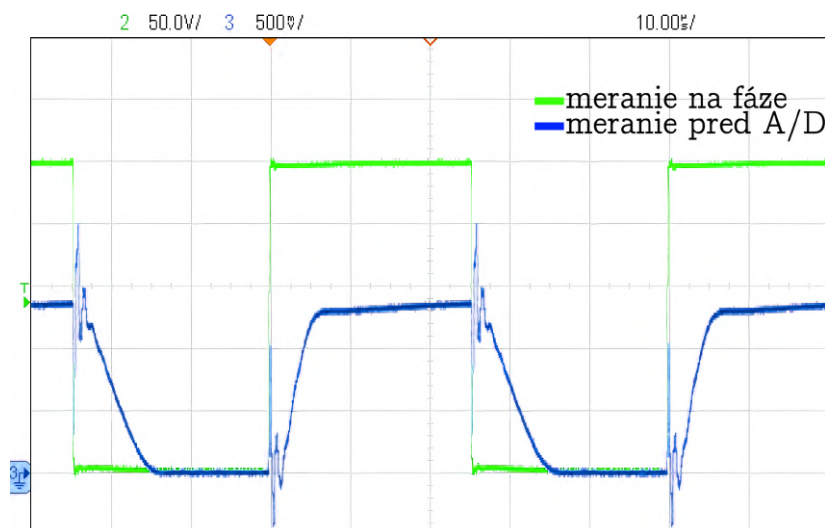
Obr. 4.4: Kalibrácia senzora a meranie BEMF príkazom identrun.

4.6 Plány na zlepšenie systému pre Dragon e4

Systém meniča ešte čaká celá sezóna plná testovania v aute Dragon e3 na trati a na letných pretekoch po Európe. Z nazbieraných dát počas sezóny bude možné určiť prípadné nedostatky a požiadavky na ďalší model, na ktoré sa môže tím zamerať v ďalšej sezóne. Napriek tomu sa dá uviesť niekoľko návrhov na potenciálne vylepšenie už teraz.

Počas testovania bol problémovým bodom izolovaný prevod napätia, kde obvod s lineárnym optočlenom nevykazuje tak lineárnu a stabilnú charakteristiku, aká sa od neho očakávala. Nenašlo sa jednoduché a dostupné riešenie tejto problematiky ani podložené výsledky alternatívnych riešení. Preto bude potrebné navrhnuť testovacie prípravky s možnými alternatívami a vykonať komparatívne meranie. Diagnostické meranie BEMF je oproti spínacej frekvencii pomalé, čiže to nebude ovplyvnené. Kompromis sa musel urobiť v rýchlosti niektorých diagnostických ochrán. Našťastie sa tento problém nijako negatívne neprejaví počas normálneho ovládania motora so záťažou (na trati). Meranie napätia na fáze a tesne pred A/D prevodníkom pomocou osciloskopu je na obrázku 4.5.

S nazbieranými skúsenosťami o funkcionalite a návrhu výkonového meniča s IGBT tranzistormi sa môže tím v budúcnosti realizovať a prerobiť výkonovú časť tak, aby používala náročnejšie SiC tranzistory – ak sa na to nájdu dostatočné financie alebo sponzori. Spolu s touto zmenou by však mali nasledovať kroky zo strany poskytovateľa softvéru, pretože na plné využitie potenciálu SiC tranzistorov by bolo vhodné zvýšiť spínaciu frekvenciu z 20 kHz na vyššiu hodnotu alebo implementovať systém variabilnej spínacej frekvencie (ktorý by mal benefity aj ak by sa ostalo pri technológii Si IGBT).



Obr. 4.5: Časová závislosť merania napätia na fázach.

Záver

Výsledkom diplomovej práce je návrh systému a jednotlivých častí meniča pre formulu na elektrický pohon. Architektúra a jednotlivé komponenty boli zvolené po podrobnom prieskume trhu a požiadaviek. Všetky časti návrhu boli prispôbené potrebám a konceptu auta Dragon e3 tímu TU Brno Racing a pravidlám medzinárodnej súťaže Formula Student pre sezónu 2023.

Použitím distribuovanej topológie bol systém funkčne rozdelený do subsystémov: HVPB (hlavná vysokonapäťová výkonová jednotka), ktorá sa vo finálnom systéme nachádza dvakrát; a SCM (komunikačná a riadiaca jednotka). K jednotkám HVPB je pripevnená kondenzátorová doska s vysokonapäťovou kabelážou.

Jednotka HVPB samostatne ovláda jeden motor pomocou spínania IGBT tranzistorov, meria všetky fázové prúdy a napätia spolu s napätím medziobvodu. Takisto spracováva údaje z motora – jeho teplotu a pozíciu v rámci otáčky.

Jednotka SCM poskytuje komunikačné rozhranie medzi jednotlivými časťami meniča a externými systémami. Tiež meria teploty interných častí meniča – vody a výmenníka, pre účely merania strát a tepla odvádzaného do chladiaceho okruhu.

Celý systém meniča je schopný nezávisle ovládať dva motory typu PMSM s analógovým sin/cos senzorom. Takisto sa podarilo dosiahnuť stanovené požiadavky na celkové zmenšenie a odľahčenie systému vďaka vhodnému výberu súčiastok a zvoleniu kompaktnej zástavby. Systém interne komunikuje pomocou zbernice CAN, so zvyškom auta komunikuje pomocou oddelenej CAN zbernice a na diagnostiku a ladenie cez počítač je implementovaná komunikácia cez Ethernet.

Menič je pripravený na použitie v pojazdnom aute Dragon e3. Splňa všetky bezpečnostné požiadavky súťaže, aby prešlo technickou - "scrutineering" - kontrolou na súťažiach. Boli vypočítané všetky potrebné hodnoty a bol vytvorený technický katalógový list kompletného systému meniča pre prijímacie formuláre súťaže.

Všetky potrebné veličiny vie menič merať a odosielať dataloggeru (teploty motorov a chladiaceho okruhu) s dostatočnou presnosťou, aby bolo možné podrobne analyzovať funkcionality a efektivitu meniča. Týmto sa môže ďalej zlepšovať do ďalších sezón. Boli overené jeho parametre a otestovaná jeho funkčnosť statickými aj dynamickými testami s pomocou motora a senzora určeného do auta Dragon e3. Tiež bola zohľadnená cenová náročnosť riešenia a boli navrhnuté ciele pre ďalší vývoj a vylepšenia do ďalších sezón.

Bibliografia

- [1] TU Brno Racing. *FORMULA STUDENT*. [Online]. [cit. 20. 12. 2022]. 2022. URL: <https://tubrnoracing.cz/en/1746-2/formula-student/>.
- [2] TU Brno Racing. *Achievements*. [Online]. [cit. 20. 12. 2022]. 2022. URL: <https://tubrnoracing.cz/en/1746-2/achievements/>.
- [3] TU Brno Racing. *Dragon e1*. [Online]. [cit. 20. 12. 2022]. 2021. URL: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon-e1/>.
- [4] TU Brno Racing. *Dragon 7*. [Online]. [cit. 20. 12. 2022]. 2017. URL: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon7/>.
- [5] Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. 1. vyd. CRC Press, 2010, s. 611. ISBN: 978-1-315-22148-9.
- [6] siliXcon s.r.o. *siliXcon / Motor control experts*. [Online]. [cit. 27. 12. 2022]. 2022. URL: <https://silixcon.com/>.
- [7] Sadegh Vaez-Zadeh. *Control of Permanent Magnet Synchronous Motors*. 1. vyd. Oxford University Press, 2018, s. 368. ISBN: 978-0-19-874296-8.
- [8] L.M. Tolbert, Fang Zheng Peng a T.G. Habetler. „Multilevel converters for large electric drives“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 35.1 (1999), s. 36–44. DOI: 10.1109/28.740843.
- [9] *Comparison of SiC MOSFET and Si IGBT*. Tech. spr. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, aug. 2020. URL: https://toshiba.semicon-storage.com/info/application_note_en_20200817_AKX00087.pdf?did=69799.
- [10] *Active Miller Clamp Technology*. Rev. 2. Aug. 2022. URL: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/an-5073.pdf>.
- [11] *A Guideline on the Usage of an Isolated Gate Driver to Efficiently Drive SiC MOSFETs*. Tech. spr. Semiconductor Components Industries, LLC (onsemi), júl 2022. URL: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and90063-d.pdf>.
- [12] *CAB011M12FM3 1200 V, 11 mΩ All-Silicon Carbide Half-Bridge Module*. Rev. 1. Jan. 2021. URL: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2021/05/CAB011M12FM3.pdf>.
- [13] *EconoPACK™2 module with TRENCHSTOP™ IGBT7 and emitter controlled 7 diode and PressFIT / NTC*. Rev. 1. Jan. 2022. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS150R12N2T7_B54-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd018083b68852300b.

- [14] Bouazza Taghia et al. „Overvoltage at motor terminals in SiC-based PWM drives“. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 158 (2019), s. 264–280. ISSN: 0378-4754.
- [15] M. A. Vogelsberger et al. „Analysis of Ultra-fast Inverter Switching Transition (dv/dt) Impact based on SiC Semi-conductors to Pre-active Insulation Monitoring of High Power“. In: *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. 2015.
- [16] Yanmin Jiang et al. „New Passive Filter Design Method for Overvoltage Suppression and Bearing Currents Mitigation in a Long Cable Based PWM Inverter-Fed Motor Drive System“. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 32.10 (2017), s. 7882–7893.
- [17] *TRENCHSTOP™ 1200 V IGBT7 T7 Application Note*. Tech. spr. Rev. 1.3. Infineon Technologies, jún 2021. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN_201814_Trenchstop_1200V_IGBT7-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46265487f7b01656b173ddc3600.
- [18] *Insulation coordination & TLI4971 isolation specification for industrial inverter*. Rev. 1.1. Mar. 2021. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Isolation_specification_TLI4971-AdditionalTechnicalInformation-v01_10-EN.pdf?fileId=5546d462712ef9b701713b5ee61f21cf.
- [19] *Understanding the Short Circuit Protection for Silicon Carbide MOSFETs*. 2020. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slua863b/slua863b.pdf?ts=1684741963007>.
- [20] Dr. Martin Schulz. *IGBT-basic know-how*. Tech. spr. Rev. 1.0. Infineon Technologies, 2019. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IGBT_basics_how_does_an_IGBT_work-%20AdditionalTechnicalInformation-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae60170675ed665777f&da=t.
- [21] *Current Transducer HAIS 50 ... 400-P, HAIS 50 ... 150-TP*. Rev. 14. 2023. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hais_50__400-p_and_50__150-tp.pdf.
- [22] *TLI4971 high precision coreless current sensor for industrial applications in 8x8mm SMD package*. Rev. 1.3. 2021. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLI4971_25_50_75_120-DataSheet-v01_30-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae6017034d731621b09.
- [23] *HCNR200 and HCNR201 High-Linearity Analog Optocouplers Applications*. Jún 2021. URL: <https://docs.broadcom.com/doc/HCNR200-HCNR201-High-Linearity-Analog-Optocouplers-DS>.

- [24] Junying Xia et al. „Study on Howland Circuits for Low Power Electrical Impedance Tomography Systems“. In: *2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*. 2018, s. 1–6.
- [25] *PCA9615 - 2-channel multipoint Fast-mode Plus differential I2C-bus buffer with hot-swap logic*. Rev. 2. Sept. 2021. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9615.pdf>.
- [26] Katelyn Wiggenhorn. *Designing High-Performance, Low-EMI Automotive Power Supplies*. Tech. spr. Texas Instruments Inc., 2017. URL: <https://www.ti.com/lit/an/snva780/snva780.pdf>.
- [27] Ole-Kristian Skroppa a Scott Monroe. *Common Mode Chokes in CAN Networks: Source of Unexpected Transients - Application Report*. Tech. spr. Infineon Technologies, jan. 2008. URL: <https://www.ti.com/lit/an/s11a271/s11a271.pdf>.
- [28] Esparza O., Leichtfried W., González F., Microchip Technology Inc. „Transitioning applications from CAN 2.0 to CAN FD“. In: *iCC 2015: CAN in Automation* (2015). URL: https://www.can-cia.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2015_esparza.pdf.
- [29] *STM32H745xI/G - Dual 32-bit Arm® Cortex®-M7 up to 480MHz and M4 MCUs, up to 2MB flash, 1MB RAM, 46 com. and analog interfaces, SMPS*. Mar. 2023. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h745zg.pdf>.
- [30] Winbond. *3V 16M-bit serialflash memory with dual/quad SPI - datasheet*. Sept. 2019. URL: <https://www.winbond.com/resource-files/w25q16jv%20spi%20revd%2008122016.pdf>.
- [31] STMicroelectronics. *M95512 512-Kbit serial SPI bus EEPROM*. Datasheet - production data. Nov. 2018. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m95512-df.pdf>.
- [32] *LAN8742A/LAN8742Ai - Small Footprint RMII 10/100 Ethernet Transceiver with HP Auto-MDIX and flexPWR® Technology*. 2015. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/DS_LAN8742_00001989A.pdf.
- [33] *RM0399 Reference manual - STM32H745/755 and STM32H747/757 advanced Arm®-based 32-bit MCUs*. Tech. spr. STMicroelectronics, feb. 2020. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0399-stm32h745755-and-stm32h747757-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.

- [34] *ADS122C04 24-Bit, 4-Channel, 2-kSPS, Delta-Sigma ADC With I2C Interface*. Okt. 2018. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads122c04.pdf>.
- [35] Antonín Krmíček. „Chladicí systém Formule Student“. [cit. 20. 12. 2022]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Kamil Šebela., 2022. URL: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137052>.
- [36] Michael Salcone a Joe Bond. „Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications“. In: *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2009, s. 1692–1699.
- [37] MengXin Zhu et al. „Experimental Investigation of Self-healing Properties of Metalized Film Capacitors“. In: *2020 4th International Conference on HVDC (HVDC)*. 2020, s. 31–36.
- [38] J.W. Kolar, T.M. Wolbank a M. SchrodL. „Analytical calculation of the RMS current stress on the DC link capacitor of voltage DC link PWM converter systems“. In: *1999. Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 468)*. 1999, s. 81–89.
- [39] *WIMA DC-LINK MKP 4 - Metallized Polypropylene (PP) - Capacitors for DC-Link Applications*. Jún 2021. URL: https://www.wima.de/wp-content/uploads/media/e_WIMA_DC_Link_MKP_4.pdf.
- [40] *REDCUBE Terminals for high current applications*. URL: https://www.w-online.com/components/media/o120138v410%5C%20BCF_REDCUBE-PRESS-FIT-Design%5C%20Guide_EN.pdf.
- [41] *CMA 0204, CMB 0207 - High Pulse Load Carbon Film MELF Resistors*. Mar. 2023. URL: <https://www.vishay.com/docs/28956/cma0204-cmb0207.pdf>.
- [42] Annika Elsen. *Carbon Film MELF – Pulse Load Champion (Application Note)*. Tech. spr. VISHAY BEYSCHLAG, 2018. URL: <https://www.vishay.com/docs/28910/melfpulseloadchampion.pdf>.
- [43] *E270 Series Vitreous Enamel Power resistor*. Apr. 2022. URL: https://www.ohmite.com/assets/docs/res_270.pdf.
- [44] *1700 V - 400 mΩ SiC Normally-on JFET*. Rev. B. Sept. 2021. URL: https://unitedsic.com/datasheets/DS_UF3N170400B7S.pdf.
- [45] *FDA217 Dual Photovoltaic MOSFET Driver*. Máj 2022. URL: [https://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/FDA217.pdf/%5C\\$file/FDA217.pdf](https://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/FDA217.pdf/%5C$file/FDA217.pdf).

- [46] *Flame-Proof Power Metal Oxide Film Resistors - ROX*. Rev. J. Okt. 2022. URL: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=1773271&DocType=DS&DocLang=English>.
- [47] Christoph Datlinger a Mario Hirz. „Benchmark of Rotor Position Sensor Technologies for Application in Automotive Electric Drive Trains“. In: *Electronics* 2020 (jún 2020).
- [48] *RM22 rotary magnetic encoder*. Issue 5. Jan. 2023. URL: https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%5C%2Fupload%5C%2FRM22D01_05.pdf.
- [49] *Calculate and minimize the dead time for IGBTs*. Tech. spr. Rev. 1.1. Infineon Technologies AG, dec. 2021. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Deadtime_calculation_for_IGBT_modules-ApplicationNotes-v01_10-EN.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011a5daefc41005b.
- [50] *IS400 - Lead Free, Mid Tg Epoxy Laminate and Prepreg*. [cit. 10.5.2023]. URL: <https://www.isola-group.com/pcb-laminates-prepreg/is400-laminate-and-prepreg-isola-group/>.
- [51] *370HR - Industry Leading Epoxy Laminate and Prepreg*. [cit. 10.5.2023]. URL: <https://www.isola-group.com/pcb-laminates-prepreg/370hr-laminate-prepreg/>.
- [52] Robert Tarzwell a Ken Bahl. *HIGH VOLTAGE PRINTED CIRCUIT DESIGN & MANUFACTURING NOTEBOOK*. Tech. spr. Rev. 1.0. SIERRA Proto Express, nov. 2004. URL: <https://www.magazines007.com/pdf/High-Voltage-PCDesign.pdf>.
- [53] Lazar Rozenblat. *CALCULATING SPACING BETWEEN PCB TRACES FOR VARIOUS VOLTAGE LEVELS - CIRCUIT BOARD LAYOUT GUIDELINES*. [cit. 10.5.2023]. 2014. URL: <https://www.smps.us/pcbtracespacing.html>.
- [54] Petr Kahle Jiří Starý. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Elektronické skriptá. 2003.
- [55] *Current Sensor TLI4971 / TLE4971 / TLE4973 - Solder and PCB recommendation and thermal management guideline*. Tech. spr. Rev. 2. Infineon Technologies, sept. 2022. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLI4971%5C_PCB%5C_AN-ApplicationNotes-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4626bfb5124016c1a2029262869.
- [56] *WIMA SMD-PET - Metallized Polyester (PET) SMD Film Capacitors with Box Encapsulation*. Apr. 2023. URL: https://www.wima.de/wp-content/uploads/media/e_WIMA_SMD_PET.pdf.

- [57] Formula Student. *Formula Student Rules 2023, Version: 1.1*. [Online]. 2022.
URL: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf.

Zoznam symbolov a skratiek

AC	Alternating current - striedavý prúd
A/D	Analóg - Digitál
AIR	Accumulator isolation relay - izolačné relé akumulátora
BEMF	Back electromotive force - spätné elektromotorické napätie
BSPD	Brake system plausibility device - zariadenie plauzibility brzdového systému
CAD	Computer-aided design
CAN	Controller area network
CMC	Common mode choke - tlmivka so spoločným režimom indukčnosti
D/A	Digitál - Analóg
dI2C	Differential inter-integrated circuit
DPS	Doska plošných spojov (angl. PCB - printed circuit board)
DSP	Digital signal processor - digitálny signálový procesor
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EMI	Electromagnetic interference - elektromagnetické rušenie
ENIG	Electroless nickel immersion gold
ESD	Electrostatic discharge - elektrostatický výboj
ESR	Equivalent series resistance - ekvivalentný sériový odpor
ESL	Equivalent series inductance - ekvivalentná sériová indukčnosť
FPGA	Field programmable gate array
FS	Formula Student
HAL	Hot air levelling
HVD	High voltage disconnect - vysokonapäťový prerušovač
HVPB	High voltage power board - vysokonapäťová výkonová doska

IGBT	Insulated gate bipolar transistor - bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
IMD	Insulation monitoring device
I2C	Inter-integrated circuit
I/O	Input / Output - vstupno-výstupný
LVMS	Low voltage master switch - nízkonapäťový systém
LVS	Low voltage system - hlavný vypínač nízkonapäťového systému
MCO	Microcontroller clock output
MCU	Microcontroller unit - mikrokontrolér
MII	Media-independent interface
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor
NTC	Negative temperature coefficient - záporný teplotný koeficient
OEM	Original equipment manufacturer
PGA	Programmable gain amplifier - zosilňovač s programovateľným ziskom
PMSM	Permanent magnet synchronous motor
PTC	Positive temperature coefficient - kladný teplotný koeficient
PWM	Pulse width modulation - impulzová šírková modulácia
RMII	Reduced media-independent interface
RMS	Root mean square - efektívna hodnota
SCM	System communication module - komunikačný modul
SDC	Shutdown circuit - vypínací obvod
Si	Silicon - kremík
SiC	Silicon carbide - karbid kremičitý
SMT	Surface mount technology - technológia povrchovej montáže
TCS	Traction control system - systém kontroly trakcie

TS	Trakčný systém
TSMP	Tractive system measuring point
TSAC	Tractive system accumulator container - trakčná batéria
TSAL	Tractive system active light - kontrolka aktívneho trakčného systému

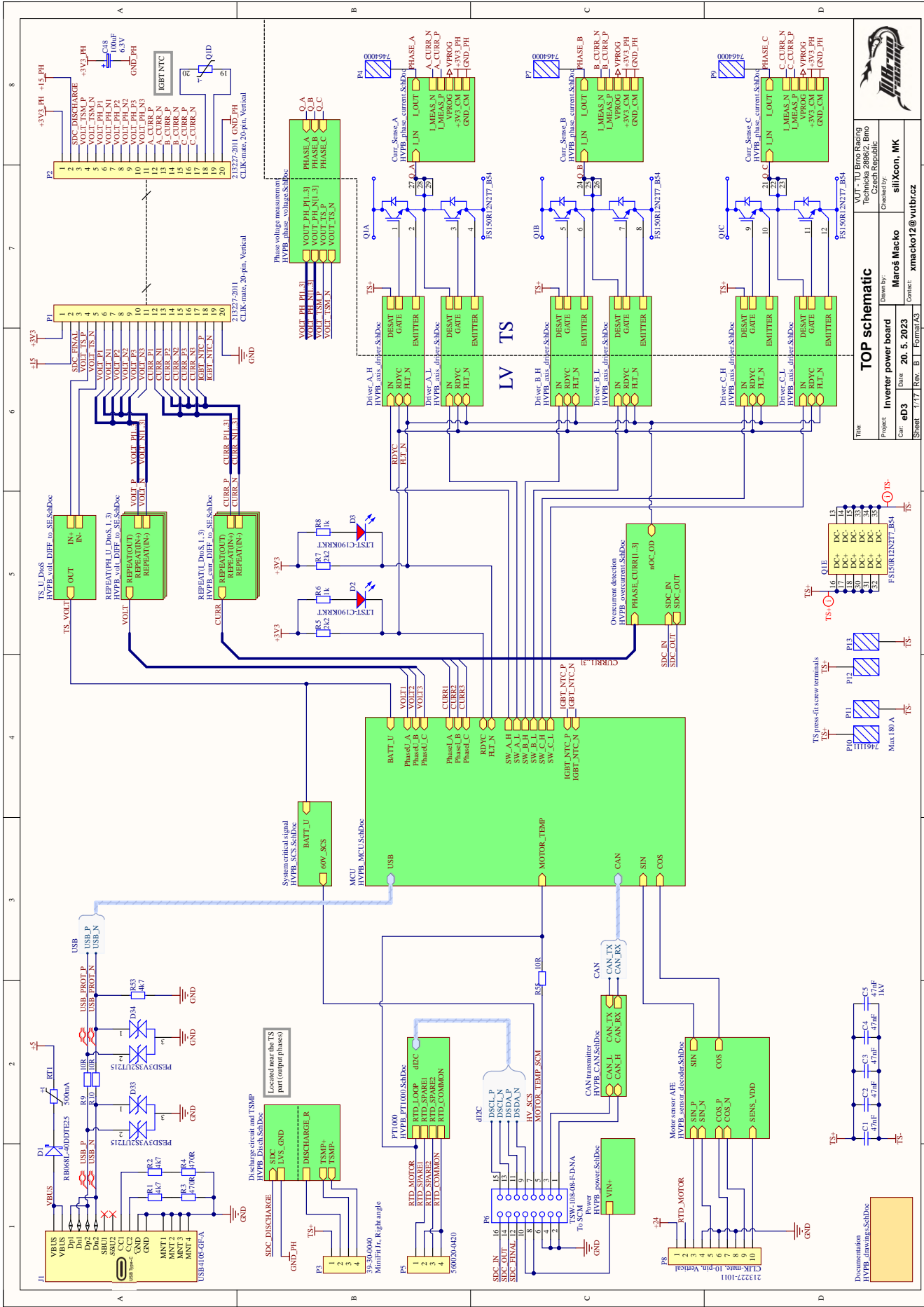
Zoznam veličín

C	[F]	Elektrická kapacita
c	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Hmotnostná tepelná kapacita
E	[J]	Energia
E_{Off}	[mJ]	Energia stratená pri zatvorení tranzistora
E_{On}	[mJ]	Energia stratená pri otvorení tranzistora
f_{sw}	[kHz]	Spínacia frekvencia
h	[mm]	Výška
I_{nom}	[A]	Nominálna hodnota elektrického prúdu
I_{peak}	[A]	Špičková hodnota elektrického prúdu
k_e	[V _{rms} /rpm]	Elektrická konštanta motoru
l	[mm]	Dĺžka
L_{Ph}	[μH]	Indukčnosť jednej fázy motora
m	[kg]	Hmotnosť
n_{max}	[rpm]	Maximálna hodnota otáčok
n_{nom}	[rpm]	Nominálna hodnota otáčok
P	[W]	Výkon
P_{avg}	[W]	Priemerný výkon
P_{nom}	[kW]	Nominálna hodnota výkonu
P_{peak}	[kW]	Špičková hodnota výkonu
R_{DSon}	[mΩ]	Odpor kanálu drain-source
T	[°C] / [K]	Teplota
T_{nom}	[N m]	Nominálna hodnota krútiaceho momentu
$t_{\text{d_off_max}}$	[ns]	Maximálne oneskorenie vypínania tranzistora
$t_{\text{d_on_min}}$	[ns]	Minimálne oneskorenie zapínania tranzistora
$t_{\text{pdd_max}}$	[ns]	Maximálne propagačné oneskorenie budiča
$t_{\text{pdd_min}}$	[ns]	Minimálne propagačné oneskorenie budiča
T_{peak}	[N m]	Špičková hodnota krútiaceho momentu
U	[V]	Elektrické napätie
U_{bat}	[V]	Elektrické napätie batérie
V	[L]	Objem
\dot{V}	[L/s]	Prietok
V_{CE}	[V]	Napätie kolektor-emitor
V_{CEsat}	[V]	Saturačné napätie kolektor-emitor
V_{peak}	[V]	Špičkové napätie
V_{rms}	[V]	Efektívne napätie
w	[mm]	Šírka

Zoznam príloh

A Schéma systému HVPB	77
B Schéma systému SCM	94
C Verejný katalógový list meniča	104
D Predvýrobný náhľad dosky HVPB	109
E Preklad relevantných pravidiel	114

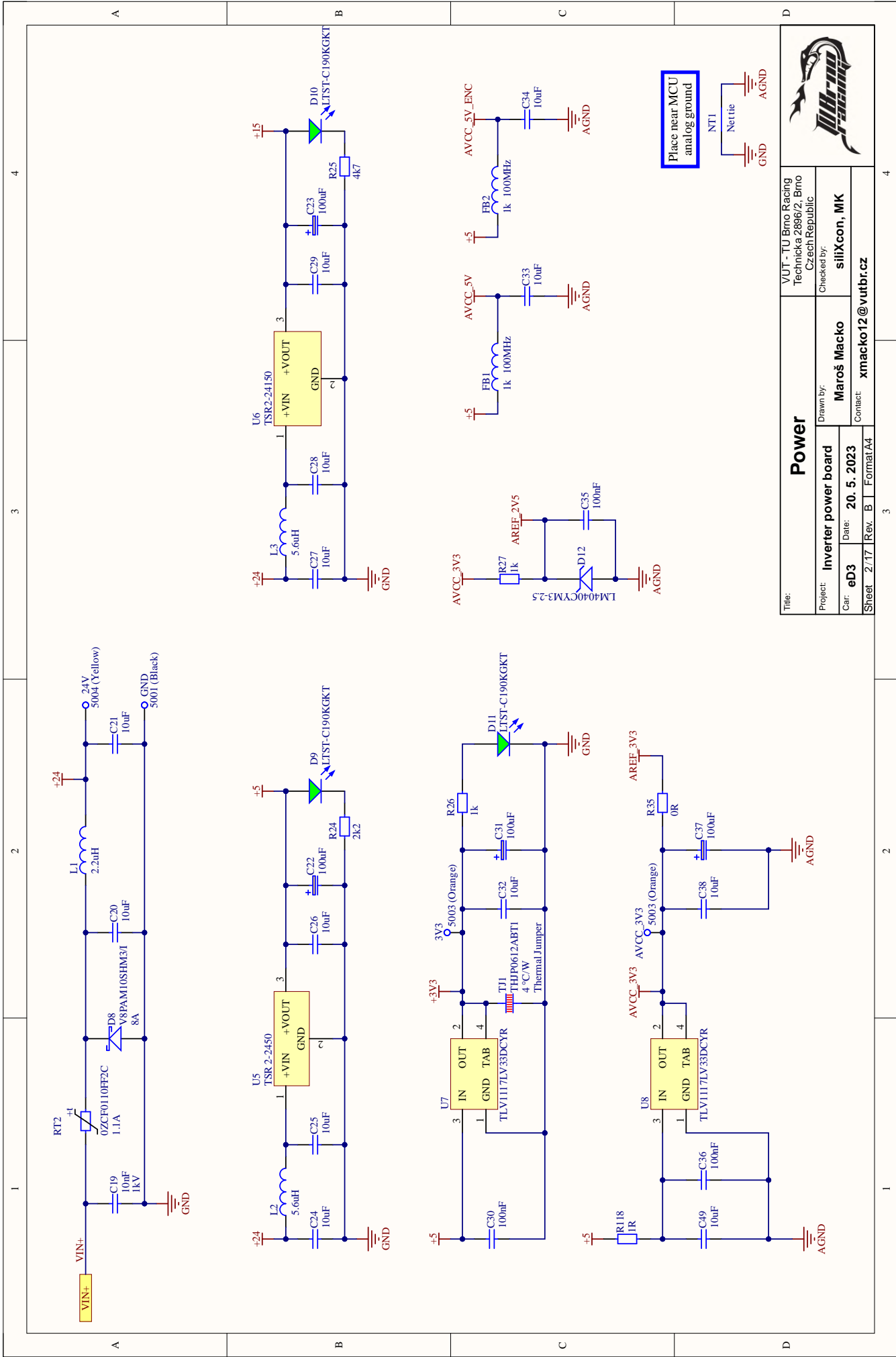
A Schéma systému HVPB



Time: **TOP schematic**
 Project: **inverter power board**
 Drawn by: **Maroš Macko**
 Date: **20. 5. 2023**
 Contact: **xmacko12@vutbr.cz**
 Sheet: 1/17 Rev. B - FormA3

VUT - TU Brno Racing
 Technická 2886/2, Brno
 Czech Republic
 silXcon, MK

Documentation
 HVFB_drawingSchematic



Power

VUT - TU Brno Racing
Technická 2896/2, Brno
Czech Republic

Checked by: **Maroš Macko**

Project: **Inverter power board**

Drawn by: **Maroš Macko**

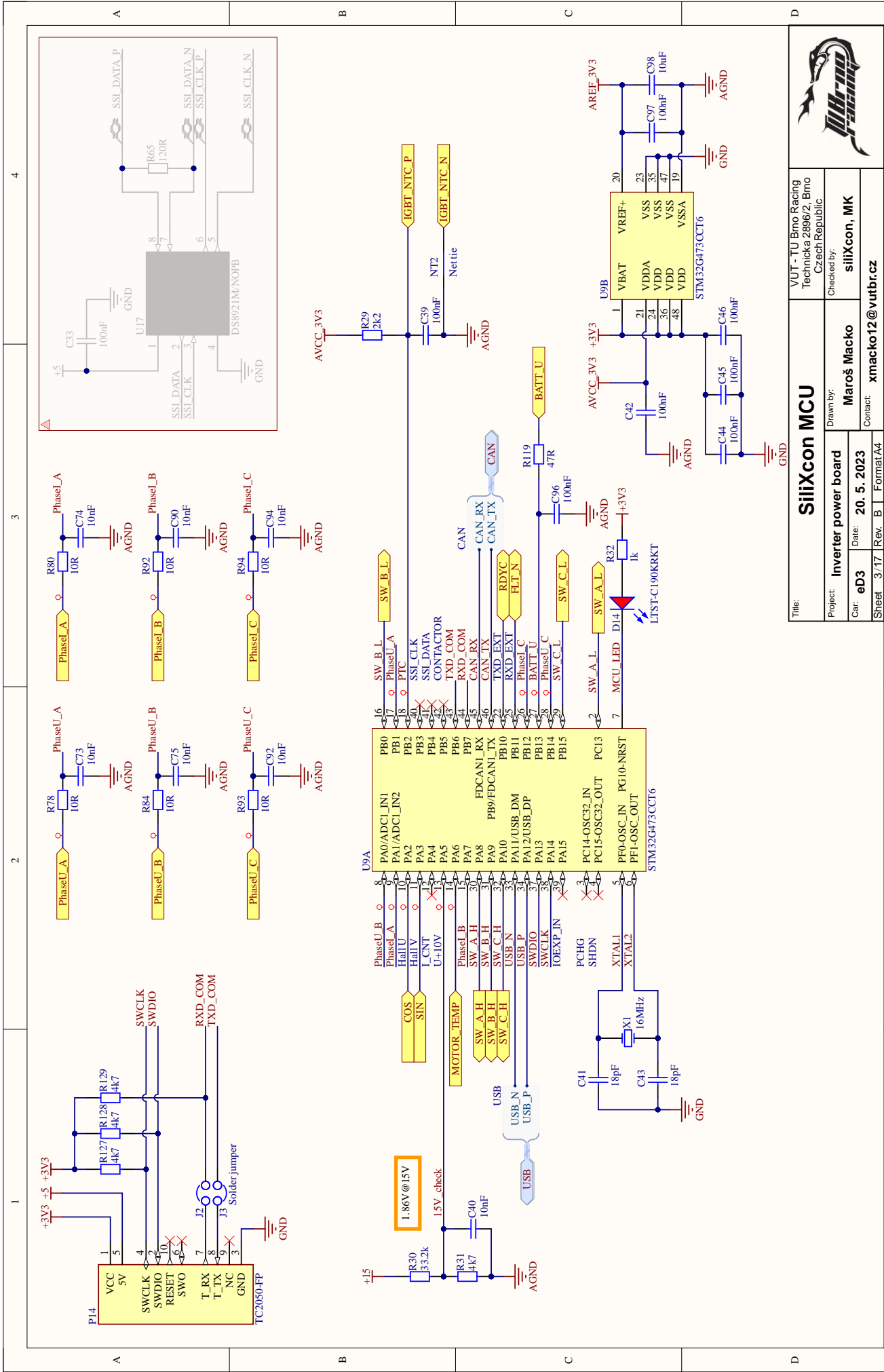
Ca: **eD3** Date: **20. 5. 2023**

Sheet: **2/17** Rev: **B** Format: **A4**

Contact: **xmacko12@vutbr.cz**

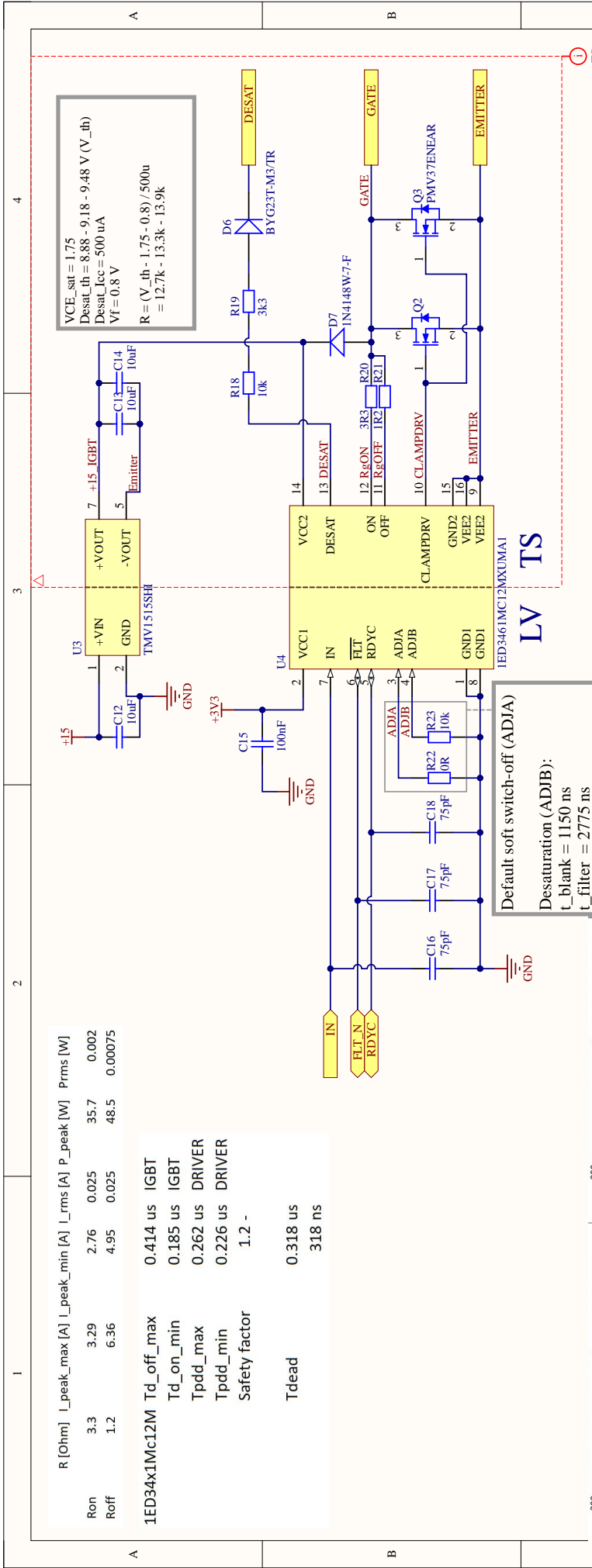
Place near MCU analog ground

NT1
Net tie
GND
AGND



Title: SiilXcon MCU	
Project: Inverter power board	
Car: eD3	
Date: 20. 5. 2023	
Sheet: 3/17	
Rev: B	
Format: A4	
Author: Maroš Macko	
Checked by: siilXcon, MIK	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	

VUT - TU Brno Racing
 Technická 2896/2, Brno
 Czech Republic



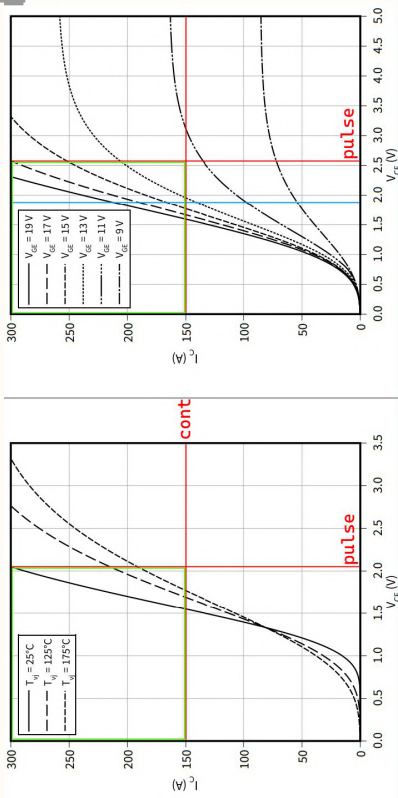
R [Ohm]	I_peak_max [A]	I_peak_min [A]	I_rms [A]	P_peak [W]	P_rms [W]
Ron	3.3	3.29	2.76	0.025	35.7
Roff	1.2	6.36	4.95	0.025	48.5

1ED3461MC12M Td_off_max 0.414 us IGBT
 Td_on_min 0.185 us IGBT
 Tpdd_max 0.262 us DRIVER
 Tpdd_min 0.226 us DRIVER
 Safety factor 1.2 -

Tdead 0.318 us
 318 ns

$V_{CE_sat} = 1.75$
 $Desat_th = 8.88 - 9.18 - 9.48 \text{ V (V_th)}$
 $Desat_I_{cc} = 500 \text{ uA}$
 $V_f = 0.8 \text{ V}$
 $R = (V_th - 1.75 - 0.8) / 500\text{u}$
 $= 12.7k - 13.3k - 13.9k$

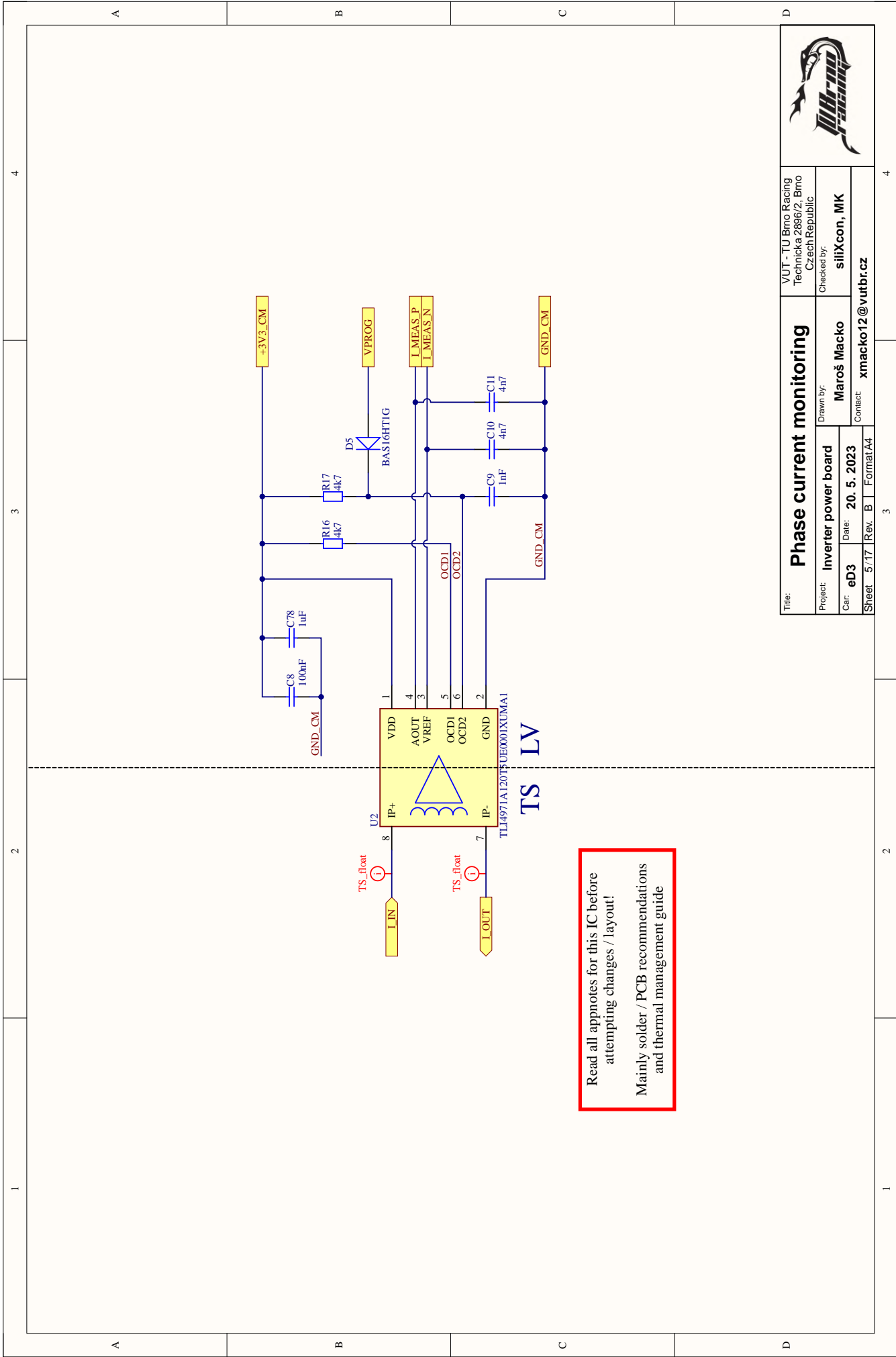
Default soft switch-off (ADJA)
 Desaturation (ADIB):
 $t_{blank} = 1150 \text{ ns}$
 $t_{filter} = 2775 \text{ ns}$




Overcurrent desaturation calculations: The threshold voltage must be inside 2nd quadrant defined by continuous current, and minimum VCE saturation voltage for maximum pulse (300A in our case). Then, we determine realistic minimum VGE (14V) and it's maximum VCE voltage (1.75) and check it with the temperature deviation graph (left one). It is pretty close with a cold transistor, but passes...

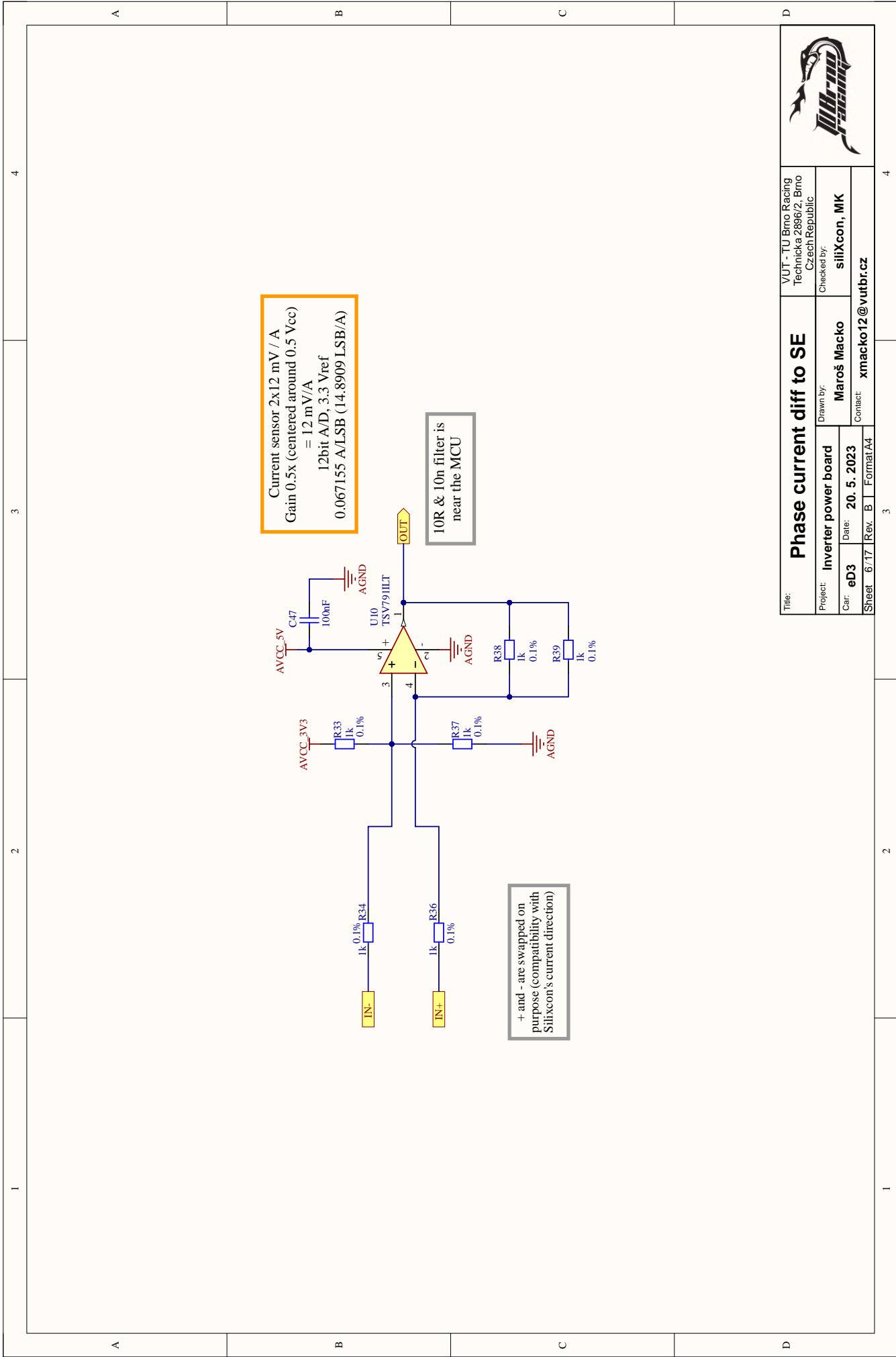
Axis driver
 Inverter power board
 Drawn by: Maroš Macko
 Date: 20. 5. 2023
 Contact: xmacko12@vutbr.cz
 Project: VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic
 Checked by: sliixcon, MIK
 Sheet: 4/17 Rev. B Format A4





Read all appnotes for this IC before attempting changes / layout!
Mainly solder / PCB recommendations and thermal management guide


	
Title: Phase current monitoring	
VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter power board	
Drawn by: Maroš Macko	
Checked by: silixcon, MK	
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023
Sheet: 5/17	Rev. B Format/A4
Contact: xmacko12@vutbr.cz	

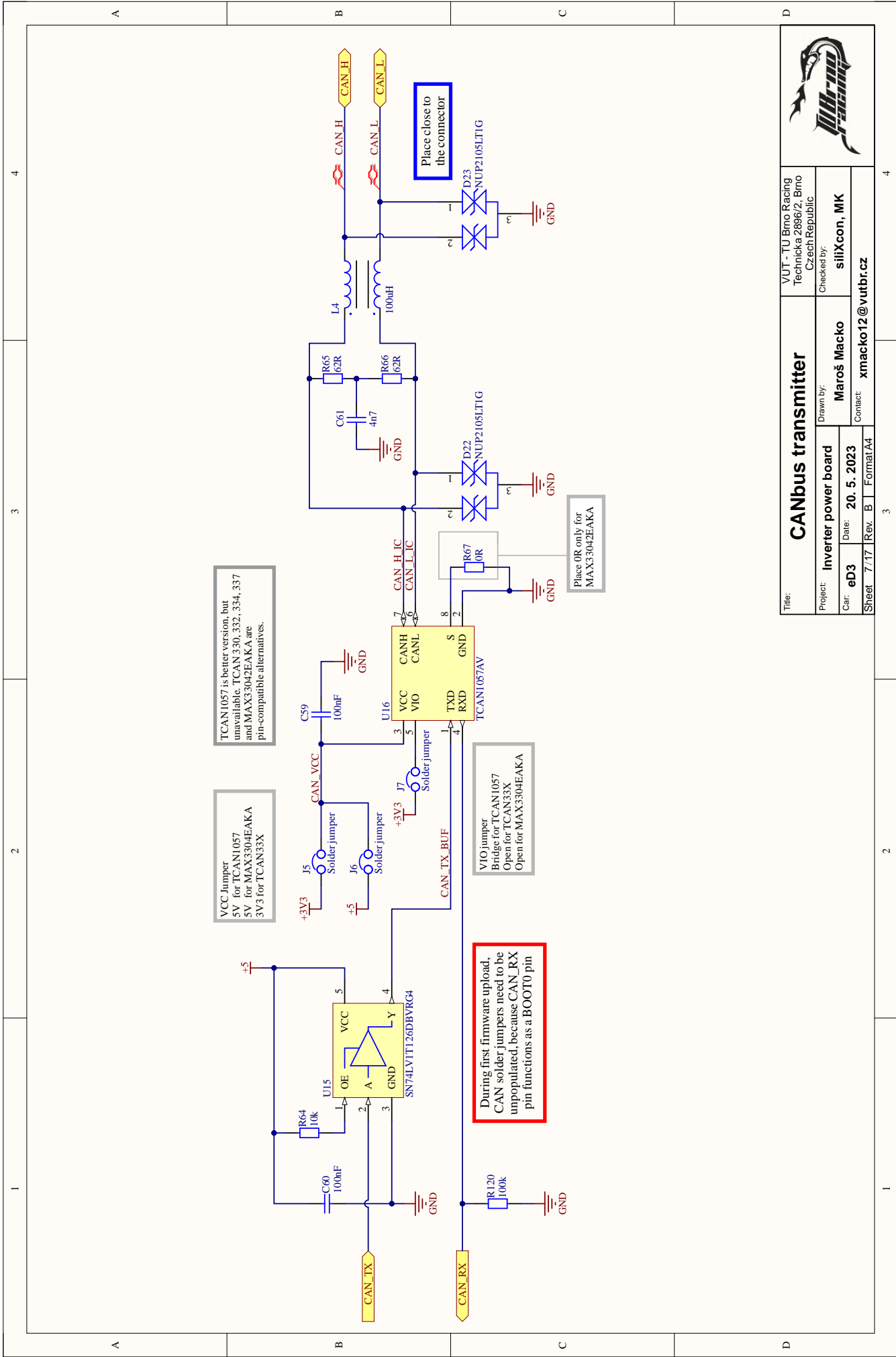



Current sensor $2 \times 12 \text{ mV/A}$
 Gain $0.5 \times$ (centered around 0.5 Vcc)
 $= 12 \text{ mV/A}$
 12bit A/D, 3.3 Vref
 0.067155 A/LSB (14.8909 LSB/A)

10R & 10n filter is
 near the MCU

+ and - are swapped on
 purpose (compatibility with
 Slixcon's current direction)

	
Title: Phase current diff to SE	
Project: Inverter power board	Drawn by: Maroš Macko
Carr: eD3	Date: 20. 5. 2023
Sheet 6/17	Rev. B Format A4
Checked by: slixcon, MK	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	



	
CANbus transmitter	
VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project:	Inverter power board
Checked by:	Maroš Macko
Car:	eD3
Date:	20. 5. 2023
Sheet:	7/17
Rev:	B
Format:	A4
Contact:	xmacko12@vutbr.cz

4

3

2

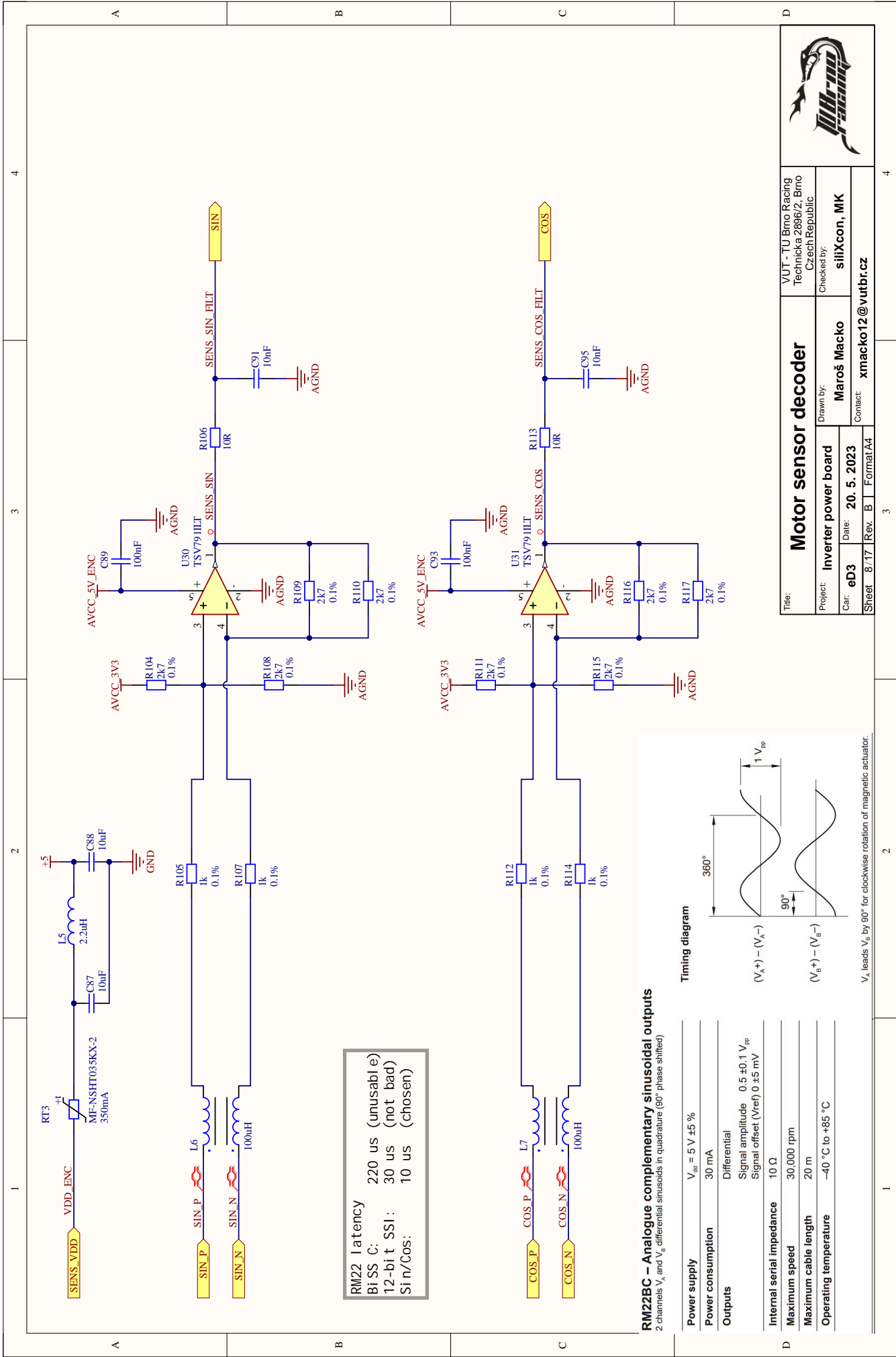
1

4

3

2

1



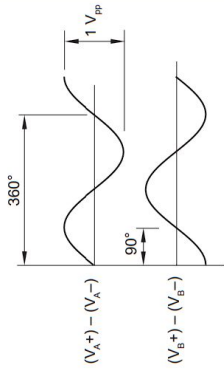
RM22 latency 220 us (unusable)
 BISS C: 30 us (not bad)
 Sin/Cos: 10 us (chosen)

RM22BC – Analogue complementary sinusoidal outputs


2 channels V_A and V_B differential sinusoids in quadrature (90° phase shifted)

Power supply	$V_{dd} = 5\text{ V} \pm 5\%$
Power consumption	30 mA
Outputs	Differential
	Signal amplitude $0.5 \pm 0.1\text{ V}_{pp}$
	Signal offset (Vref) $0 \pm 5\text{ mV}$
Internal serial impedance	10 Ω
Maximum speed	30,000 rpm
Maximum cable length	20 m
Operating temperature	$-40\text{ }^\circ\text{C}$ to $+85\text{ }^\circ\text{C}$

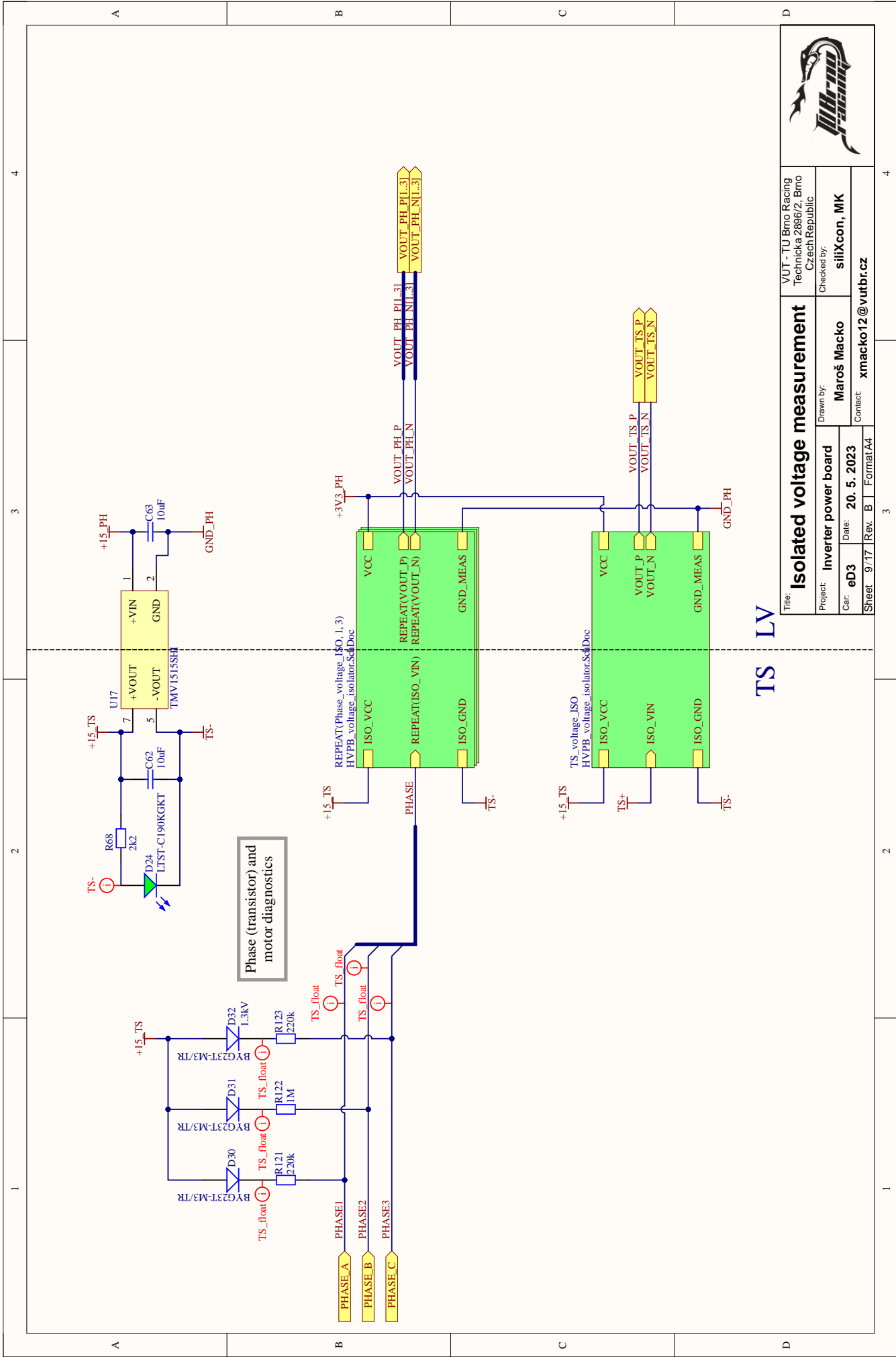
Timing diagram



V_A leads V_B by 90° for clockwise rotation of magnetic actuator.



Motor sensor decoder	
Project: Inverter power board	
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023
Sheet: 8/17	Rev: B Format: A4
Drawn by: Maroš Macko	
Checked by: sliXcon, MIK	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	
VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	



TS LV



Title: Isolated voltage measurement		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter power board		Checked by: silixcon, MIK	
Drawn by: Maroš Macko		Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Carr: eD3	Date: 20. 5. 2023		
Sheet: 9/17	Rev: B	Format: A4	

LED bandwidth = 9 MHz
 K3 (gain difference) = +-5% nom (+- 7% at temperature limits)
 K = Ipd/If = 0.36 - 0.72 % (0.48 % typical)

replace w/
 CHV2010-FX-1004ELF

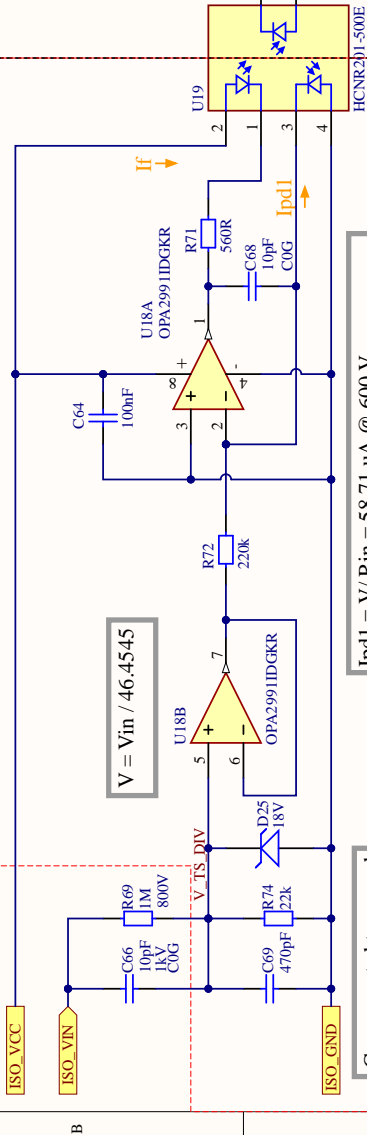
V = Vin / 46.4545

Compensated to around
 -1 dB after f0

Ipd1 = V / Rin = 58.71 uA @ 600 V
 If = Ipd1 / <0.36% .. 0.72%> = 8.1 .. 16.3 mA
 (20 mA safe average input current) @ 600 V

TS LV

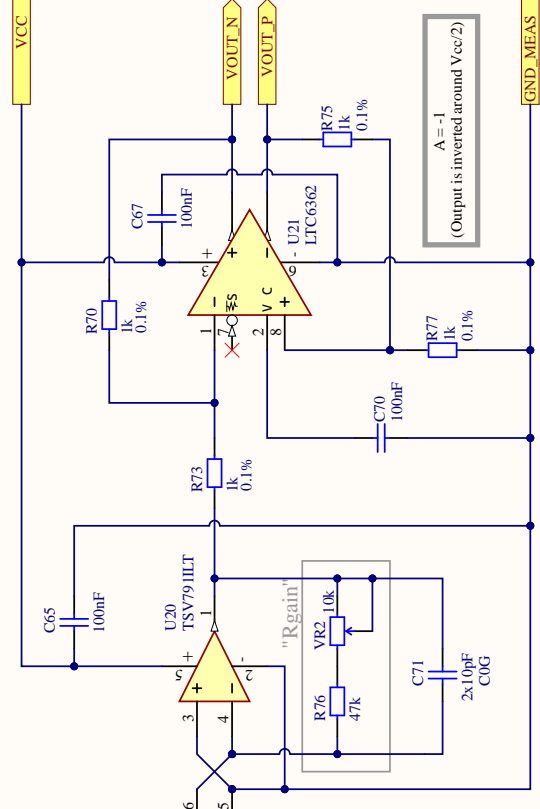
TS-



Vout = Ipd * Rgain

Vout = Vin / 200

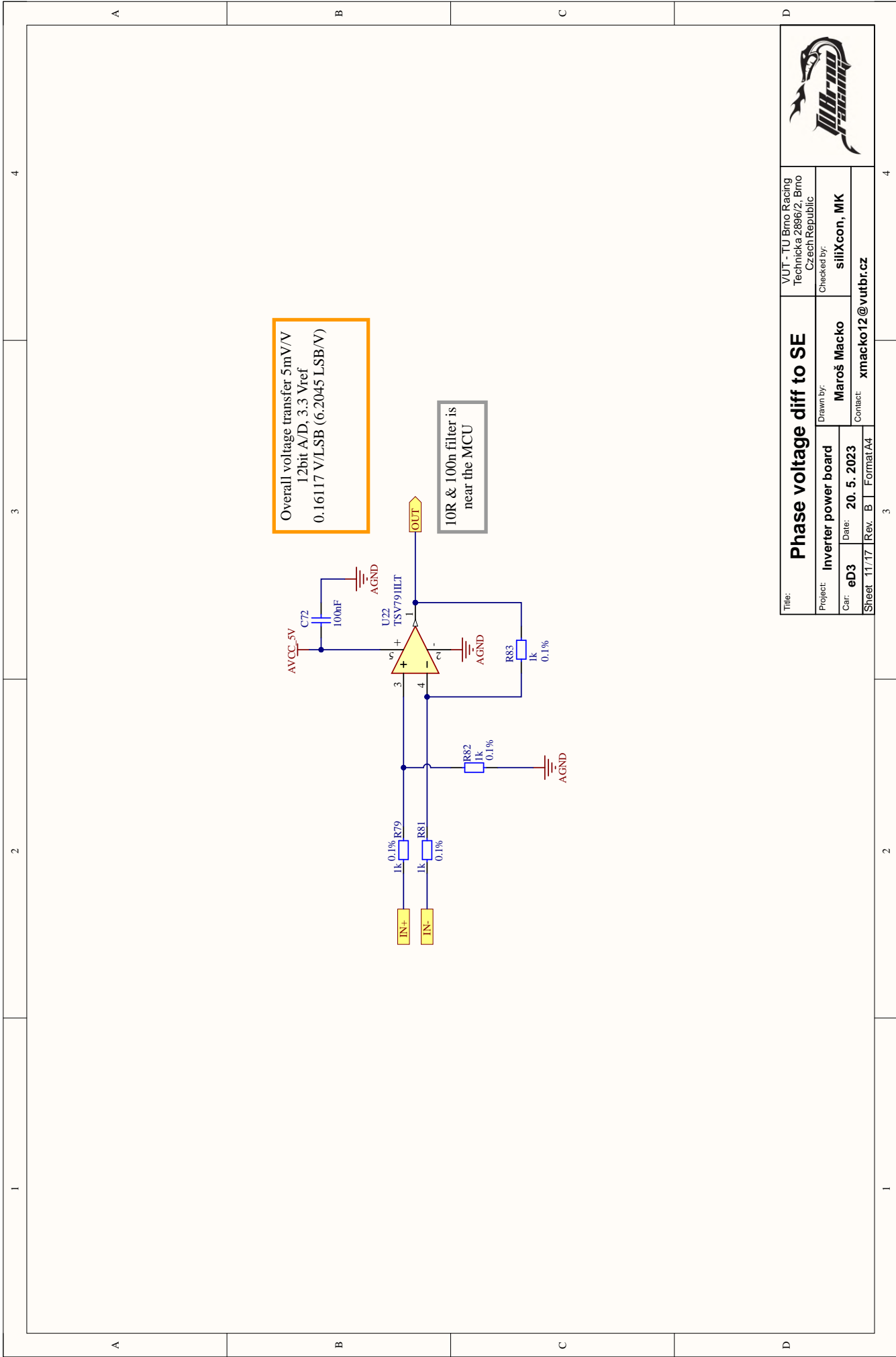
Initial VR value: 4 kOhm
 Then trim to gain of 1/200



A = -1
 (Output is inverted around Vcc/2)

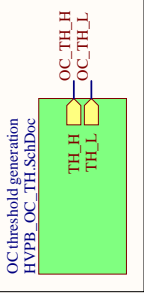
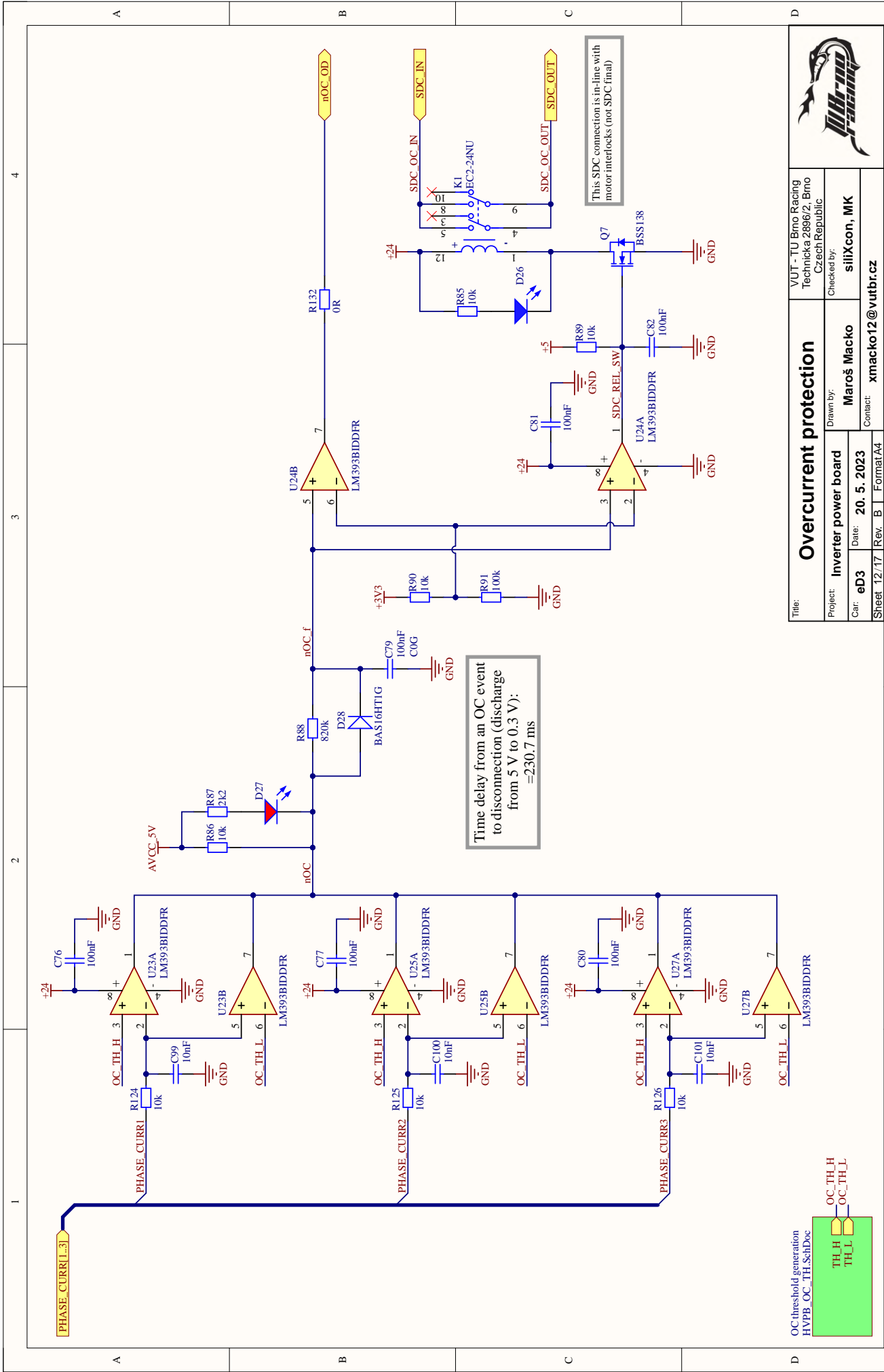
Title: Voltage isolator		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter power board		Checked by: silixcon, MIK	
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023	Drawn by: Maroš Macko	Contact: xmacko12@vutbr.cz
Sheet: 10/17	Rev: B	Format: A4	



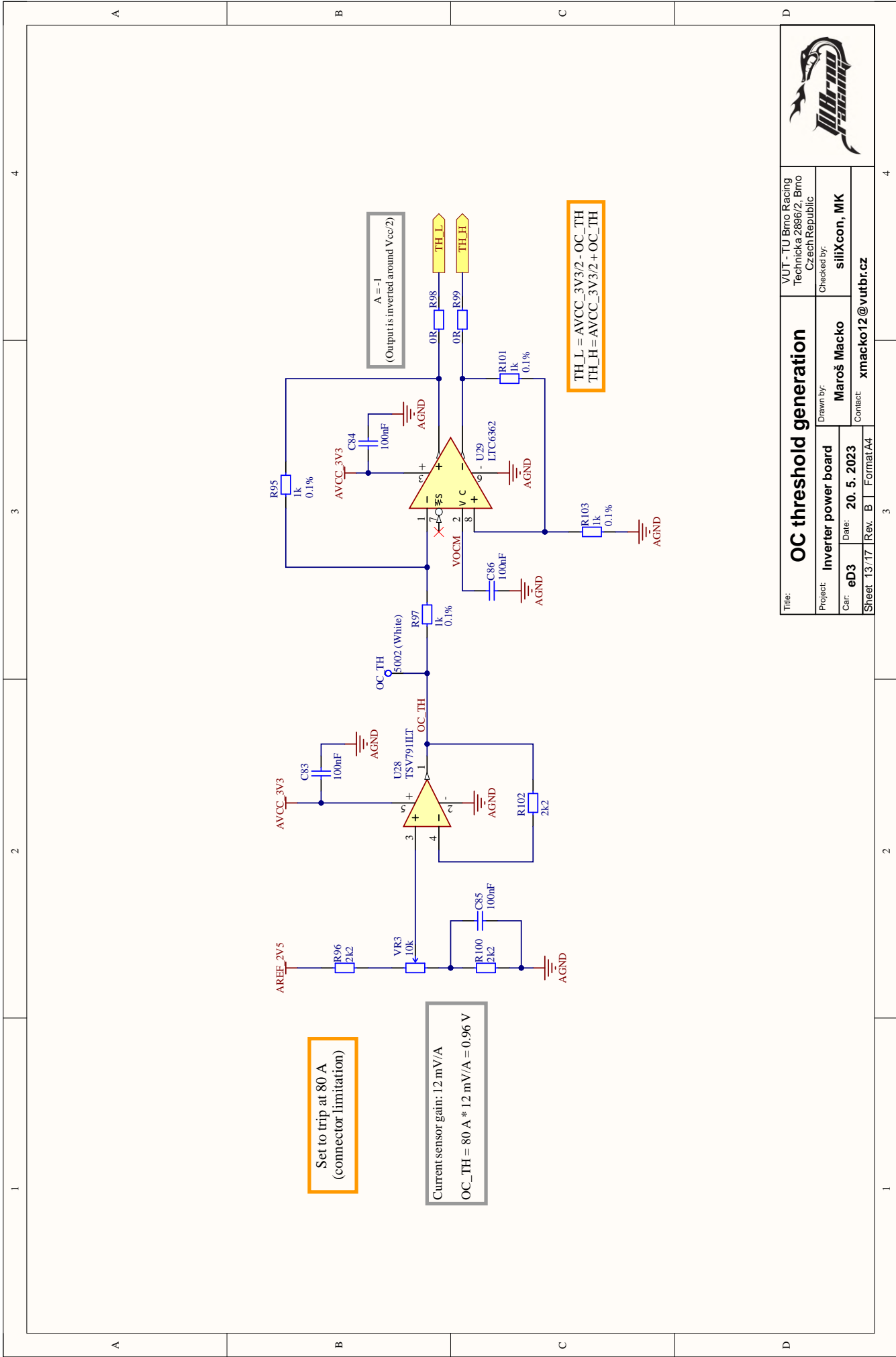


Title: Phase voltage diff to SE		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter power board		Checked by: silixcon, MK	
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023	Drawn by: Maroš Macko	
Sheet: 11/17	Rev. B	Contact: xmacko12@vutbr.cz	





Overcurrent protection	
Title: VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter power board	
Checked by: sliXcon, MIK	
Drawn by: Maroš Macko	
Date: 20. 5. 2023	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Car: eD3	Sheet 12/17
Rev. B	Format A4



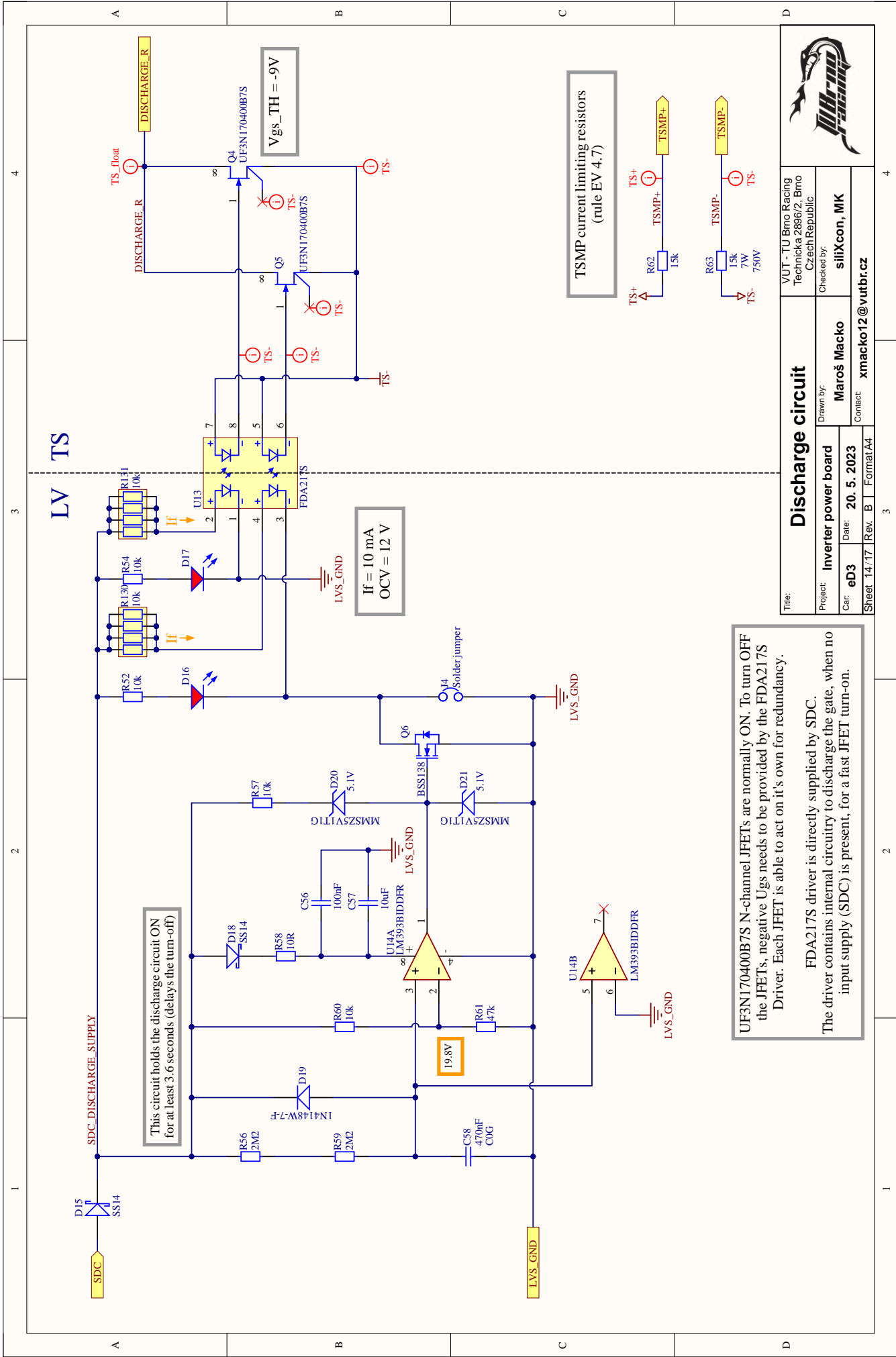
Set to trip at 80 A
(connector limitation)

Current sensor gain: 12 mV/A
 $OC_TH = 80\text{ A} * 12\text{ mV/A} = 0,96\text{ V}$

A = -1
(Output is inverted around Vcc/2)

$TH_L = AVCC_3V3/2 - OC_TH$
 $TH_H = AVCC_3V3/2 + OC_TH$

Title: OC threshold generation Project: Inverter power board Car: eD3 Sheet: 13/17		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic Checked by: sliXcon, MIK Drawn by: Maroš Macko Date: 20. 5. 2023 Rev. B Format/A4 Contact: xmacko12@vutbr.cz	
---	--	--	--



LV TS

This circuit holds the discharge circuit ON for at least 3.6 seconds (delays the turn-off)

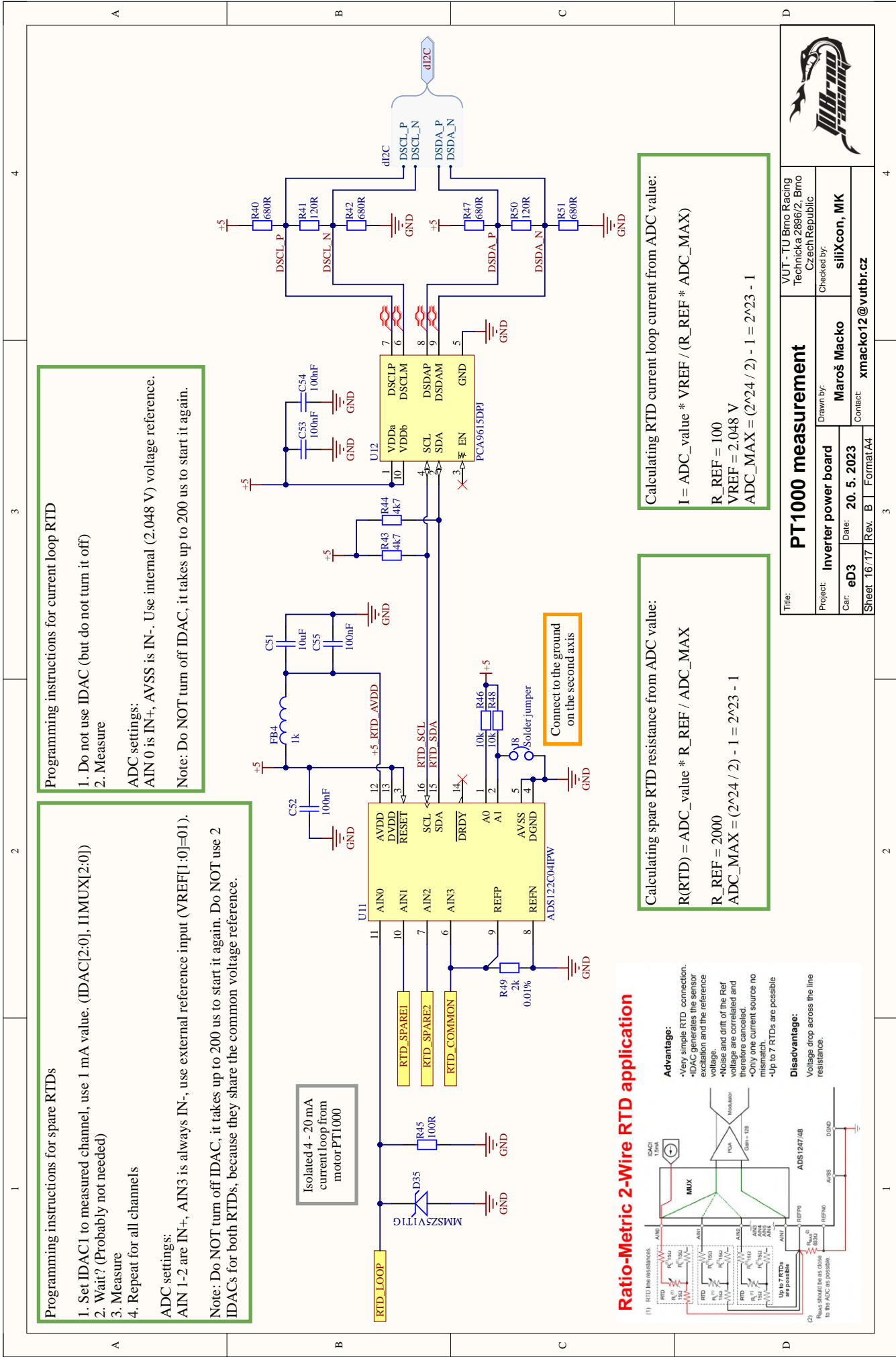
If = 10 mA
OCV = 12 V

TSMP current limiting resistors
(rule EV 4.7)

UF3N170400B7/S N-channel JFETs are normally ON. To turn OFF the JFETs, negative Ugs needs to be provided by the FDA217S Driver. Each JFET is able to act on it's own for redundancy.
FDA217S driver is directly supplied by SDC.
The driver contains internal circuitry to discharge the gate, when no input supply (SDC) is present, for a fast JFET turn-on.

Title: Discharge circuit	
Project: VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Drawn by: Maroš Macko	Checked by: siHXcon, MIK
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023
Sheet: 14/17	Rev: B Format: A4
Contact: xmacko12@vutbr.cz	





Programming instructions for spare RTDs

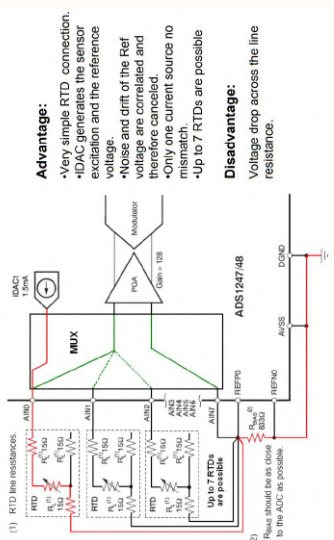
1. Set IDAC1 to measured channel, use 1 mA value. (IDAC[2:0], IIMUX[2:0])
2. Wait? (Probably not needed)
3. Measure
4. Repeat for all channels

ADC settings:
 AIN 1-2 are IN+, AIN3 is always IN-, use external reference input (VREF[1:0]=01).
 Note: Do NOT turn off IDAC, it takes up to 200 us to start it again. Do NOT use 2 IDACs for both RTDs, because they share the common voltage reference.

Programming instructions for current loop RTD

1. Do not use IDAC (but do not turn it off)
 2. Measure
- ADC settings:
 AIN 0 is IN+, AVSS is IN-. Use internal (2.048 V) voltage reference.
 Note: Do NOT turn off IDAC, it takes up to 200 us to start it again.

Ratio-Metric 2-Wire RTD application



Calculating spare RTD resistance from ADC value:
 $R(RTD) = ADC_value * R_REF / ADC_MAX$
 $R_REF = 2000$
 $ADC_MAX = (2^{24} / 2) - 1 = 2^{23} - 1$

Calculating RTD current loop current from ADC value:
 $I = ADC_value * VREF / (R_REF * ADC_MAX)$
 $R_REF = 100$
 $VREF = 2.048 V$
 $ADC_MAX = (2^{24} / 2) - 1 = 2^{23} - 1$

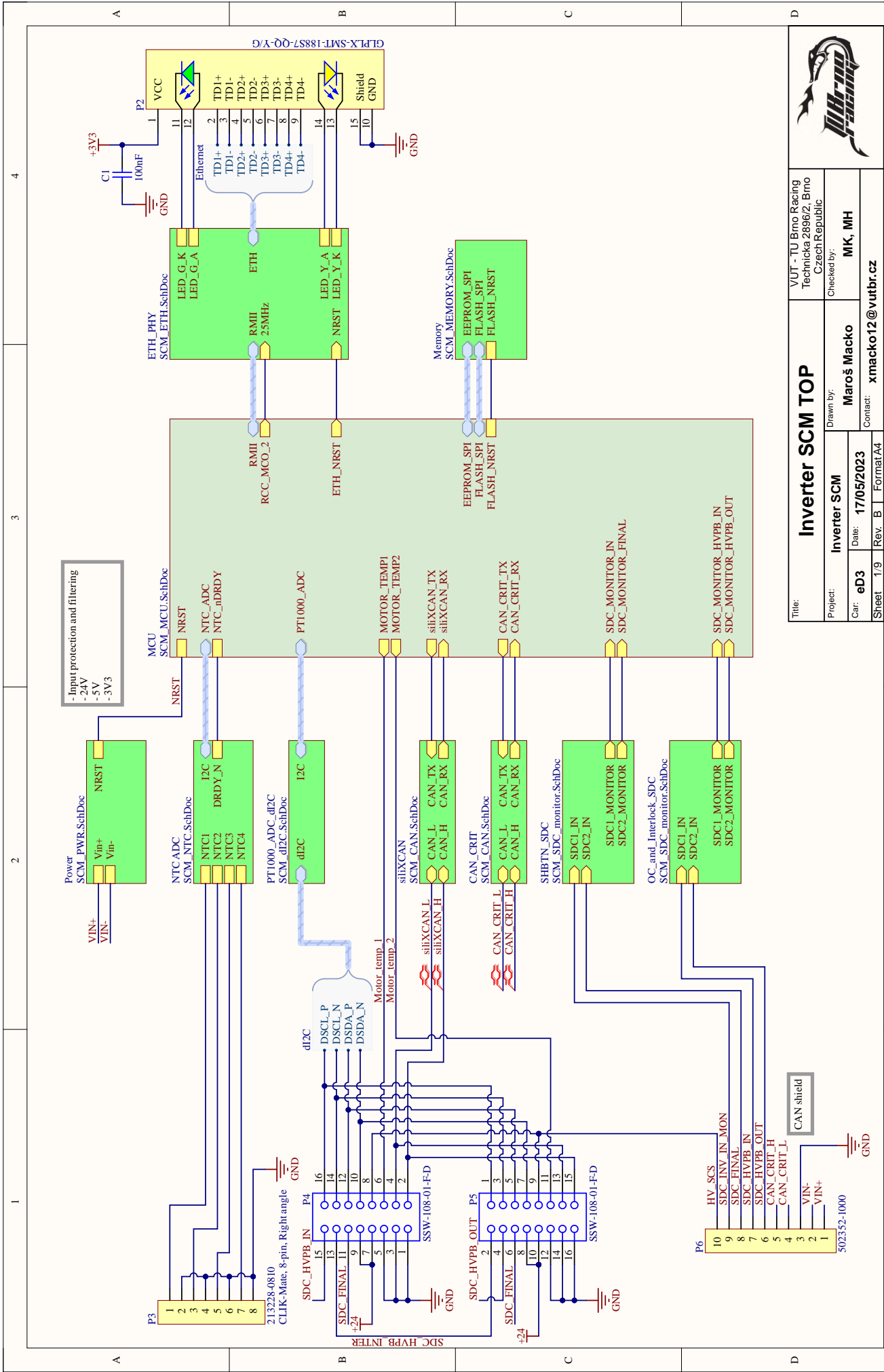
Title: PT1000 measurement	
Project: Inverter power board	Drawn by: Maroš Macko
Car: eD3	Date: 20. 5. 2023
Sheet: 16/17	Rev: B Format: A4
Checked by: silixcon, MIK	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	

Advantage:

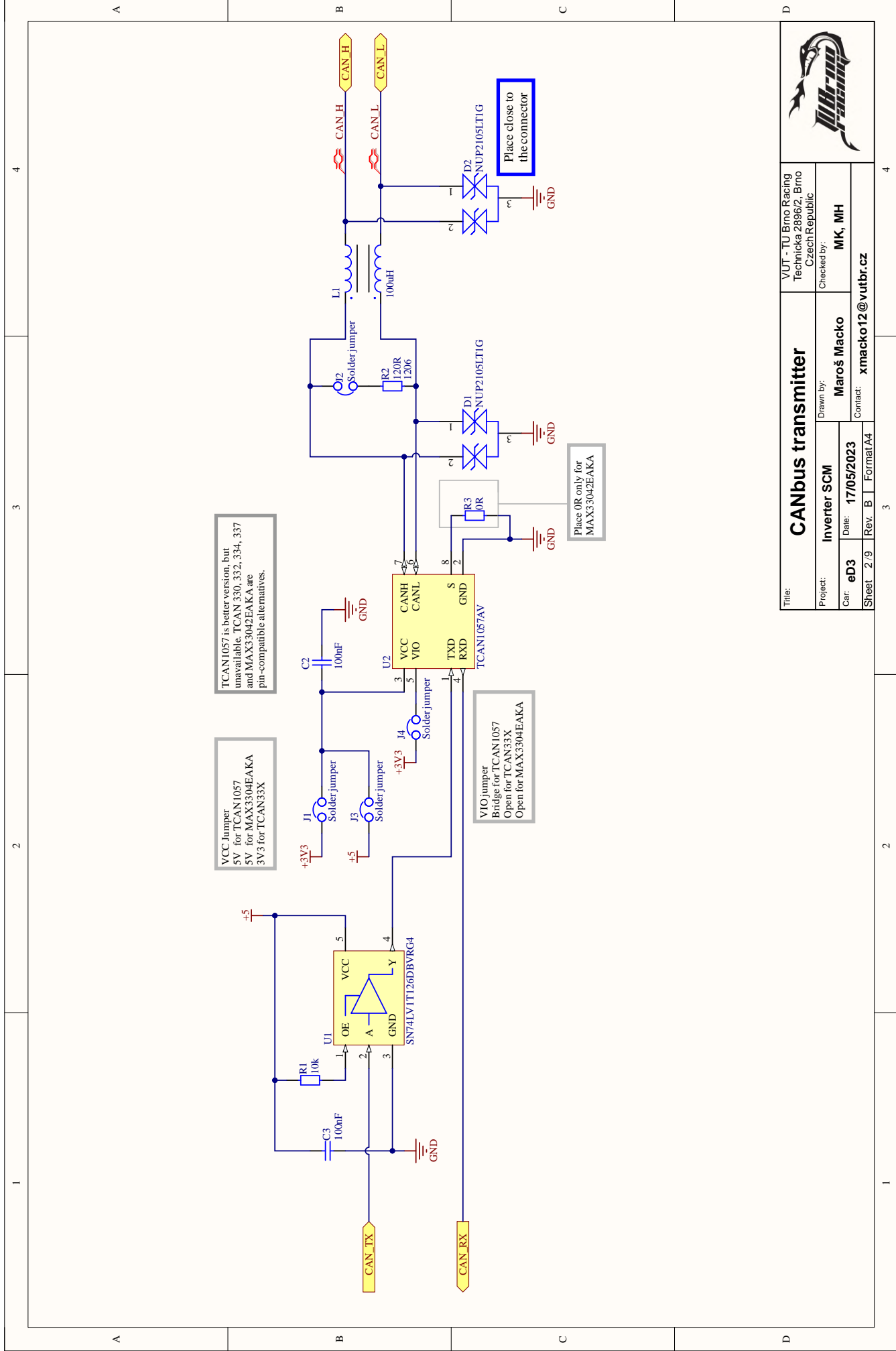
- Very simple RTD connection.
- IDAC generates the sensor excitation and the reference voltage.
- Noise and drift of the Ref voltage are correlated and therefore cancelled.
- Only one current source is necessary for AN1.
- Up to 7 RTDs are possible

Disadvantage:
 Voltage drop across the line resistance.

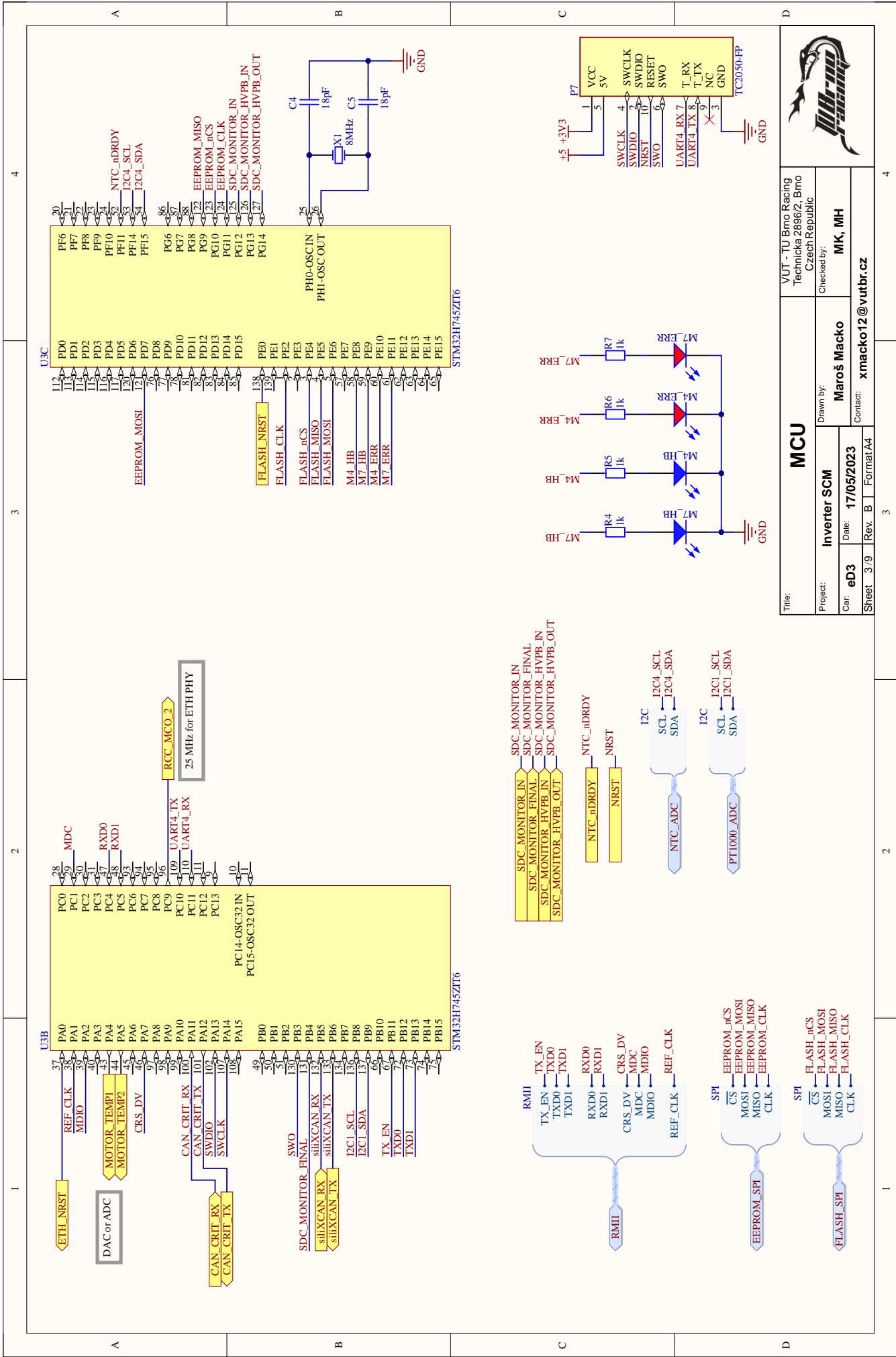
B Schéma systému SCM



Title: Inverter SCM TOP		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM	Drawn by: Maroš Macko	Checked by: MK, MH	
Car: eD3	Date: 17/05/2023	Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Sheet: 1/9	Rev: B	Format: A4	



Title: CANbus transmitter		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM	Drawn by: Maroš Macko	Checked by: MK, MH	
Car: eD3	Date: 17/05/2023	Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Sheet: 2 / 9	Rev: B	Format: A4	



Title: VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Checked by: MK, MH	
Project: Inverter SCM	Drawn by: Maroš Macko
Car: eD3	Date: 17/05/2023
Sheet: 3/9	Rev. B Format A4
Contact: xmacko12@vutbr.cz	

4

3

2

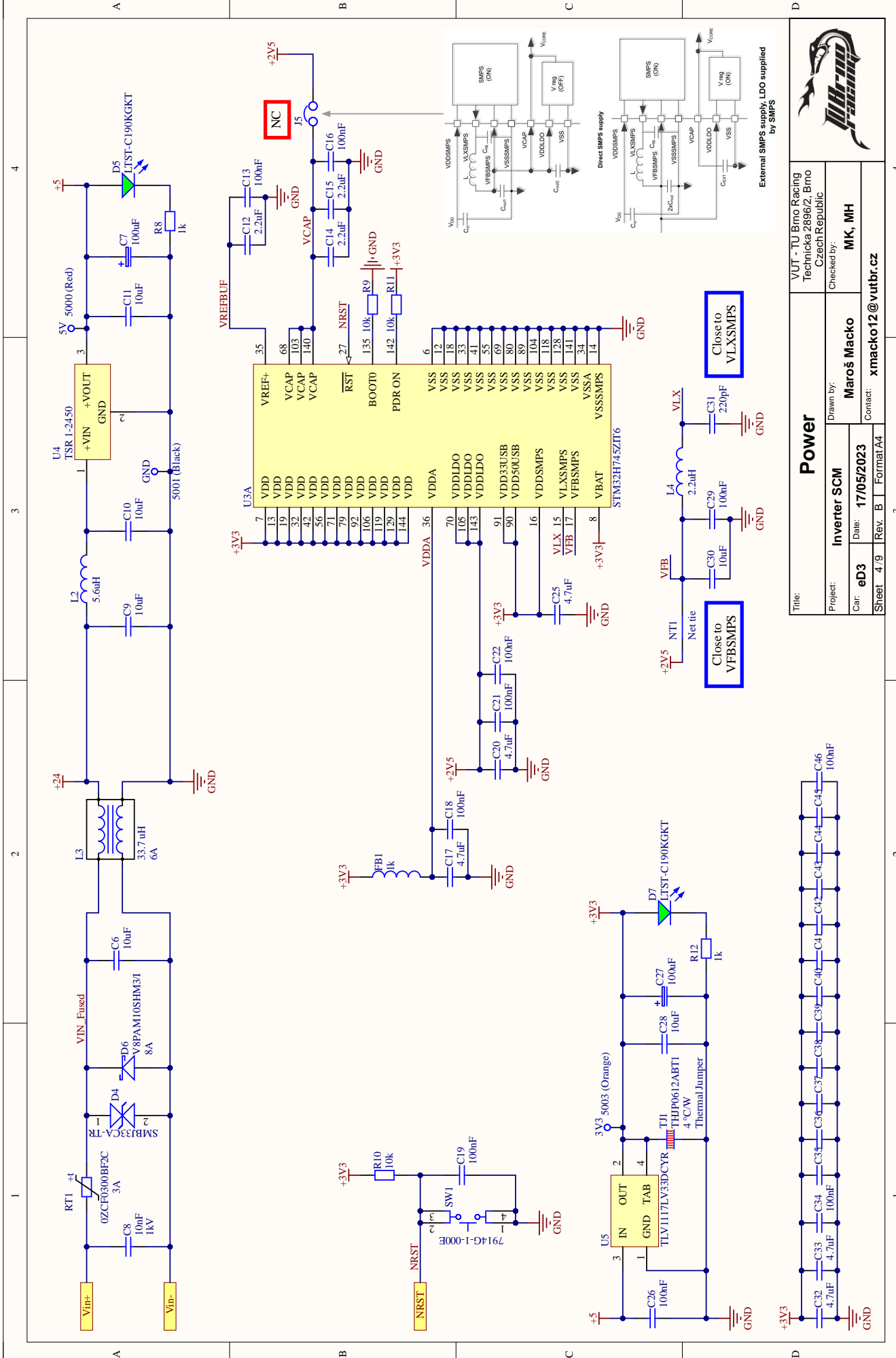
1


4

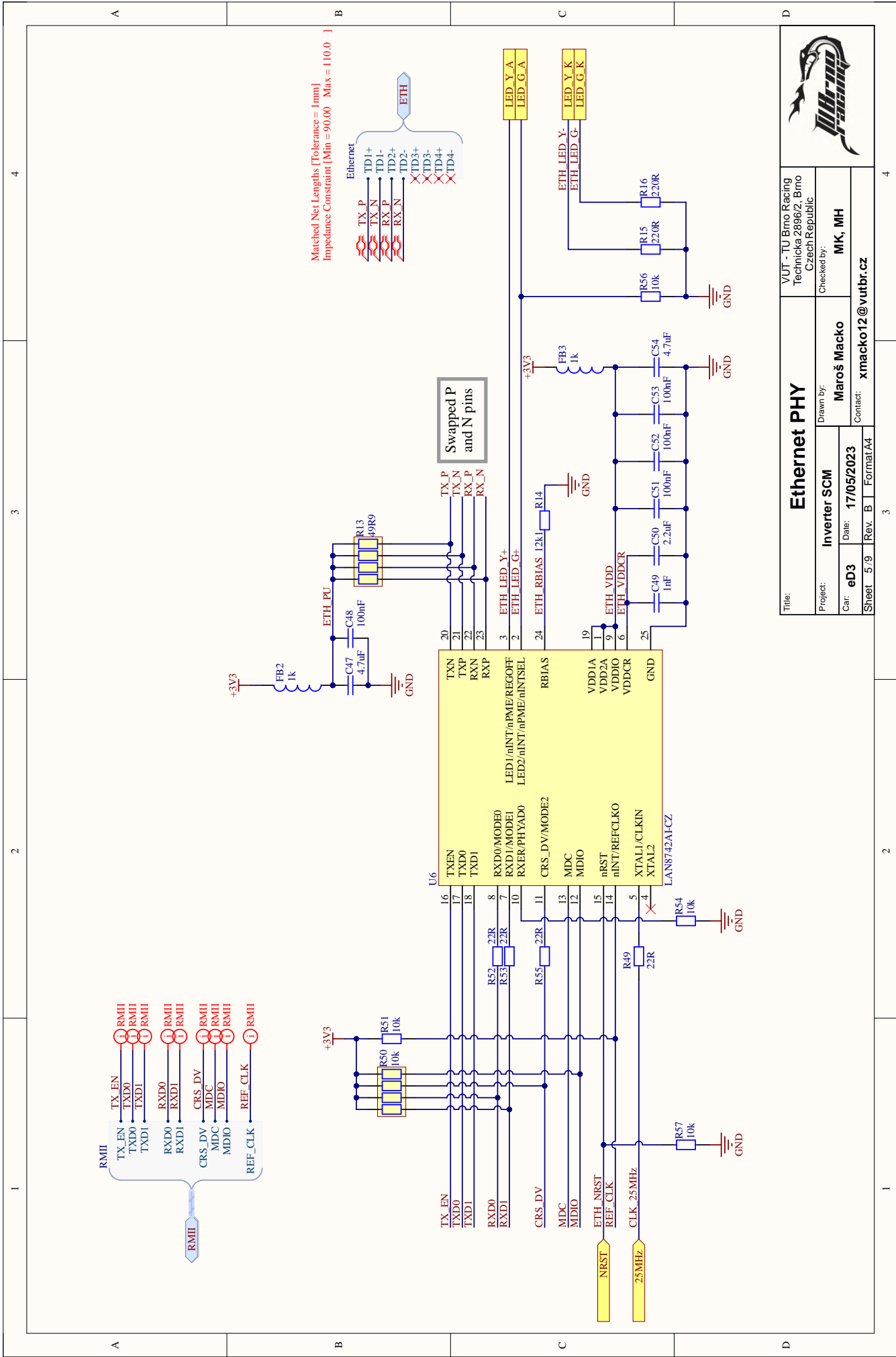
3

2

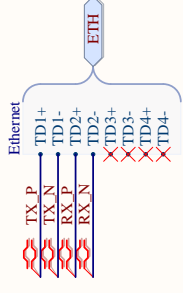
1



	
Title: Power	
Project: Inverter SCM	Drawn by: Maroš Macko
Carr: eD3	Date: 17/05/2023
Sheet: 4 / 9	Rev: B
Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Checked by: MK, MH	



Matched Net Lengths [Tolerance = 1mm]
 Impedance Constraint [Min = 90.000 Max = 110.0]

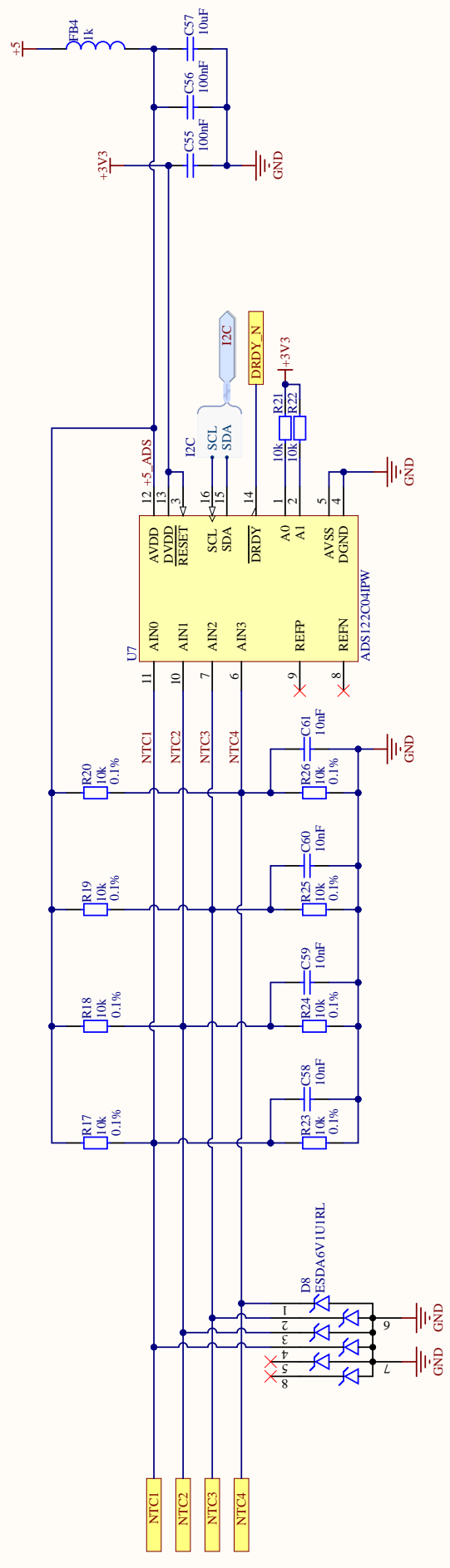


Swapped P and N pins

Ethernet PHY VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM Car: eD3	Drawn by: Maroš Macko Date: 17/05/2023
Checked by: MK, MH Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Sheet 5/9	Rev. B Format A4

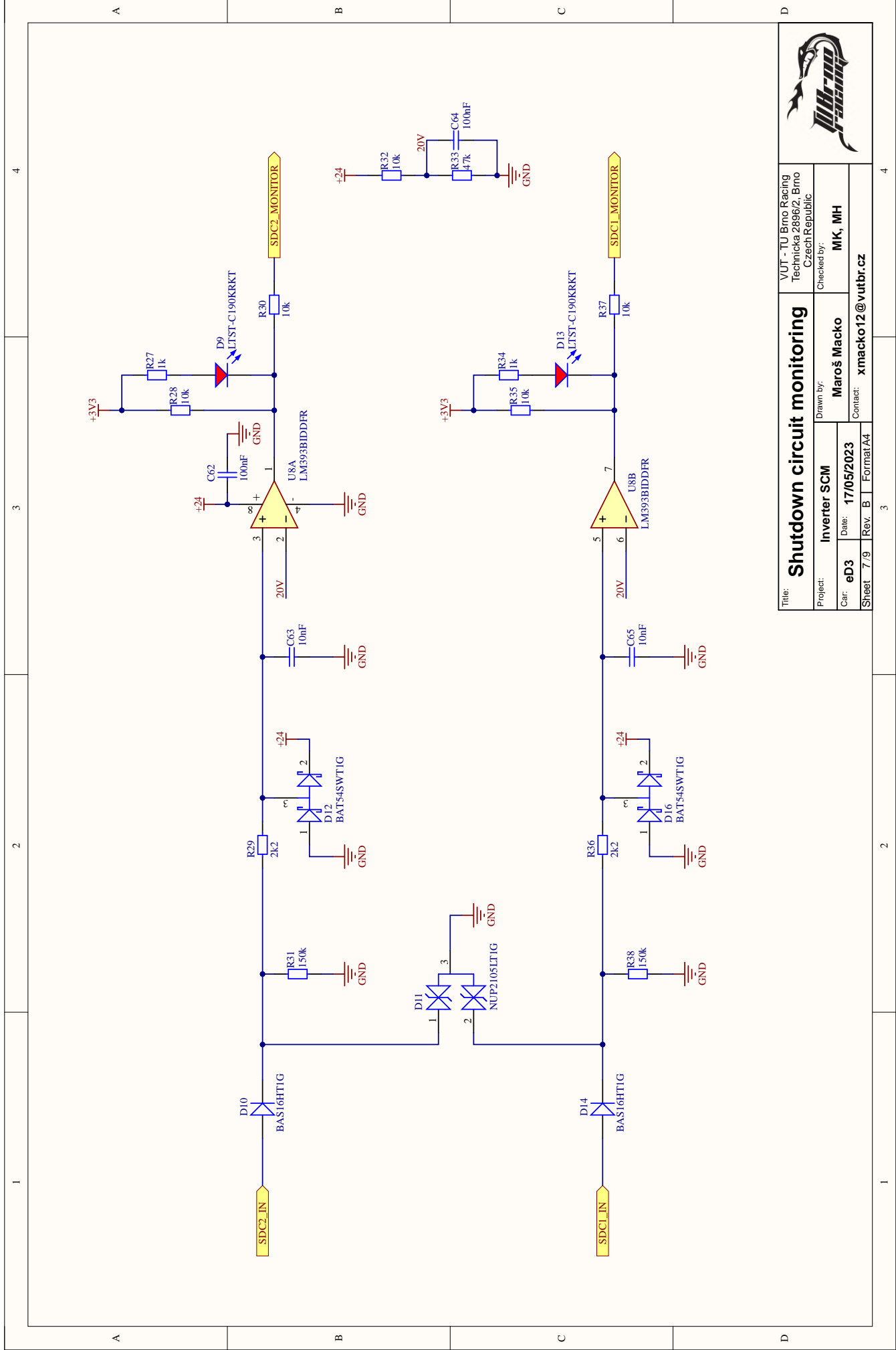
Calculating NTC resistance from ADC value:
 (Assumes N-bit bipolar ADC with $V_{ref} = V_{ref}$ = NTC's supply voltage)

$$R_{NTC} = \frac{ADC}{GAIN} * R_{down} * R_{up} / (R_{down}(2^N - 1) - \frac{ADC}{GAIN}(R_{down} + R_{up}))$$



- Programming instructions
1. Measure each channel individually
 2. If readings are saturated, change ADC gain and go to step 1
 3. Measure differential temperatures 1-2 and 3-4 (with maximum gain, calculated from step 2)
 4. Repeat
- $V_{REF}[1:0] = 10$ (Analog supply $Av_{dd} - Av_{ss}$ used as reference)

Title: NTC ADC measurement		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM		Checked by: MK, MH	
Car: eD3		Date: 17/05/2023	
Sheet: 6/9		Rev: B Format: A4	
Drawn by: Maroš Macko		Contact: xmacko12@vutbr.cz	



Title: Shutdown circuit monitoring		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM	Drawn by: Maroš Macko	Checked by: MK, MH	
Car: eD3	Date: 17/05/2023	Contact: xmacko12@vutbr.cz	
Sheet: 7/9	Rev. B	Format: A4	

4

3

2

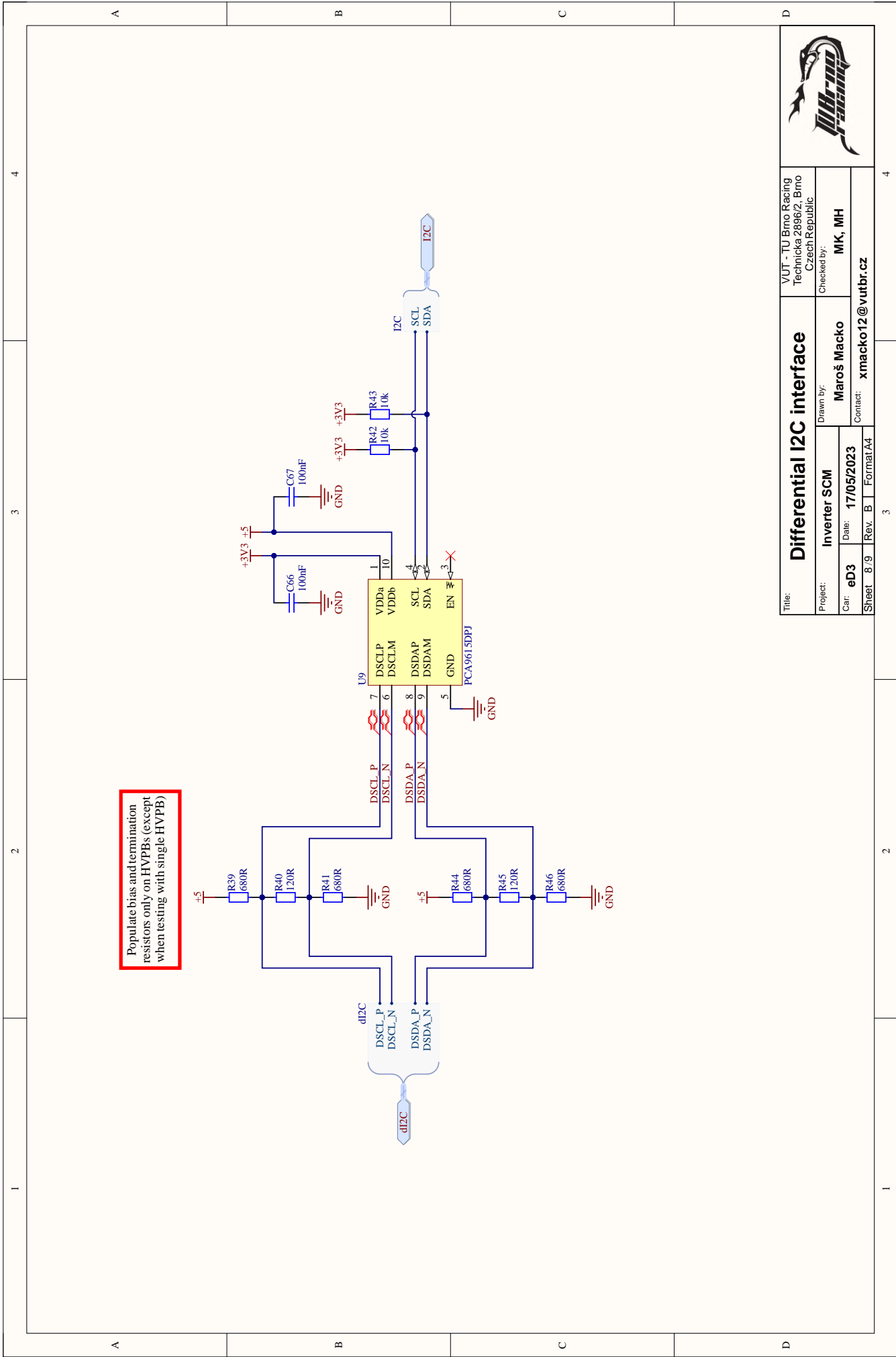
1

4

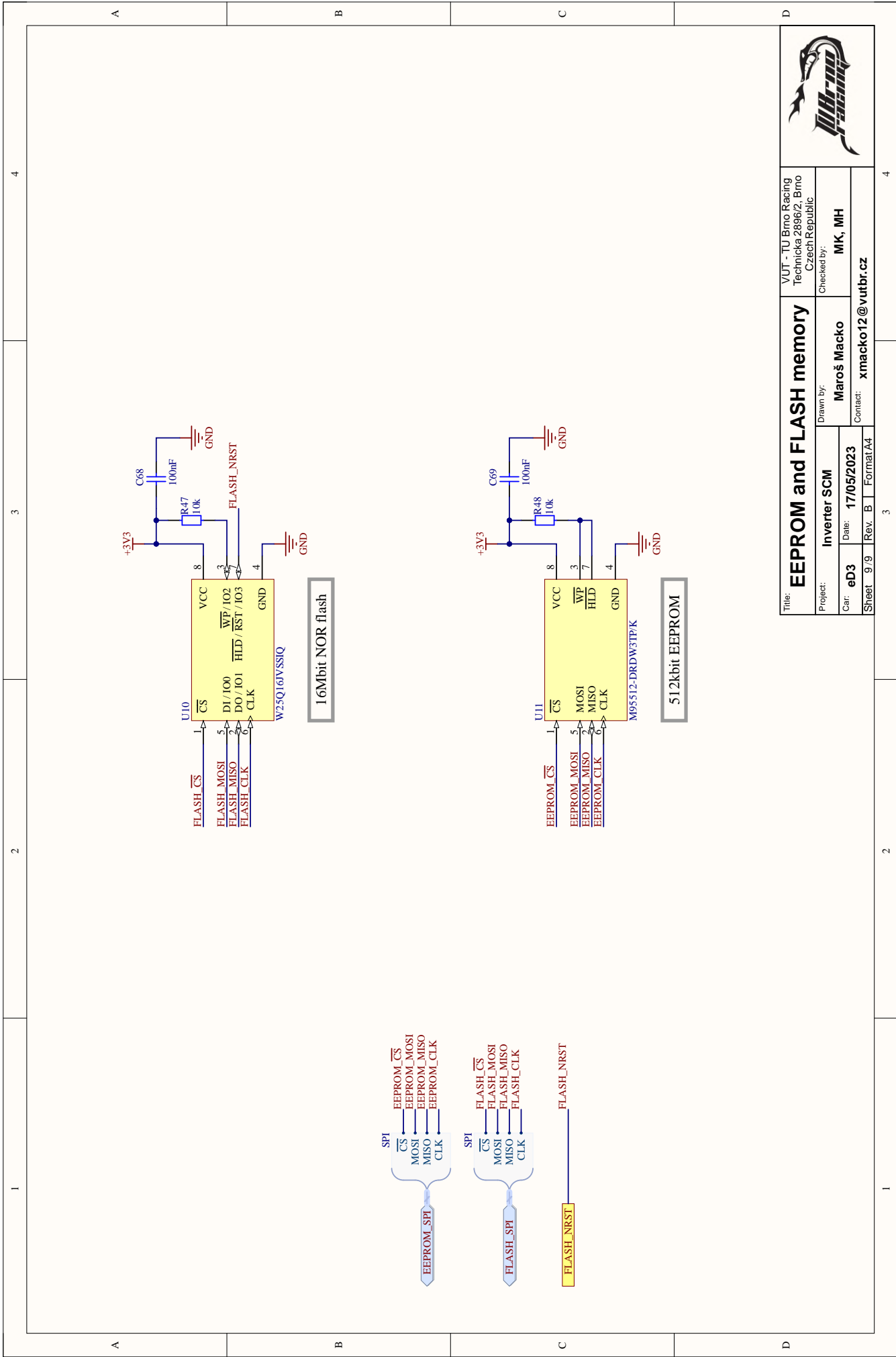
3


2

1



Title: Differential I2C interface		VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: Inverter SCM		Checked by: MK, MH	
Car: eD3		Date: 17/05/2023	
Sheet: 8/9	Rev: B	Format: A4	Contact: xmacko12@vutbr.cz



	
Title: EEPROM and FLASH memory	
Project: Inverter SCM	
Drawn by: Maroš Macko	
Checked by: MK, MH	
Car: eD3	
Date: 17/05/2023	
Sheet: 9/9	
Rev. B	
Format: A4	
Contact: xmacko12@vutbr.cz	

VUT - TU Brno Racing
 Technická 2896/2, Brno
 Czech Republic

C Verejný katalógový list meniča

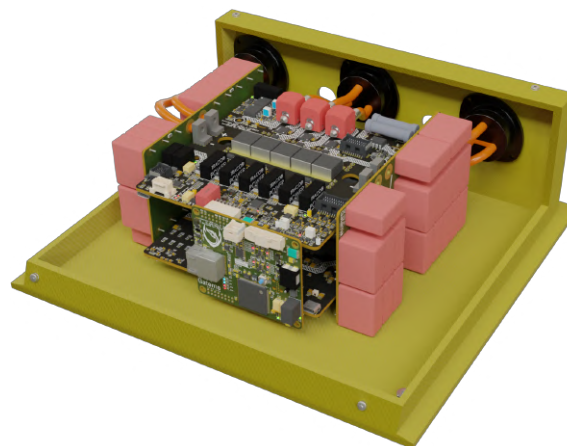


Dragon AMR - Dual inverter

General Description

The Dragon AMR consists of two high-voltage inverters designed for driving PMSM motors. It was designed to meet requirements of the TU Brno Racing team and rules of the Formula Student competition (version 2023).

TU Brno Racing has partnered with SiliXcon s.r.o. and the Dragon AMR uses their latest ESC5 architecture and is compatible with existing software tools.

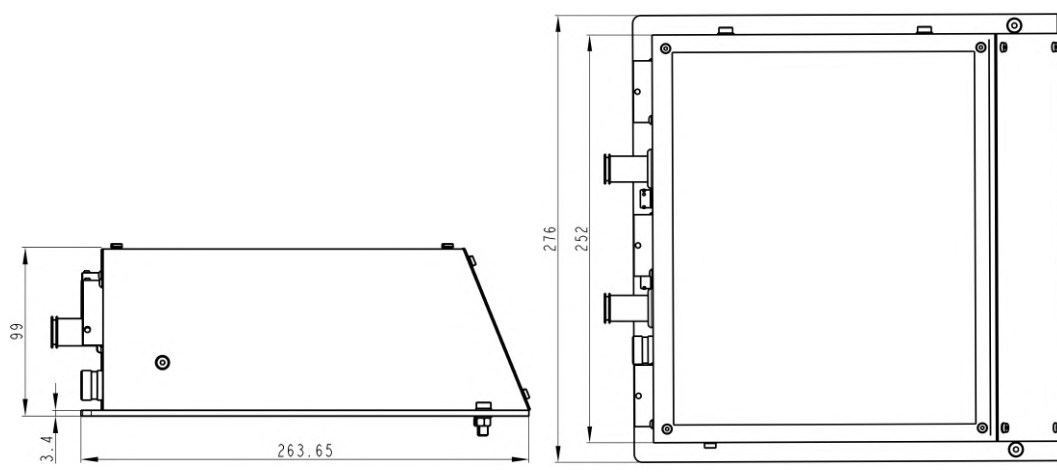
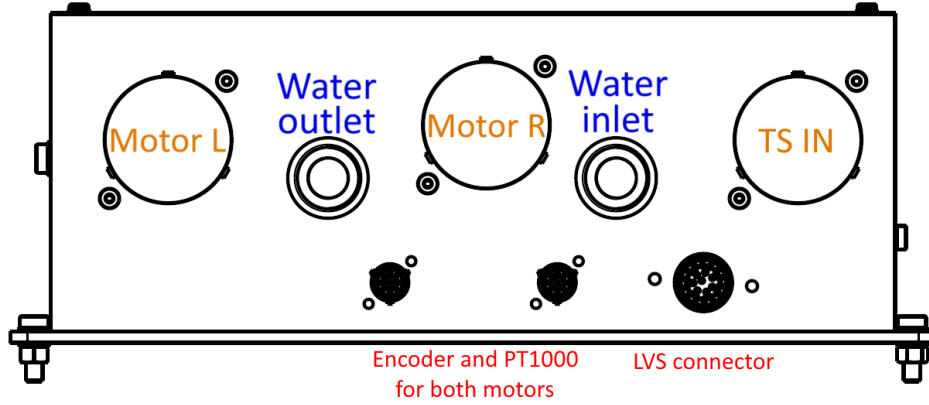


Features

- Up to 600 V input voltage
- Up to 2x150 A continuous current capability
- Differential Sin-Cos encoder input
- 2 x PT1000 input (current loop)
- CAN (CANopen), Ethernet
- Reinforced galvanic isolation - LV to HV
- HVIL (High Voltage Interlock)
- SCS Current measurement output for BSPD
- HW OC, SW UV, OV protection
- Soft-limitation (derating) for temperature, voltage, current constraints
- Internal diagnostics (transistor / motor check)
- Strong and lightweight aramid fiber casing

The Dragon AMR consists of three main boards - SCM (System Communication Module and two HVPBs (High Voltage Power Board) - one for each axis. There are also two additional Capacitor boards which also interconnect the two HVPBs, and one standalone current sensor equipped with LEM HTFS 200-P sensor with analog SCS output for BSPD (Brake System Plausibility Device). Discharge resistor is also included, which ensures that the high voltage DC-link capacitors are discharged within 5 seconds from loss of SDC Final signal (HV battery relays are switched off).

Mechanical specifications



Electrical Specifications

All specifications are for 24 V LVS supply voltage, 40 °C inlet water temperature and over operating free-air temperature rating, unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
TS ¹ supply	TS	60		600	V	
LVS supply	+24V	18	24	26	V	
LVS current consumption	I_{LVS}		340	400	mA	No sensor / auxiliaries
Operating temperature	t_{amb}	0		85	°C	Connectors, wires, ambient air inside
Input connector current ²				80	A	
Motor connector current ²				80	A	Per axis
DC-link capacity	C		190		µF	
Switching frequency	f_{sw}		20		kHz	
Discharge resistor ³	R_{disch}		10		kΩ	
Insulation voltage	V_{ISO}	1800			V	RMS, AC for 60 seconds
Insulation resistance	R_{ISO}	1000			MΩ	1000 V test voltage

¹ Tractive System - every part that is electrically connected to the motor(s) and TS accumulators (FSG EV 1.1.1)

² This is datasheet limitation for the continuous current of the 8STA0-24-44 connector's pin.

³ Discharge resistor is controlled by a normally-ON JFET. To disable the discharge (during normal operation), 24V must be supplied to the SDC Final pin. Prolonged discharge time will cause unnecessary heat.

Absolute Maximum Electrical Ratings

Over operating temperature range (unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit	Conditions
LVS supply	+24V	-0.3	30	V	
TS supply	TS	-0.3	800	V	$t_{amb} \leq 70\text{ °C}$
		-0.3	750	V	$t_{amb} \leq 85\text{ °C}$
IGBT temperature	t_j		150	°C	
			175	°C	Refer to AN 2018-14

Note: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under Electrical Specifications is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

Environmental and Cooling Specifications

Coolant must be plain water or oil (FSG T 7.2.2). Product is evaluated with water only.

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
Coolant inlet temperature	t	0		50	°C	
Coolant flowrate	Q	12			L min ⁻¹	
Coolant pressure	p			2.2	bar	
Weight	m		3		kg	Dry mass
Volume			5.1		L	Without connectors

Overcurrent protection

Each output phase of the Dragon AMR inverter is sensed by a galvanically isolated differential hall sensor. This differential analog signal is then evaluated at the LVS side against a set threshold (positive and negative alike). Overcurrent situation is then evaluated by comparators, and after 230 ms the circuit forces all IGBT drivers into fault state, and that disables switching. This overcurrent situation is latched, and can be resolved only after the OC event is over by toggling the RDY and FLT pins, which re-initializes drivers.

For detailed explanation, see separate document with OC circuit schematic.

Revision history

Reference	Description
Rev A (3/2023)	Initial release for ESF
Rev B (5/2023)	Replaced placeholder values

Responsible: Maroš Macko

Checked by: Matúš Kavec, Sebastian Šimanský, Jakub Lysák, Mário Harvan

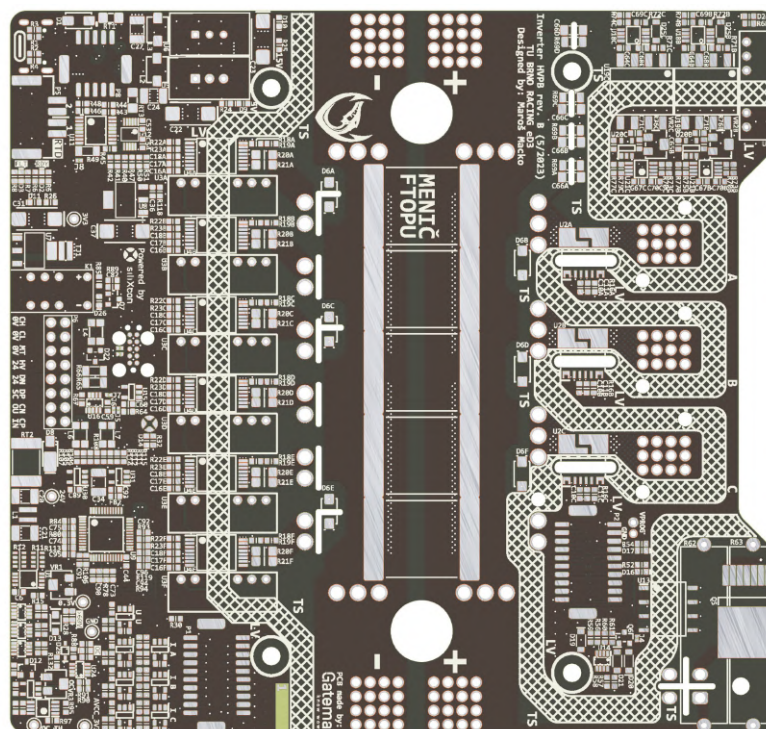
D Predvýrobný náhľad dosky HVPB

Předvýrobní náhled Skladba

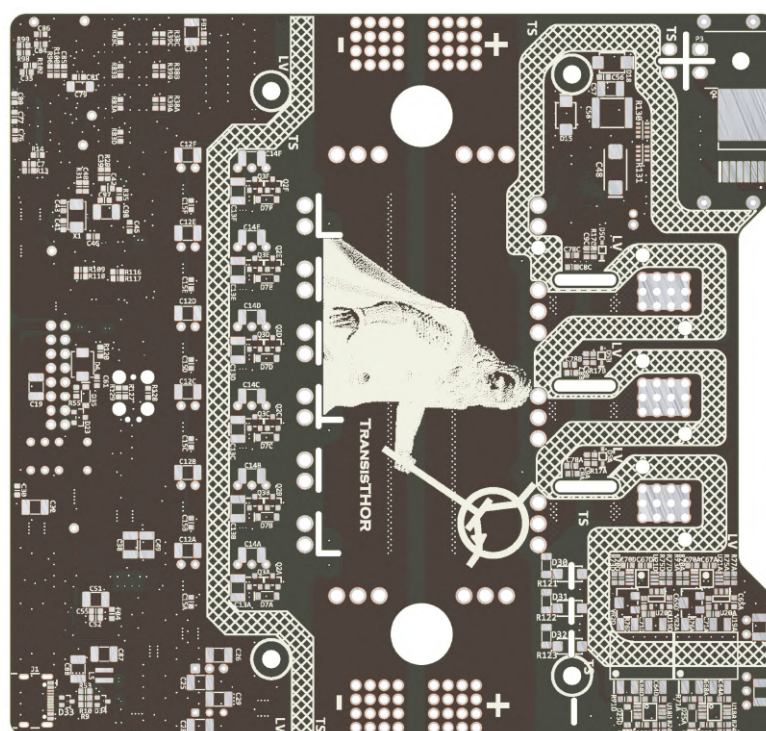
Type: Multilayer; Id: D378824				
6 layer stackup; Tg 180°		RIGID (A)		
Material text	Cu usage	Material	Thick [μm]	Pit drill
Black		Solder mask	20	
Copper (ED)	L1	Copper foil	35+25 Plt	A
PCL370HR 2x2116 [PL05] PCL370HR 2x1080 [PL05]		Prepreg	397	
Copper (ED)	L2 (51%)	Copper	35	
PCL 370 HR		Rigid laminate	297	
Copper (ED)	L3 (45%)	Copper	35	
PCL370HR 2x2116 [PL05] PCL370HR 2x1080 [PL05]		Prepreg	375	
Copper (ED)	L4 (43%)	Copper	35	
PCL 370 HR		Rigid laminate	297	
Copper (ED)	L5 (47%)	Copper	35	
PCL370HR 2x2116 [PL05] PCL370HR 2x1080 [PL05]		Prepreg	396	
Copper (ED)	L6	Copper foil	35+25 Plt	
Black		Solder mask	20	
Stackup thickness		Thick [μm]		
Estimated		2044		
Required		2000		
Plated drill		Start-stop layer		
Through holes		A = L1 - L6		

Předvýrobní náhled Finální produkt

Pohled top



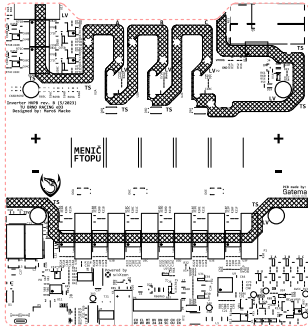
Pohled bot



Předvýrobní náhled Výrobní data

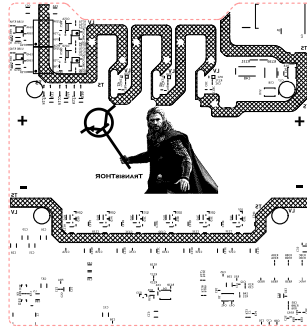
Potisk (top)

Pozn.



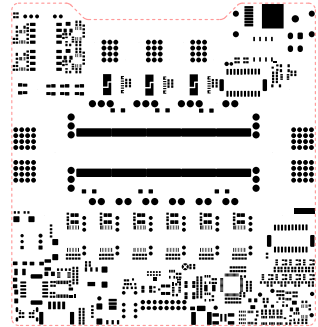
Potisk (bot)

Pozn.



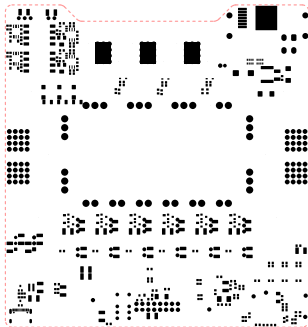
Nepájivá maska (top)

Pozn.



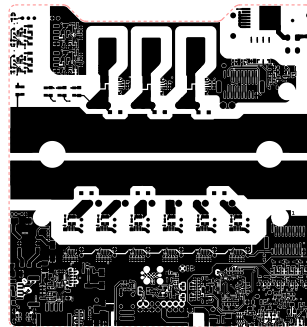
Nepájivá maska (bot)

Pozn.



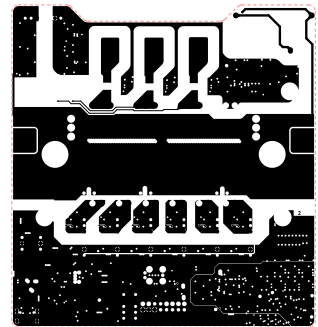
Strana součástek (top)

Pozn.



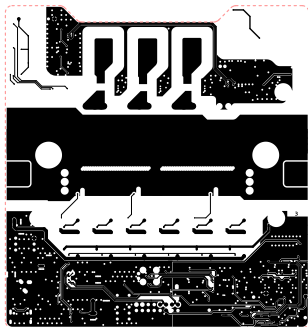
Vnitřní vrstva číslo: 2.

Pozn.



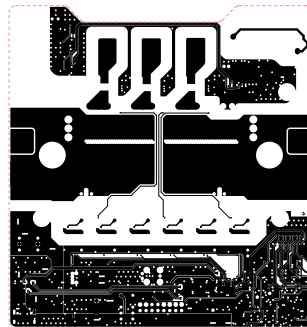
Vnitřní vrstva číslo: 3.

Pozn.



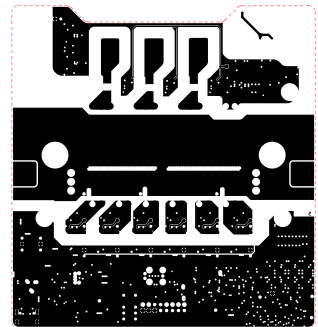
Vnitřní vrstva číslo: 4.

Pozn.



Vnitřní vrstva číslo: 5.

Pozn.



E Preklad relevantných pravidiel

V tejto prílohe sa nachádza preklad niektorých relevantných pravidiel súťaže Formula Student pre konštrukciu vysokonapäťového meniča. Plná verzia pravidiel v anglickom jazyku je dostupná zo zdroja [57].

- EV 1.1.1 Trakčný systém TS - každá časť, ktorá je elektricky pripojená k motoru/motorom a TS akumulátoru.
- EV 1.1.2 TS kryty - všetky krabičky alebo kryty, ktoré obsahujú časti TS
- EV 1.2.1 Galvanická izolácia - dva elektrické obvody sú definované ako galvanicky izolované, ak platí: Odpor medzi oboma obvody je $\geq 500 \Omega/V$ voči maximálnemu TS napätiu, testované maximálnym TS napätím alebo 250 V, čokoľvek je väčšie; a izolačné napätie (RMS, AC), ktoré obvody medzi sebou vydržia, je vyššie ako trojnásobok napätia TS alebo 750 V, čokoľvek je väčšie.
- EV 2.2.1 Výkon TS na výstupe TS akumulátoru nesmie presiahnuť 80 kW.
- EV 2.2.2 Regenerácia energie je povolená a neobmedzená.
- EV 3.1.1 TS kryty (EV 1.1.2) musia byť vyrobené buď z "uzemnenej vrstvy minimálne 0.5 mm hrubého vodivého materiálu - hliníku (alebo lepšieho), s odporom pod $300 m\Omega$, ktorý sa meria prúdom 1 A, voči LVS zemi a je schopný trvalo prenášať aspoň 10 % hodnoty hlavnej TS akumulátorovej poistky", alebo musí byť "celá z elektricky izolačných materiálov (aspoň $2 M\Omega$, merané napätím 500 V). Tiež musí byť pevná a musí vedieť zabrániť prípadným mechanickým penetráciám. Pretŕčajúce vodivé časti (ako napr. spojovací materiál) musia spĺňať EV 3.1.2."
- EV 3.1.2 Elektricky vodivá sedačka, pásy, úchytné body firewallu a samotný TS firewall musia mať odpor pod $300 m\Omega$, ktorý sa meria prúdom 1 A, voči LVS zemi a je schopný trvalo prenášať aspoň 10 % hodnoty hlavnej TS akumulátorovej poistky.
- EV 3.1.3 Časti auta, ktoré sú, alebo sa môžu stať elektricky vodivými a nachádzajú sa vo vzdialenosti do 100 mm od akejkoľvek TS súčasti, musia mať odpor voči LVS zemi najviac 100Ω .
- EV 3.2.1 Všetky elektrické systémy musia mať vhodnú nadprúdovú ochranu.
- EV 3.2.2 Hodnota kontinuálneho prúdu nadprúdovej ochrany nesmie byť vyššia ako je hodnota maximálneho kontinuálneho prúdu cez chránenú komponentu, napr. kábel, busbar alebo iný vodič.

- EV 3.2.4 Všetka nadprúdová ochrana musí byť dimenzovaná na najvyššie napätie systému, ktorý chráni. Musia byť špecifikované pre jednosmerný prúd - DC.
- EV 3.2.5 Nadprúdová ochrana TS sa nesmie spoliehať na programovateľnú logiku. Nadprúdová ochrana nemodifikovaných komerčne dostupných kontrolérov / meničov sa môže spoliehať na programovateľnú logiku.
- EV 3.2.6 Nadprúdová ochrana musí byť navrhnutá pre očakávaný teplotný rozsah, najmenej od 0 °C do +85 °C.
- EV 3.2.7 Cesty vysokého prúdu TS cez akumulátor(y) musia byť istené poistkou.
- EV 4.1.1 Maximálne povolené napätie medzi dvoma elektrickými spojmi nesmie presiahnuť 600 V DC, pre interné súčasti signálov kontroléra / meniča 630 V DC.
- EV 4.1.2 Všetky komponenty v TS musia byť dimenzované na maximálne TS napätie. TS oblasť DPS je považovaná za jednu komponentu. Každý vstup pripojený na TS musí byť dimenzovaný na maximálne TS napätie.
- EV 4.1.3 Všetky TS komponenty musia byť dimenzované na maximálnu možnú teplotu, ktorá môže počas používania nastať.
- EV 4.3.1 Celý TS musí byť galvanicky oddelený (EV 1.2.1) od LVS (Low voltage system - hlavný vypínač nízkonapäťového systému).
- EV 4.3.3 TS a LVS musia byť fyzicky oddelené tak, aby nešli cez rovnaké vedenie alebo konektor (okrem interlockov).
- EV 4.3.4 Ak je TS a LVS v jednom kryte, musia byť separované izolačnými bariérami vyrobenými z vlhku-odolného izolačného materiálu alebo musia dodržiavať odstup cez vzduch alebo po povrchu nasledovne: 10 mm pre (DC) $U < 100$ V, 20 mm pre 100 V $< U < 200$ V a 30mm pre $U > 200$ V.
- EV 4.3.6 Ak je TS a LVS na rovnakej DPS, musia byť na doske jasne separované a každá oblasť musí byť jasne popísaná ako "TS", resp. "LVS". Izolačná medzera musí byť naznačená. "Konformný náter" zahŕňa povlakový izolátor, nespájkovateľná maska sa nepočíta. Ak sú na oddelenie použité integrované obvody ako optočleny, ktoré sú navrhnuté na(d) maximálne použité napätie, ale nespĺňajú požiadavky v tabuľke E.2, môžu sa použiť a pre túto súčiastku pravidlá neplatia.

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

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

- EV 4.5.1 Všetky živé časti TS musia byť chránené pred dotykom. To zahŕňa členov tímu pracujúcich na, alebo vo vnútri auta. Je to testované 100 mm dlhou izolovanou elektródou s priemerom 6 mm počas toho, ako sú všetky TS súčiastky na mieste.
- EV 4.5.2 Musia byť použité správne izolačné materiály, na očakávanú okolnú teplotu. Tiež musia byť špecifikované pre maximálne TS napätie. Používanie iba izolačnej pásky alebo farebného gumového náteru pre účely izolácie je zakázané.
- EV 4.5.3 Menovitá teplota TS kabeláže, spojov a izolácie musí byť aspoň 85 °C.
- EV 4.5.6 Celá TS kabeláž musí zodpovedať profesionálnym štandardom, s vodičmi a terminálmi primeraného rozmeru a s adekvátnym stress-reliefom a s ochranou pred uvoľnením, spôsobeného napríklad vibráciami.
- EV 4.5.9 Každý tienený kábel musí mať tienenie uzemnené.
- EV 4.5.11 Všetky TS spojenia musia byť navrhnuté tak, že používajú úmyselné prúdové cesty cez vodiče ako je hliník alebo meď a nespoliehajú sa napr. na ocelové skrutky ako primárne vodiče.
- EV 4.5.12 Všetky TS spojenia nesmú obsahovať stlačiteľné materiály (ako plasty) v svojom stack-upe, ani sa nesmú používať ako spojovací materiál. FR-4 je povolená.
- EV 4.5.13 TS konektory mimo TS krabičiek musia byť navrhnuté tak, že sa fyzicky nedajú elektricky zapojiť inak, ako je navrhnuté.
- EV 4.5.14 Všetky elektrické spojenia, vrátane šróbov, maticiek a ostatného spojovacieho materiálu vo vysokoprúdovej ceste TS musia byť zabezpečené pred neúmyselným uvoľnením pomocou positive-locking mechanizmu určeného pre vysoké teploty, viď. T 10.2.
- EV 4.5.16 Spájkované spoje vo vysokoprúdovej ceste TS sú povolené iba vtedy, ak spĺňajú všetky tieto podmienky: jedná sa o spoje na DPS, spojené zariadenia nie sú káble ani batériové články a zariadenia sú dodatočne mechanicky zabezpečené pred uvoľnením.

- EV 4.8.1 Musí byť možné odpojiť aspoň jeden pól TS batérie rýchlym odstránením ľahko prístupného elementu, poistky alebo konektora. Táto časť sa nazýva HVD - High Voltage Disconnect. Jeho odpojenie musí byť možné bez nutnosti odstraňovať časti karosérie. HVD musí byť viac ako 350 mm nad zemou a musí byť jasne viditeľné, počas státia za vozidlom. Vzdialené odpojovanie HVD cez dlhú rúčku, lano alebo kábel je zakázané.
- EV 4.9.1 Ak je potrebný osobitný vybíjací obvod na splnenie pravidla EV 6.1.5, musí byť navrhnutý tak, že vydrží maximálne napätie TS permanentne. Po troch po sebe nasledujúcich vybitiach v čase do 15 sekúnd, čas definovaný v pravidle EV 6.1.5 môže byť prekročený. Plné vybitie musí byť dosiahnuté v rozumne krátkej dobe po deaktivovaní vypínacieho obvodu.
- EV 4.9.2 Vybíjací obvod musí byť zapojený tak, že je aktívny vždy, keď je vypínací obvod otvorený. Tiež musí byť bezporuchovo navrhnutý tak, že si bude svoju funkciu plniť aj vtedy, ak sa odpojí HVD, alebo batéria.
- EV 4.9.3 Istenie vybíjacieho obvodu je zakázané.
- EV 5.7.1 Musí byť implementovaný obvod, ktorý zaručuje, že je medziobvod prednabitý na aspoň 95 % napätia batérie pred tým, ako sa zopne druhé AIR. Preto musí byť napätie medziobvodu monitorované.
- EV 5.7.2 Prednabíjací obvod musí používať mechanické relé typu NO. Všetok prednabíjací prúd musí ísť cez toto relé.
- EV 6.1.5 Keď je rozpojený ochranný obvod "shutdown circuit", TS sa musí vypnúť otvorením všetkých AIR a napätie TS musí klesnúť pod 60 VDC alebo 50 VACRMS za menej ako 5 sekúnd. Prúd batérie musí klesnúť na nulu okamžite. Otvorenie AIR môže byť oneskorené o menej ako 250 ms, aby stihol menič zredukovať odoberaný prúd pred tým, ako sa AIR otvoria. Napájanie AIR musí byť rýchlo odpojené pred tým, ako sa dostane na svoju minimálnu povolenú hodnotu v zapnutom stave.
- T 10.2.2 Tieto metódy splňajú požiadavky pre positive-locking: správne nainštalovaný poistný drôt, závlačka, nylonové zamykacie matice (ISO 7040, ISO 10512, EN 1663 alebo ekvivalentný štandard) pre teploty do 80 °C, poistné matice (DIN 980, ISO 7042 alebo ekvivalentný štandard, jet-nut a K-nut), istiace pliesky a istenie typu locking plate.

T 11.6.1 Samostatný neprogramovateľný obvod (BSPD - Brake system plausibility device - zariadenie plauzibility brzdového systému) musí byť schopný otvoriť SDC, pokiaľ je detekované tvrdé brzdenie a do motorov tečie viac než 5 kW. SDC obvod musí ostať otvorený až do reštartovania systému pomocou LVMS, alebo BSPD sa môže po 10 s absencie chyby reštartovať samé.