

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ŘÍDICÍ JEDNOTKA A SYSTÉM NAPÁJENÍ FORMULE STUDENT

FORMULE STUDENT CONTROL UNIT AND POWER SUPPLY SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Klement

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Dominik Klement

**ID:** 211152

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Řídicí jednotka a systém napájení formule Student

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- 1) Seznamte se se způsoby regulace napětí, porovnání lineárních a spínaných regulátorů, metodami ochrany zařízení proti přepólování a přepětí.
- 2) Na základě nabytých znalostí vytvořte blokový návrh systému řídicí jednotky napájení na modelu vozidla formule Student Electric.
- 3) Vyberte vhodné komponenty a navrhnete schéma řídicí jednotky a jednotky distribuovaného napájení stroje. Hlavní části návrhu ověřte simulací.
- 4) Vytvořte návrh desky plošných spojů řídicí jednotky a navrhnete univerzální modul napájení na jednotky formule Student Electric.
- 5) Návrhy realizujte a funkčnost ověřte měřeními. Zkonstruujte kryt řídicí jednotky.
- 6) Implementujte celý systém v monopostu formule Student Electric.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] R. T. Rich Nowakowski, "Linear versus switching regulators in industrial applications with a 24-V bus," 2013. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slyt527/slyt527.pdf>

[2] Texas Instruments, „11 Ways to Protect Your Power Path,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy168/slyy168.pdf>

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Tato práce se věnuje návrhu centrální řídicí jednotky a napájecího systému pro monopost soutěžící v soutěži Formule Student Electric. Řídicí jednotka zpracovává data ze senzorů umístěných na monopostu, tyto data vyhodnocuje a následně ovládá periferie. Napájecí systém integrovaný v řídicí jednotce reguluje vstupní napětí na větve, které napájí další jednotky monopostu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Řídicí jednotka vozidla, Napěťový regulátor, Formula Student Electric, EV, Elektrické vozidlo, TU Brno Racing, ECU, Vstupní ochrana

## **ABSTRACT**

This thesis describes the development of a Vehicle Control Unit (VCU) used in a Formula Student Electric competition. The VCU processes data from sensors located on the vehicle, evaluates this data, and then controls peripherals. The power supply system, integrated in the VCU, regulates the input voltage to the branches that supply other units on the vehicle.

## **KEYWORDS**

Vehicle Control Unit, Voltage regulator, Formula Student Electric, EV, Electric Vehicle, TU Brno Racing, ECU, Input Protection

KLEMENT, Dominik. *Řídicí jednotka a systém napájení formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2021, 88 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Dominik Klement  
**VUT ID autora:** 211152  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Řídící jednotka a systém napájení formule Student

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mé rodině a nejbližším za podporu, která mi umožnila zúčastnit se projektu Formule Student. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Miloslavu Steinbauerovi Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady. V neposlední řadě děkuji týmu TU Brno Racing a jeho partnerům za důvěru a prostředky, které mi umožnili tuto práci zrealizovat.

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Dosavadní řešení</b>	<b>13</b>
1.1 Napájení	13
1.1.1 Modularita	13
<b>2 Požadavky na jednotku</b>	<b>14</b>
2.1 Všeobecné požadavky	14
2.1.1 Integrace	14
2.1.2 Vstupy a výstupy	15
2.1.3 Komunikační rozhraní	17
2.1.4 Shrnutí požadavků	18
<b>3 Výběr součástek</b>	<b>20</b>
3.1 Rezistory	20
3.2 Kondenzátory	20
3.3 Ochrana napájení	21
3.3.1 Sériová dioda	21
3.3.2 Paralelní dioda	22
3.3.3 Aktivní ochrana	23
3.4 Regulátory napětí	24
3.4.1 Lineární	24
3.4.2 Spínané	25
3.4.3 Shrnutí	25
3.5 Mikrokontroler	26
<b>4 Návrh schémat</b>	<b>28</b>
4.1 Ochrana napájení	28
4.1.1 Konfigurace LM5069	28
4.2 Regulátory napětí	32
4.2.1 Spínané regulátory	32
4.2.2 Lineární regulátor	34
4.3 Vstupy	35
4.3.1 Senzory otáček kol	35
4.3.2 Digitální vstupy	37
4.3.3 Analogové vstupy	38
4.3.4 Měření proudu	39
4.4 Výstupy	40

4.4.1	Výkonové spínače . . . . .	40
4.4.2	Digitální výstupy . . . . .	41
4.4.3	Analogové výstupy . . . . .	42
4.5	Komunikace . . . . .	43
4.5.1	CAN . . . . .	43
4.5.2	RS232 . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Návrh DPS</b>	<b>46</b>
5.1	Rozložení DPS . . . . .	46
5.1.1	Výkonová část . . . . .	46
5.1.2	Analogová část . . . . .	47
5.2	Rozložení vrstev . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Obal jednotky</b>	<b>48</b>
6.1	Návrh . . . . .	48
6.2	Výroba . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Univerzální modul napájení</b>	<b>50</b>
7.1	Návrh . . . . .	50
<b>8</b>	<b>Implementace</b>	<b>51</b>
8.1	Validace simulací . . . . .	51
8.1.1	Změna zátěže . . . . .	52
8.1.2	Ustálený stav . . . . .	53
8.2	Kabeláž . . . . .	53
	<b>Závěr</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>61</b>
A	Schéma řídicí jednotky	62
B	Návrh DPS řídicí jednotky	73
C	Blokové schéma monopostu eD1	81
D	Schémata univerzálních modulů napájení	83
E	Vizualizace vzhledu řídicí jednotky	87

# Seznam obrázků

1	Monopost Dragon 9 týmu TU Brno Racing . . . . .	12
2.1	Bloková schéma napájení formule . . . . .	15
2.2	Rozložení sběrnic (pro lepší čitelnost viz. příloha C) . . . . .	17
2.3	Bloková schéma jednotky . . . . .	19
3.1	Ochrana sériovou diodu . . . . .	22
3.2	Ochrana paralelní diodu . . . . .	22
3.3	Schéma zapojení čipu LTC4365 . . . . .	23
3.4	Prostředí programu STM32CubeMX . . . . .	27
4.1	Prostředí programu Altium Designer 20 . . . . .	28
4.2	SOA mosfetu IAUT260N10S5N019 . . . . .	30
4.3	Schéma zapojení vstupní ochrany jednotky . . . . .	31
4.4	Blokové schéma napájení . . . . .	32
4.5	Prostředí nástroje WEBENCH Power Designer . . . . .	32
4.6	Vygenerované zapojení TPS5450 . . . . .	33
4.7	(a) Ustálený stav (b) Změna zátěže . . . . .	33
4.8	Schéma zapojení spínaného regulátoru . . . . .	34
4.9	Schéma zapojení lineárního regulátoru . . . . .	34
4.10	Snímač E2E-S05S12-WC-C1 . . . . .	35
4.11	Interní zapojení snímače E2E-S05S12-WC-C1 . . . . .	36
4.12	Schéma zapojení vstupu snímače otáček kol . . . . .	36
4.13	Schéma zapojení digitálního vstupu . . . . .	37
4.14	Schéma zapojení analogového vstupu . . . . .	38
4.15	Schéma zapojení měření proudu . . . . .	39
4.16	Schéma zapojení výkonového spínače . . . . .	40
4.17	Schéma zapojení digitálního výstupu . . . . .	41
4.18	Schéma zapojení analogového výstupu . . . . .	42
4.19	Formát zprávy CAN 2.0B . . . . .	43
4.20	Zapojení CAN transceiveru . . . . .	43
4.21	Zapojení řadiče MCP2515 . . . . .	44
4.22	Zapojení RS232 převodníku . . . . .	45
5.1	Prostředí návrhu DPS . . . . .	46
5.2	Návrhy DPS spínaného zdroje [15] . . . . .	47
5.3	Schéma zapojení lineárního regulátoru . . . . .	47
6.1	Prostředí Solidworks 2019 . . . . .	48
6.2	Vizualizace řídicí jednotky . . . . .	49
6.3	Vizualizace jednotky bez krytu . . . . .	49
7.1	Schéma zapojení univerzálního modulu . . . . .	50

8.1	Měřicí pracoviště . . . . .	51
8.2	Detail měření . . . . .	52
8.3	Změna zátěže (a) Simulace (b) Měření . . . . .	52
8.4	Ustálený stav (a) Simulace (b) Měření . . . . .	53
8.5	Popis konektoru . . . . .	53

# Seznam tabulek

2.1	Shrnutí vstupů a výstupů . . . . .	19
3.1	Přehled keramických dielektrik . . . . .	21
3.2	Porovnání lineárních a spínaných regulátorů . . . . .	25
4.1	Parametry mosfetu IAUT260N10S5N019 [31] . . . . .	30

# Úvod

Tato práce se věnuje návrhu centrální řídicí jednotky a napájecího systému pro monopost soutěžící v soutěži Formule Student Electric. Řídicí jednotka zpracovává data ze senzorů umístěných na monopostu, tyto data vyhodnocuje a následně ovládá periferie. Napájecí systém integrovaný v řídicí jednotce reguluje vstupní napětí na větve, které napájí další jednotky na monopostu.

Formule Student (FS), je evropskou odnoží původně americké soutěže Formula SAE. Jedná se o prestižní soutěž univerzitních týmů složených ze studentů bakalářského a magisterského studia. Počátky soutěže sahají až do roku 1981, kdy myšlenka závodů univerzit vznikla v USA. Do Evropy se dostala o 17 let později. Avšak závody se nekonají pouze na těchto kontinentech. Kromě vybraných amerických a evropských států je soutěž pořádána také v Brazílii, Japonsku, Indii nebo Austrálii. Celkově se závodů účastní přes 800 týmů z celého světa.[1].



Obr. 1: Monopost Dragon 9 týmu TU Brno Racing

Tým TU Brno Racing je tvořen studenty Vysokého učení technického v Brně. Na Obr. 1 je část členů tohoto týmu a monopost Dragon 9 ze sezóny 2018/2019.

# 1 Dosavadní řešení

Na prvním elektrickém autě byla jednotka navržena jako modulární systém, cílem týmu je postupně co nejvíce součástí auta integrovat, tím snižovat váhu a usnadňovat výrobu kabelového svazku.

## 1.1 Napájení

Dosavadní řešení řídicí jednotky a napájení bylo oddělené. Každá jednotka v autě si regulovala palubní napětí interně. Bylo tedy složitější zjišťovat případnou chybu. Jednotlivé jednotky navrhují jiní lidé a ti mají preference při výběru součástek. Docházelo tedy k množení vzájemně nekompatibilních součástek, při případných opravách se tak stávalo, že některé součástky chyběli a museli se doobjednávat. To stojí drahocenný čas a zbrzdí se tak vývoj formule. Tato práce popsany problém řeší sjednocením zdrojů do jedné jednotky a distribuováním potřebných napětí formou sběrnice, která povede celým kabelovým svazkem. Každá jednotka bude tedy obsahovat pouze identický modul ochrany proti přepólování. Zabrání se tak množení různých druhů součástek.

### 1.1.1 Modularita

Jednotlivé funkční části řídicí jednotky byly oddělené na několika DPS, některé obvody zejména transeivery na komunikaci po CAN sběrnici se zbytečně duplikovali.

#### **Datalogger**

Datalogger má na starosti snímání komunikačních sběrnic na autě a zaznamenávání dat z nich do paměti. Tyto data se následně využívají na analýzu stavu auta a jeho jednotlivých částí po dokončení jízdy. Z těchto dat je možno vidět, zda je monopost správně nastaven.

#### **ESP**

Jednotka ESP, která má na starosti zpracování signálů z analogových čidel, datových sběrnic a inerciální jednotky a následné přerozdělení výkonu do dvojice motorů pohánějících zadní nápravu podle modelu chování automobilu pro optimální trakci byla v minulosti implementována jako modul do řídicí jednotky auta. Docházelo tak k duplikaci součástek potřebných ke čtení signálů a sběrnic a také byl potřebný další mikrokontroler, na kterém běžel ESP algoritmus. Jedním z cílů této práce je tuto jednotku integrovat do hlavní řídicí jednotky.

## 2 Požadavky na jednotku

Před samotným začátkem návrhu řídicí jednotky je důležité stanovit požadavky, které budou určovat další směr, návrh a použité součástky.

### 2.1 Všeobecné požadavky

S ohledem na nedostatky předchozího řešení a zkušenosti získané při stavbě prvního modelu formule se tým rozhodl pro změnu konceptu řídicí jednotky. Původní modulární řešení, tedy oddělení jednotlivých funkčních částí řídicí jednotky přinášelo i své výhody, jako například jednoduchá výměna poškozené části, ale nevýhody jako zbytečné duplikování součástek a obtížné vyhodnocování chyb převažovali. Při správném návrhu ochrany všech vstupů a výstupů nedojde k zničení jednotky jak tomu bylo v minulosti.

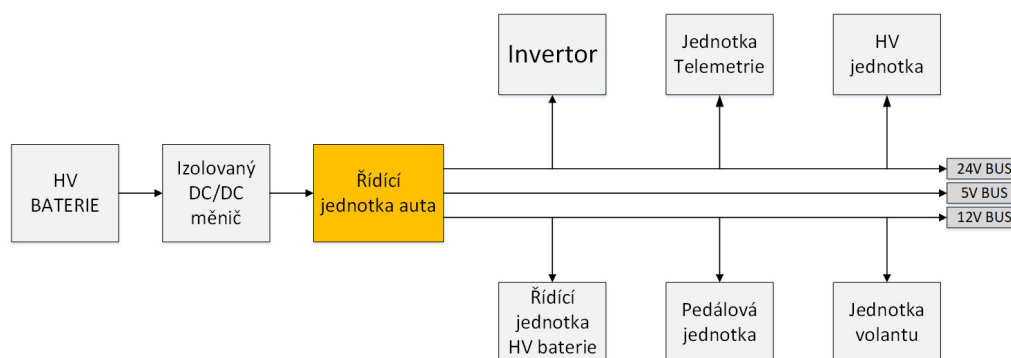
Řídicí jednotka tedy bude mít za úlohu napájet napěťové sběrnice pro všechny periferie na autě, snímat senzory měřící veličiny jako tlak a teplotu potřebné pro správné fungování chladičového systému, komunikovat s externí inerciální jednotkou, vykonávat algoritmus ESP a řídit kontrolér motorů.

#### 2.1.1 Integrace

Jednotlivé části, tedy regulátory napětí, řídicí jednotka příslušenství auta, datalogger a jednotka řízení motorů budou integrovány do jedné centrální řídicí jednotky pro zjednodušení výroby.

## Napájení

Palubní napětí je na elektrickém vozidle získáno z izolovaného DC/DC měniče, který snižuje napětí hlavní vysokonapěťové trakční baterie z přibližně 400 V na 24 V. V budoucnu ale bude tento měnič nahrazen baterií skládající se z šesti lithium-polymerových článků zapojených v sérii, napětí se tedy bude pohybovat v rozmezí od 18 V při vybité baterii až po 25.2 V při plně nabité baterii [2][3]. Napájecí síť formule je znázorněna na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Bloková schéma napájení formule

## Spolehlivost

Řídicí jednotka musí vydržet podpětí, přepětí, elektrostatický výboj, přepólování vstupu napájení, zkrat jakéhokoliv výstupu na zem při zapnutí i během chybové situace za běhu, musí vydržet širokou teplotní škálu, od záporných teplot při zimním testování až po teploty dosahující +70 °C během letních závodů.

## Rozměry

Jednotka také nesmí být příliš velká, protože je umístěna v prostoru pro řidiče, kde by mohla při určitých manévrech kolidovat s pilotem. Maximální rozměry jednotky včetně výstupních konektorů jsou tedy omezeny na prostor 150 x 200 x 50 mm, přibližně rovnající se velikosti papíru A5 a výšce 50 mm [4].

### 2.1.2 Vstupy a výstupy

Než je možné začít s návrhem je potřebné určit požadované vstupy pro jednotlivé senzory, druh sběrnic používaných na komunikaci, potřebný proud a napětí napájecích větví používaných na napájení jednotlivých jednotek a snímačů, potřebné výstupy na ovládání příslušenství jako je čerpadlo chladicí kapaliny, ventilátor, brzdové světlo a další zařízení.

## **Snímač otáček kol**

Pro správné fungování algoritmu trakční kontroly je nezbytné snímat otáčky všech kol [5], z toho důvodu musí jednotka dokázat zpracovat vstupní signály ze čtyř indukčních snímačů umístěných v náboji kola na každé z náprav.

## **Digitální vstup**

K ovládní pod systémů jako je například sepnutí vysokého napětí do měniče řídicího motoru, povolení proudové smyčky nebo aktivování časování kol jsou použita tlačítka. Jejich stav monitoruje řídicí jednotka. Těchto vstupů jsou potřeba celkem tři, ale kvůli případnému rozšíření v budoucnosti jsou požadované čtyři.

## **Analogový vstup**

Jednotka musí také snímat několik tlakových a teplotních senzorů, ty slouží k ovládní chladicího okruhu, dále je potřebné kvůli algoritmu trakční kontroly a elektronickému diferenciálu snímat úhel natočení volantu. Celkově je tedy potřeba snímat čtyři analogové veličiny, ale kvůli případnému rozšíření v budoucnosti je požadovaná implementace šesti kanálů. Také je klíčové, aby byla jednotka schopna měřit velký rozsah napětí 0 - 10 V.

## **Měření napájení**

Kvůli diagnostice napěťových sběrnic a hlídání spotřeby jednotlivých zařízení a příslušenství připojených do jednotky je potřebné snímat vstupní napětí, výstupy všech napěťových regulátorů, proud vtékající do jednotky, proud jednotlivými napěťovými větvemi a proud tekoucí ze spínaných výstupů. Díky těmto údajům bude jednotka schopna vyhodnotit chyby a zabránit poškození sebe i připojených zařízení.

## **Výkonový spínač**

Jednotka musí ovládat několik externích periferií, jako je například ventilátor, čerpadlo a brzdové světlo. Tyto zařízení pracují na různých napětích a jsou nepostradatelné pro funkčnost vozidla.

Brzdové světlo pracuje na 12 V, čerpadlo a ventilátor na 24 V. Přidán je i spínač na 5 V a rezervní spínače na 12 V a 24 V, pro použití v budoucnu. Z připojených zařízení vyplývá i požadavek na potřebný výstupní proud regulátorů a spínačů. Ventilátor používaný na autě má příkon až 245 W [6], příkon čerpadla při plném zatížení je až 53 W [7] a příkon brzdového světla navrženého týmem je 10 W.

## Digitální výstup

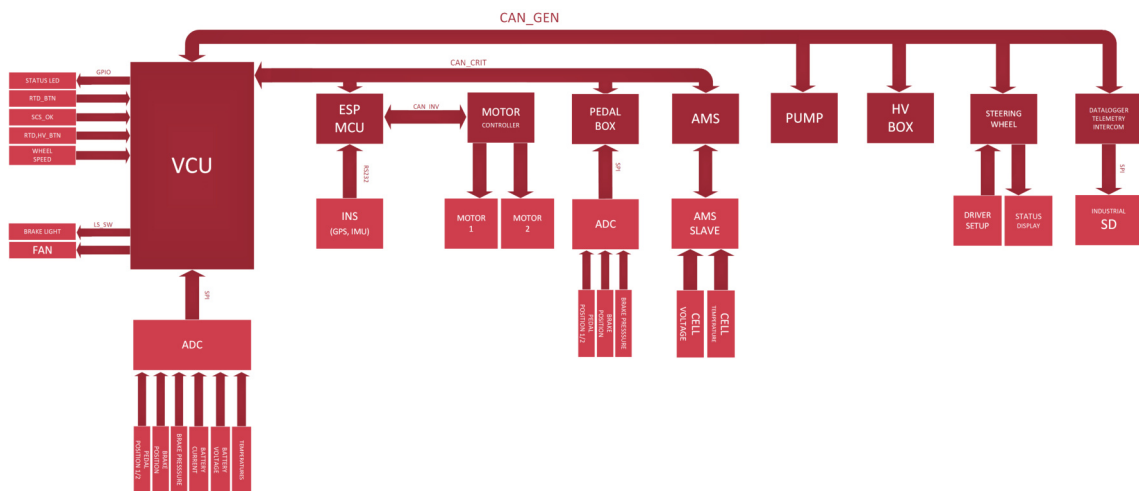
Jednotka má také za úkol přehledně indikovat stav všech systémů auta, jako například přítomnost vysokého napětí v měniči, chybový stav akumulátoru, nebo porušení izolace mezi vysokonapětovou a nízkonapětovou částí fungující na izolované straně měniče. Tyto indikátory jsou na autě tři, v budoucnu je v plánu je rozšířit, proto jsou digitální výstupy požadovány čtyři.

## Analogový výstup

Pro budoucí použití na simulování senzorů, nebo ovládání speciálního příslušenství, musí být jednotka schopna generovat analogový signál s napětovým rozsahem (0 - 10 V).

### 2.1.3 Komunikační rozhraní

Kromě různorodých vstupů a výstupů, které ovládají periferie a snímají senzory, je nutné zajistit komunikaci s ostatními zařízeními na vozidle. Propojení všech jednotek na formuli pomocí datových sběrnic je znázorněno na Obr.2.2.



Obr. 2.2: Rozložení sběrnic (pro lepší čitelnost viz. příloha C)

## CAN

Řídicí jednotka je pomyslným srdcem celého auta, má na starosti komunikaci s ostatními zařízeními, tato komunikace probíhá téměř výhradně pomocí CAN sběrnice. Těch je na formuli několik; základní sběrnice má na starosti komunikaci, která není kritická, to znamená, že při chybě se neohrozí funkčnost vozidla a bude schopno, i když s například nižším výkonem, dojet závod a získat tak body.

Druhá CAN sběrnice je kritická pro chod formule, k této sběrnici je připojena jednotka hlídání stavu baterie, která má na starosti spínání vysokého napětí a zajišťuje bezpečnost bateriových článků. K této sběrnici je také připojena pedálová jednotka, která převádí analogový signál ze senzorů na plynovém a brzdovém pedálu na digitální za účelem potlačení šumu. Třetí CAN sběrnice slouží z bezpečnostních důvodů pouze pro komunikaci mezi řídicí jednotkou auta a měničem, který přímo řídí výkon motorů.

## RS232

Kromě těchto zařízení potřebuje řídicí jednotka získávat data i z inerciální jednotky, která měří data jako zrychlení a náklon auta, tyto informace jsou nezbytné pro algoritmus řídicí přerozdělení výkonu jednotlivých motorů.

Inerciální jednotka na komunikaci využívá sériové rozhraní RS232 [8]. Tato komunikace bude také využita pro nastavování samotné řídicí jednotky a pro sledování dat při ladění systémů.

### 2.1.4 Shrnutí požadavků

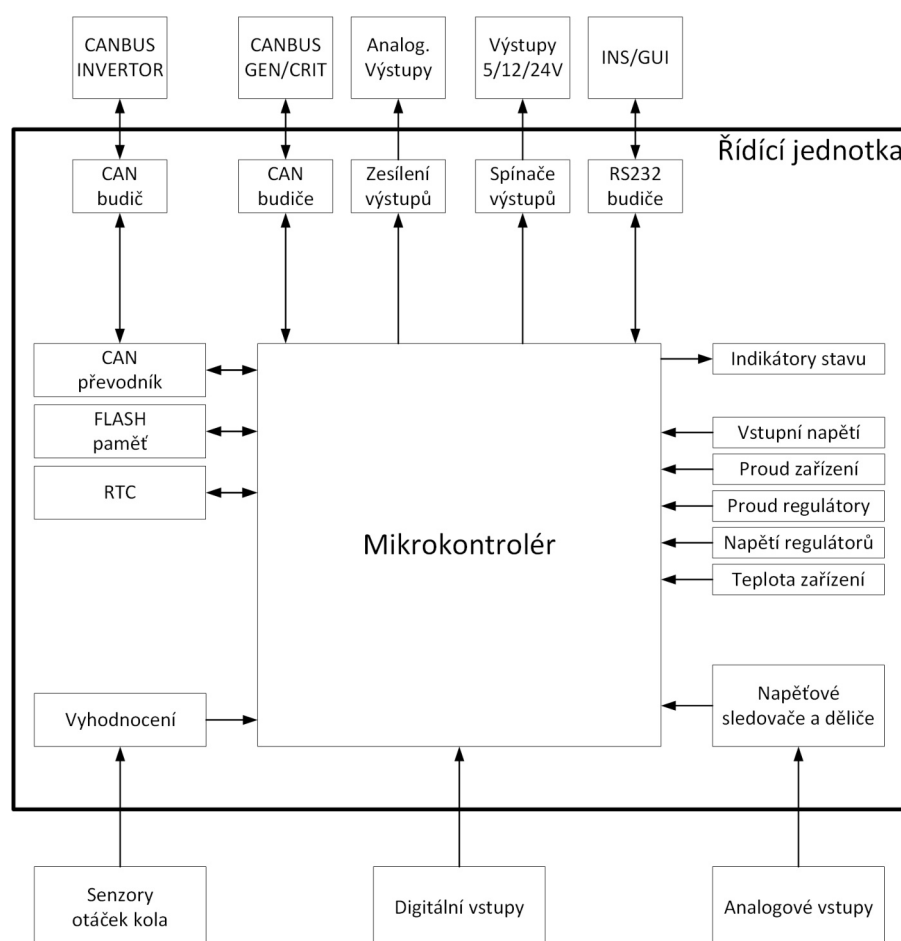
Řídicí jednotka je důležitou součástí auta, ovládá většinu periférií, stará se o bezpečnost pilota formule a zajišťuje běh systémů kritických pro chod vozidla. Proto jsou na tuto jednotku kladeny vysoké nároky tykající se ochrany proti poškození vstupů i výstupů. Řídicí jednotka musí také pracovat v širokém teplotním rozsahu.

Z těchto požadavků se jako nejdůležitější jeví, aby byla jednotka robustní a odolná vůči tvrdému zacházení, ke kterému během sezóny na testování, a hlavně v stresujícím prostředí na závodech dochází. Tyto situace často vedou k chybám, a proto musí být každý vstup a výstup chráněn, tak aby nedošlo k permanentnímu poškození jednotky, nebo zařízení k ní připojenému.

Tab. 2.1: Shrnutí vstupů a výstupů

Kategorie	Druh	Počet	Požadavky
Vstup	Senzor otáček kola	4	12 V kompatibilní
Vstup	Digitální	4	24 V kompatibilní
Vstup	Analogový	6	12 V kompatibilní
Výstup	Výkonový	3	24 V
Výstup	Výkonový	2	12 V
Výstup	Výkonový	1	5 V
Výstup	Digitální	4	5 V
Výstup	Analogový	2	10 V
Komunikace	CAN	3	1 Mbit/s
Komunikace	RS232	2	250 kbit/s

Potřebné vstupy, výstupy a komunikační rozhraní jsou shrnuty v tabulce 2.1. Celková logika řídicí jednotky je zobrazena na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Blokova schéma jednotky

## 3 Výběr součástek

Vzhledem k daným požadavkům shrnutým v předchozí kapitole, je důležité vybrat vhodné součástky, které jim budou vyhovovat.

### 3.1 Rezistory

Rezistor je spolu s kondenzátory a cívkami základní stavební jednotkou elektrických obvodů, na řídicí jednotce je použito přibližně 60, liší se v hodnotě jejich odporu, ve velikosti, která také částečně určuje i výkon, který jsou schopny vyzářit, v způsobu osazení na DPS, v přesnosti hodnoty odporu, teplotním koeficientu a spoustě dalších parametrů. Většina rezistorů použitých v návrhu je od výrobce Bourns® z řady CRT0603, jedná se o SMD rezistory o velikosti 0603. Tato řada byla zvolena, protože splňuje dané požadavky na vysoký teplotní rozsah, maximální pracovní napětí, nízký teplotní koeficient a malé rozměry [9].

Na DPS je použito několik speciálních rezistorů, které měří celkový proud tekoucí do jednotky a proud tekoucí z výstupů jednotlivých regulátorů napětí. Tyto rezistory se liší od řady CRT0603 v jejich velikosti, jmenovitém výkonu a relativně nízké hodnotě odporu.

### 3.2 Kondenzátory

Kondenzátor je elektronická součástka, jediným parametrem ideálního kondenzátoru je kapacita, při reálném kondenzátoru má ale na jeho vlastnosti v obvodu vliv i jeho parazitní parametry jako je zdánlivá indukčnost a zdánlivý odpor [10].

Kondenzátory se dělí podle použitého dielektrika na několik základních druhů [11]:

- vzduchový
- vakuový
- plastový
- papírový
- elektrolytický
- keramický

Každý z druhů kondenzátorů má specifické vlastnosti. Vzhledem k daným požadavkům na jednotku, jsou všechny použité kondenzátory keramické, ty jsou velmi spolehlivé, mají nízké ESR a v malých rozměrech dosahují velmi vysokých kapacit. Jejich hlavní nevýhodou je závislost kapacity na napětí a také na okolní teplotě [12].

Keramická dielektrika se následně dělí na množství tříd a jsou specifikovány trojicí znaků ve formátu písmeno-číslo-písmeno [13]:

- První znak určuje nejnižší teplotu, kterou kondenzátor vydrží. Například písmeno X znamená  $-55\text{ °C}$ .
- Druhý znak určuje maximální teplotu. Například 7, to znamená odolnost až do  $+125\text{ °C}$ .
- Třetí znak určuje maximální změnu kapacity v celém teplotním rozsahu. Například R znamená maximální odchylku kapacity  $\pm 15\%$ .

Tab. 3.1: Přehled keramických dielektrik

První znak	Minimální teplota [°C]	Druhý znak	Maximální teplota [°C]	Třetí znak	Maximální změna kapacity na tep. rozsahu [%]
<b>Z</b>	+10	<b>2</b>	+45	<b>C</b>	$\pm 2.2$
<b>Y</b>	-30	<b>4</b>	+65	<b>D</b>	$\pm 3.3$
<b>X</b>	-55	<b>5</b>	+85	<b>E</b>	$\pm 4.7$
		<b>6</b>	+105	<b>F</b>	$\pm 7.5$
		<b>7</b>	+125	<b>P</b>	$\pm 10$
		<b>8</b>	+150	<b>R</b>	$\pm 15$
		<b>9</b>	+200	<b>S</b>	$\pm 22$

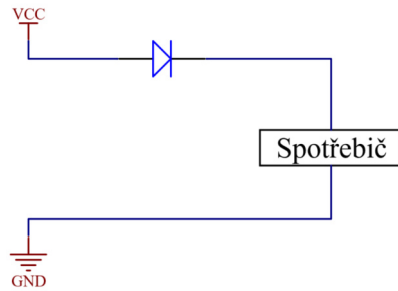
Při výběru kondenzátoru bylo důležité dbát na správné dimenzování s ohledem na pokles kapacity s teplotou a napětím. Za pomoci tabulky 3.1 a vzhledem na dané požadavky byl jako vhodný druh dielektrika zvolen typ X7R, splňuje potřebný teplotní rozsah a při vhodném volbě jmenovitého napětí kondenzátoru, nebude mít pokles kapacity při vyšším napětí významný vliv na obvod, je také široce dostupný.

### 3.3 Ochrana napájení

Jeden z hlavních požadavků na jednotku je odolnost vůči chybě napájení, konkrétně ochrana proti přepólování vstupu, tedy zapojení kladné větve zdroje na záporný pól jednotky a záporné na kladný pól.

#### 3.3.1 Sériová dioda

Jednoduchým řešením a způsobem, jak jednotku ochránit je zapojit diodu do série se vstupem napájení, toto zapojení je znázorněno na obr. 3.1. Dioda tak zabrání, aby proud tekla do spotřebiče (jednotky) [14].



Obr. 3.1: Ochrana sériovou diodu

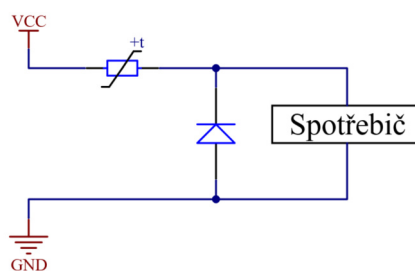
Nevýhodou tohoto zapojení je úbytek napětí na diodě, kde by při proudu, který jednotkou a jejími výstupy protéká vznikl velmi velký ztrátový výkon.

$$P_{ztrat} = U_{dioda} \cdot I_{jednotka} = 0.7 \text{ V} \cdot 30 \text{ A} = 21 \text{ W} \quad (3.1)$$

Dosažením běžného úbytku napětí na diodě  $U_{dioda}$  a proudu tekoucím jednotkou  $I_{jednotka}$  do rovnice 3.1 získáme hodnotu ztrátového výkonu  $P_{ztrat} = 21 \text{ W}$  na diodě. Tato hodnota je příliš velká a vyžadovala by komplikované řešení chlazení diody.

### 3.3.2 Paralelní dioda

Dalším možným řešením je zapojení diody paralelně a přidáním pojistky, toto zapojení znázorněno na obr. 3.2 zajistí snížení ztrátového výkonu, protože během normálního stavu diodou teče zanedbatelný proud. Při přepólování ale technicky dojde ke zkratu zdroje přes diodu a pojistku, pojistka následně vyhoří a tím se obvod ochrání [14].



Obr. 3.2: Ochrana paralelní diodu

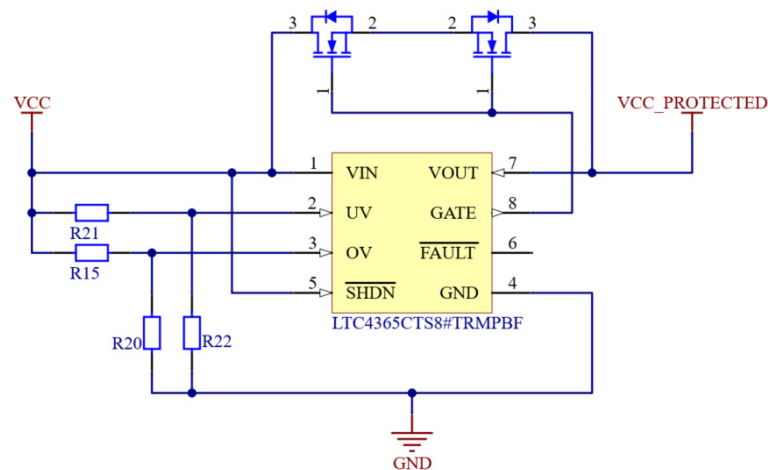
Toto zapojení je funkční a není potřeba ho chladit, ale při každém přepólování je nutné vyměnit pojistku, toto vzhledem k požadavkům na vodě odolnost jednotky je příliš pracné a pokud by tato situace nastala během závodů, tak by to znamenalo obrovské zdržení a mohlo by to mít za následek diskvalifikaci. V úvahu připadá vratná pojistka, ta se ale na potřebný proud a napětí nevyrábí.

### 3.3.3 Aktivní ochrana

Další možností ochrany je aktivní ochrana pomocí čipu, který je na toto použití přímo určený.

#### LTC4365

Jedním z nich je například LTC4365 od společnosti Analog Devices, jedná se o čip, který ochrání připojený obvod nejen před přepólováním napájení až do napětí -40 V, ale i před přepětím až do 60 V [16]. Příklad zapojení tohoto čipu je na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma zapojení čipu LTC4365

Hodnota podpětí se nastavuje pomocí napěťového děliče R21 a R22 připojeného do pinu UV, a hodnota přepětí se nastavuje pomocí napěťového děliče R15 a R20 připojeného do interního komparátoru s hysterezí přes pin OV. Čip je schopný chránit zařízení díky dvojici N-kanálových unipolárních tranzistorů zapojených antisériově.

Tento čip ale není schopen ochránit obvod proti zkratu, proto se většinou zapojuje do obvodu s vratnou pojistkou v sérii, ta ale s požadovanými hodnotami neexistuje. Proto byla ochrana vyřešena kombinací čipů LM74700 a LM5069 od společnosti Texas Instruments.

#### LM74700

LM74700 je kontrolér ideální diody, který pomocí externího N-kanálového unipolárního tranzistoru simuluje funkci diody, s minimálním úbytkem napětí. Tento čip tedy slouží pro ochranu jednotky proti přepólování vstupu [18][20].

## LM5069

LM5069 chrání jednotku proti podpětí, přepětí, zároveň také pomocí externího bočníku měří proud a je schopný při příliš vysokém proudu chráněný obvod odpojit a zamezit tak případnému poškození jednotky a připojených zařízení [19][20].

## 3.4 Regulátory napětí

Napěťový regulátor je systém navržený na stabilizování napětí na určitou konstantní hodnotu. Některé regulátory využívají na stabilizaci přímo vlastnosti elektronických součástek, nejčastěji rezistorů a diod, většina regulátorů ale udržuje výstupní napětí v povolené toleranci pomocí zpětnovazební smyčky [21].

Regulátory se podle jejich principu dělí na několik významných skupin [22]:

- parametrické regulátory,
- elektromechanické regulátory,
- regulátory střídavého napětí,
- aktivní regulátory,
  - lineární,
  - spínané.

Z pohledu této práce jsou důležité dva druhy regulátorů; spínané a lineární. Každý druh regulátorů má své výhody a nevýhody, v řídicí jednotce jsou využity oba tyto principy.

### 3.4.1 Lineární

Lineární regulátory napětí pracují na principu porovnávání žádané hodnoty napětí se skutečnou hodnotou výstupu. Jako akční prvek se používá tranzistor v zapojení emitorového sledovače. Stupeň otevření tranzistoru je většinou řízen proudem báze, který odpovídá odchylce od požadovaného napětí [25]. Výhodou lineárních regulátorů je velmi nízký šum na výstupu, ale obrovskou nevýhodou je jejich nízká efektivita, která znamená, že je nevhodné je použít ve výkonových aplikacích, protože by ztráty na regulátoru byly obrovské  $P_{ztrátový} = I_{výstup} \cdot (U_{vstup} - U_{výstup})$  [23].

Lineární regulátor je v řídicí jednotce použit na napájení citlivé mikrokontroleru a jeho periférií, pro toto použití byl zvolen regulátor TLS208D1EJV33 od firmy Infineon. Tento regulátor byl vybrán, protože obsahuje ochranné prvky jako proudové omezení, ochrana před přehřátím a také je schopný dodat dostatečný výstupní proud [26].

### 3.4.2 Spínané

Spínaný regulátor využívá spínacího prvku na velmi rychlé pulzování výstupu, který je následně vyhlazený pomocí LC filtru. Protože je spínací prvek plně otevřen nebo zavřen, jsou ztráty na něm velmi nízké ( $P_{ztrátový} = R_{mosfet(ZAP)} \cdot I_{výstup} \cdot \frac{U_{výstup}}{U_{vstup}}$ ). Nevýhodou spínaného regulátor je komplexita obvodu, většina regulátorů vyžaduje externí připojení induktoru fungující jako úložiště energie, diody, kondenzátorů na vyhlazení výstupu a častokrát i samotného spínacího prvku [27].

Na napěťové větve jednotky, kde je potřeba dodat velký výstupní proud, byl zvolen spínaný regulátor TPS5450 od společnosti Texas Instruments. Jeho výběr, simulace a nastavení je popsáno v kapitole 4.2.1.

### 3.4.3 Shrnutí

Lineární regulátor je vhodné použít v případě, že není potřeba velký výstupní proud a vstupní napětí se velmi neliší od výstupního a také v případě, že je potřeba aby byl výstup téměř bez šumu. Při nízkém výkonu jsou lineární regulátory levnější, méně komplexní a zabírají v porovnání se spínanými méně místa na DPS [23].

Spínaný regulátor je vhodné použít v případě, že je potřeba z výstupu napájet výkonné zařízení. Tento druh regulátoru zajistí velmi nízké ztráty, je proto ideální volbou při napájení zařízení z baterie. Spínané regulátory jsou schopny výstupní napětí nejen snižovat, ale i zvyšovat.

V některých situacích je vhodná kombinace obou druhů regulátorů, spínaný regulátor na snížení vysokého napětí na nižší, blízké požadovanému a následné doregulování napětí na danou hodnotu pomocí lineárního regulátoru.

V tabulce 3.2 je shrnuto porovnání základní vlastností lineárních a spínaných regulátorů.

Tab. 3.2: Porovnání lineárních a spínaných regulátorů

-	Lineární regulátor	Spínaný regulátor
<b>Složitost</b>	Jednoduchý	Složitý
<b>Efektivita</b>	Nízká	Vysoká
<b>Šum</b>	Nízký	Vysoký
<b>Počet součástek</b>	Nízký	Vysoký

## 3.5 Mikrokontroler

Mikrokontroler je jednou z hlavních součástí řídicí jednotky, stará se o ovládání výstupních periférií, snímání a měření vstupů, komunikaci s ostatními zařízení a také na něm běží složité algoritmy pro přerozdělení výkonu motorů. Z důvodu bezpečnosti programu a zamezení vzniku možných chyb je oddělen program řídicí motoru od programu řídicího periferie. Zvolen byl tedy dvoujádrový procesor z řady STM32H7, konkrétně STM32H745ZIT6, který umožňuje běh rozdílných programů na jednotlivých jádrech. Jedná se momentálně o jeden z nejvýkonnějších mikrokontrolerů se všemi potřebnými perifériemi od společnosti STMicroelectronics (12/2020).

Hlavní vlastnosti zvoleného mikrokontroleru [28]:

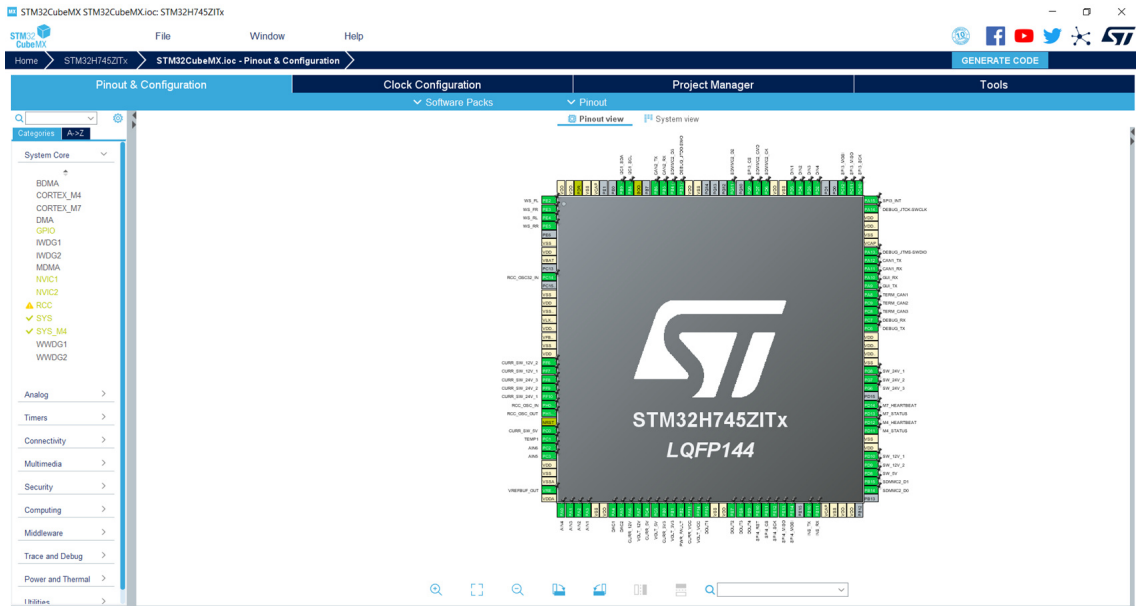
- Dvě nezávislá jádra
  - 32-bit Arm Cortex M7 taktované až na 480 MHz
  - 32-bit Arm Cortex M4 taktované až na 240 MHz
- 2MB Flash paměti
- 1MB RAM
- 2 řadiče CAN sběrnice
- 6 řadičů SPI sběrnice
- 4 řadiče IIC sběrnice
- 3 16-bit A/D převodníky
- 2 12-bit D/A převodníky
- 144-pin LQFP 20x20mm pouzdro

Výkonnější jádro Arm Cortex M7 bude využito na běh algoritmu trakční kontroly a přerozdělení výkonů do motorů, momentálně nebude jádro plně využito, ale v budoucnu bude model auta rozšířen o komplexní model pneumatik a další podsystémy jako je řízení zadní nápravy, nebo ovládání systému DRS na snížení odporu vzduchu.

Pomalejší jádro Arm Cortex M4 bude využito na snímání senzorů, ovládání výstupů a komunikaci s ostatními jednotkami.

### STM32CubeMX

Jednotlivé periferie, vstupy a výstupy se dají téměř volně přesouvat na různé vývody čipu. To umožňuje flexibilitu návrhu a je tak možné vytvořit logické seskupení vývodů, které ulehčí následný návrh DPS. K tomuto slouží nástroj STM32CubeMX, kde se dají jednotlivé výstupy pojmenovat a nástroj pomůže s určením vhodného pinu a zabrání kolizím periférií [29].

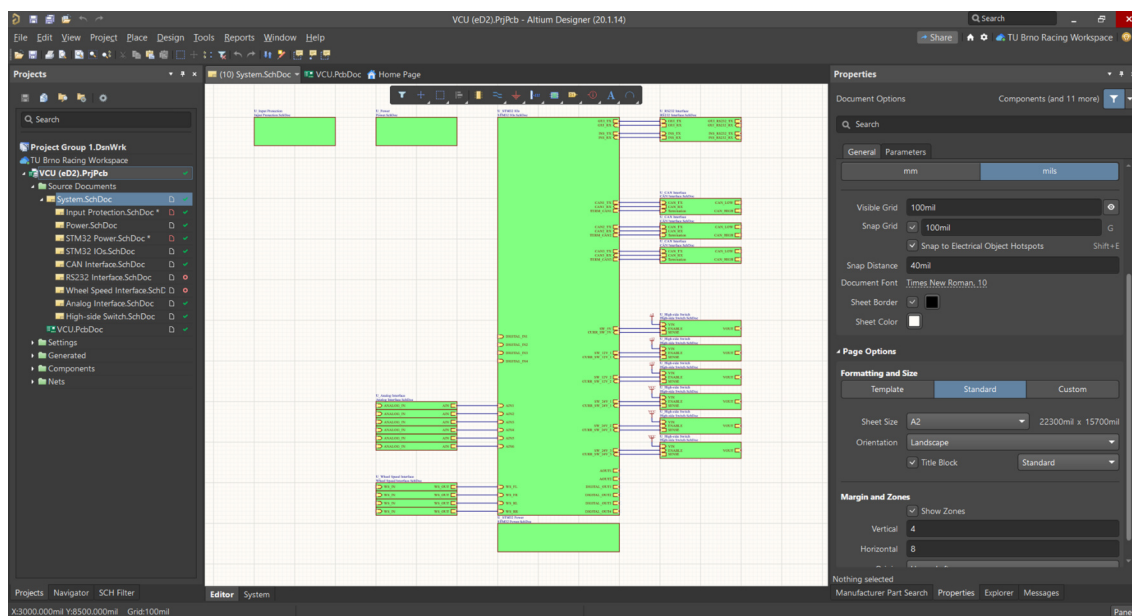


Obr. 3.4: Prostředí programu STM32CubeMX

Návrh rozdělení vstupů a výstupů v nástroji STM32CubeMX je zobrazeno na obr. 3.4, zelené piny na čipu značí využitý pin, z celkového počtu 144 pinů zůstalo nevyužitých pouze několik.

## 4 Návrh schémat

Na návrh schémat byl použit program Altium Designer 20 od společnosti Altium. Tento program umožňuje hierarchické seskupení schémat a tím zpřehlednění návrhu [30]. Cílem bylo vytvořit schéma, které bude snadné v budoucnu rozšiřovat o další vstupy a výstupy podle potřeby. Prostředí tohoto programu je ukázáno na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Prostředí programu Altium Designer 20

### 4.1 Ochrana napájení

Vzhledem k požadavkům je na ochranu napájení byly v kapitole 3.3.3 zvoleny čipy LM74700 a LM5069 od společnosti Texas Instruments.

#### 4.1.1 Konfigurace LM5069

Čip LM5069 má množství nastavitelných parametrů, je možné nastavit proudové omezení nebo maximální dovolený ztrátový výkon v externím spínacím prvku [19]. Všechny tyto funkce jsou nastavovány externími pasivními součástkami.

Po dosažení požadovaného proudového limitu  $I_{lim}$  do rovnice 4.1 je získán potřebný odpor bočnicku  $R_1$ .

$$R_1 = \frac{48.5 \text{ mV}}{I_{lim}} \quad (4.1)$$

$$R_1 = \frac{48.5 \text{ mV}}{35 \text{ A}} = 1.38 \text{ m}\Omega \doteq 1.5 \text{ m}\Omega$$

Z rovnice 4.2 po dosažení maximální vstupního napětí  $U_{inmax}$  a odporu bočnicku  $R_1$  je získáno minimální povolené omezení výkonu  $P_{lim}$ .

$$P_{lim} = \frac{5 \text{ mV} \cdot U_{inmax}}{R_1} \quad (4.2)$$

$$P_{lim} = \frac{5 \text{ mV} \cdot 30 \text{ V}}{1.5 \text{ m}\Omega} = 100 \text{ W}$$

Po dosažení přibližné výstupní kapacity  $C_{vystup}$  do rovnice 4.3 je možno vypočítat čas náběhu systému  $t_{start}$ .

$$t_{start} = \frac{C_{vystup}}{2} \cdot \left( \frac{U_{inmax}^2}{P_{lim}} + \frac{P_{lim}}{I_{lim}^2} \right) \quad (4.3)$$

$$t_{start} = \frac{500 \text{ }\mu\text{F}}{2} \cdot \left( \frac{30 \text{ A}^2}{100 \text{ W}} + \frac{100 \text{ W}}{35 \text{ A}^2} \right) = 2.27 \text{ ms}$$

Kondenzátor  $C_{13}$  nastavující časovač chyby je vypočítán dosažením doby náběhu  $t_{start}$  do rovnice 4.4. Výrobce doporučuje rezervu 50 %, kvůli možným nepřesnostem.

$$C_{13} = \frac{t_{start} \cdot 85 \text{ }\mu\text{A}}{4 \text{ V}} \cdot 1.5 \quad (4.4)$$

$$C_{13} = \frac{2.27 \text{ ms} \cdot 85 \text{ }\mu\text{A}}{4 \text{ V}} \cdot 1.5 = 48.23 \text{ nF} \doteq 56 \text{ nF}$$

Doba  $t_{fault}$  po kterou bude muset spínací prvek vydržet než LM5069 zareaguje na chybu je získána dosažením hodnoty časovacího kondenzátoru  $C_{13}$  do rovnice 4.5.

$$t_{fault} = \frac{C_{13} \cdot 4 \text{ V}}{85 \text{ }\mu\text{A}} = \frac{56 \text{ nF} \cdot 4 \text{ V}}{85 \text{ }\mu\text{A}} = 2.7 \text{ ms} \quad (4.5)$$

Proud  $I_{short}$  který bude při této situaci spínacím prvek téct je získán dosažením do rovnice 4.6.

$$I_{short} = \frac{P_{lim}}{U_{inmax}} = \frac{100 \text{ W}}{30 \text{ V}} = 3.33 \text{ A} \quad (4.6)$$

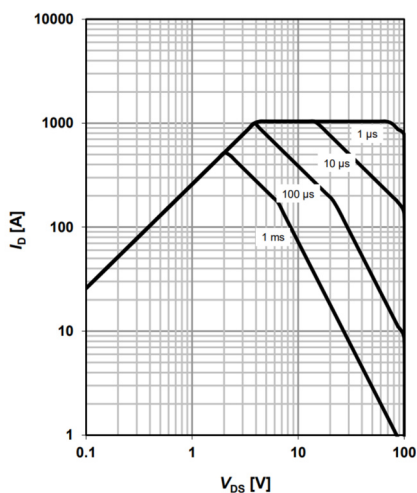
## Volba mosfetu

Z rovnic 4.5 a 4.6 vyplývají požadavky na spínací prvek. Skladová součástka je n-kanálový mosfet IAUT260N10S5N019 od společnosti Infineon Technologies. Důležité parametry toho mosfetu jsou shrnuty v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Parametry mosfetu IAUT260N10S5N019 [31]

$V_{DS}$	$R_{DSon}$	$I_D$	$T_j$
100 V	1.9 m $\Omega$	260 A	175 °C

Pro určení jestli je mosfet IAUT260N10S5N019 vhodný na dané použití je nutné ověřit, zda se bude pohybovat v jeho dovoleném pásmu (SOA), toto pásmo je znázorěno na obr. 4.2.



Obr. 4.2: SOA mosfetu IAUT260N10S5N019

Mosfet IAUT260N10S5N019 vydrží při napětí 30 V proud 100 A po dobu 1 ms a proud 8 A po dobu 0.1 ms. Proud, který daný mosfet vydrží po dobu chyby  $t_{fault}$  je extrapolován dosazením těchto proudů a časů do rovnic 4.7 až 4.10.

$$I_{SOA}(t) = a \cdot t^m \quad (4.7)$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{I_{SOA}(t_1)}{I_{SOA}(t_2)}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{100 \text{ A}}{8 \text{ A}}\right)}{\ln\left(\frac{0.1 \text{ ms}}{1 \text{ ms}}\right)} = -1.09 \quad (4.8)$$

$$a = \frac{I_{SOA}(t_1)}{t_1^m} = \frac{100 \text{ A}}{(0.1 \text{ ms})^{-1.09}} = 100 \text{ A} \cdot (0.1 \text{ ms})^{1.09} \quad (4.9)$$

$$I_{SOA}(2.7 \text{ ms}) = 100 \text{ A} \cdot (0.1 \text{ ms})^{1.09} \cdot (2.7 \text{ ms})^{-1.09} = 2.75 \text{ A} \quad (4.10)$$

Hodnota proudu  $I_{SOA}$  ovšem platí pro teplotu  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při teplotě, ve které se může jednotka pohybovat je nutné proud ještě snížit. Hodnota tohoto proudu  $I_{SOA(derate)}$  je získána dosazením  $I_{SOA}$  do rovnice 4.11.

$$I_{SOA(derate)} = I_{SOA} \cdot 0.8 = 2.75\text{ A} \cdot 0.7 = \mathbf{2.2\text{ A}} \quad (4.11)$$

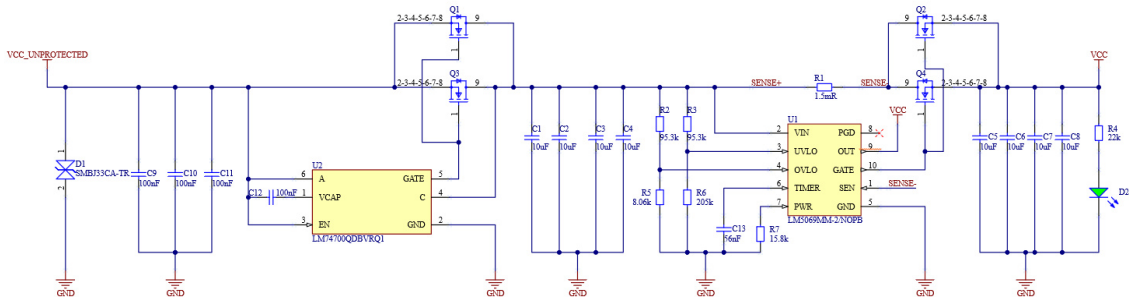
Maximální proud mosfetem  $I_{SOA(derate)}$  je tedy nižší než proud při chybové události  $I_{short}$ , proto jsou použity dva mosfety IAUT260N10S5N019 paralelně, tím se proud jedním mosfetem sníží přibližně o polovinu a splní tak požadavky.

## Přepětí a podpětí

Hodnota vypnutí při přepětí na vstupu se nastavuje pomocí externího napěťové děliče, jehož hodnoty jsou určeny z rovnice 4.12, ve které je zvolena i požadovaná hystereze, ta je identická jak na podpětí tak přepětí a to  $2\text{ V}$ . Stejný postup výpočtu je i pro hodnoty odporů nastavující podpětí.

$$R_3 = \frac{U_{inmaxH} - U_{inmaxL}}{21\ \mu\text{A}} = \frac{32\text{ V} - 30\text{ V}}{21\ \mu\text{A}} = 95238\ \Omega \doteq 95.3\text{ k}\Omega$$

$$R_5 = \frac{2.5\text{ V} \cdot R_3}{U_{inmaxH} - 2.5\text{ V}} = \frac{2.5\text{ V} \cdot 95300\ \Omega}{32\text{ V} - 2.5\text{ V}} = 8067\ \Omega \doteq 8.06\text{ k}\Omega \quad (4.12)$$

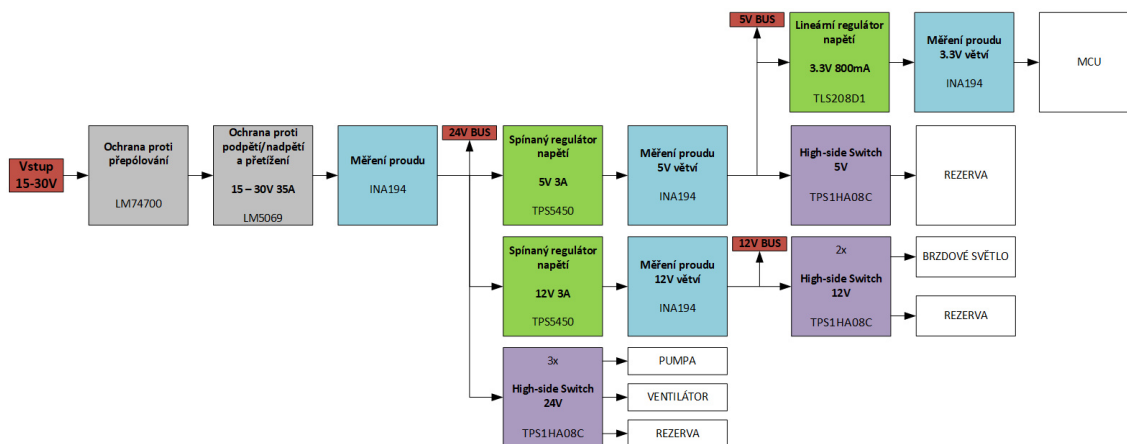


Obr. 4.3: Schéma zapojení vstupní ochrany jednotky

Finální verze zapojení je zobrazena na obr. 4.3, TVS dioda D1 na vstupu chrání LM74700 před napěťovými špičkami, indikační dioda D2 slouží na snadnější diagnostiku chyb. Paralelní zapojení kondenzátorů slouží na zvýšení kapacity a snížení celkového ESR, tyto kondenzátory vyhlazují napěťové špičky.

## 4.2 Regulátory napětí

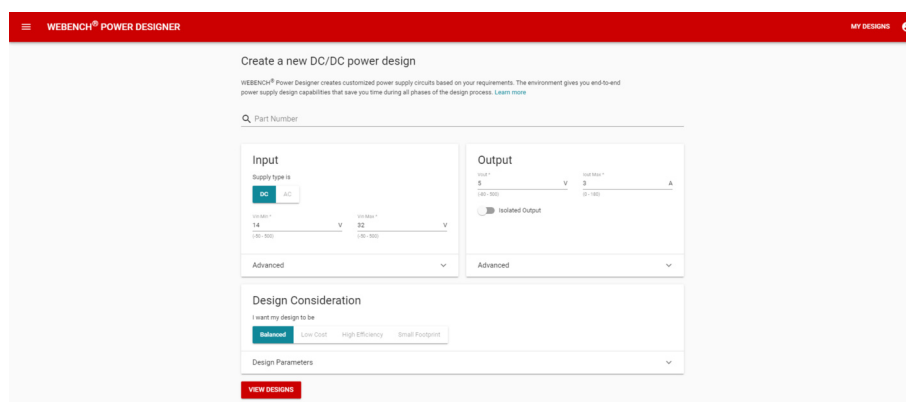
V této kapitole je popsán návrh regulátorů napětí podle daných požadavků na jejich výstupní proud, napětí a výstupní šum. Blokové schéma napájení řídicí jednotky je zobrazeno na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Blokové schéma napájení

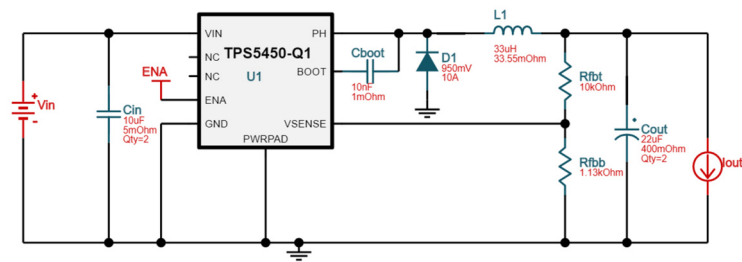
### 4.2.1 Spínané regulátory

V řídicí jednotce je potřebné regulovat vstupní napětí, které se pohybuje v rozsahu 15 – 30 V na tři napěťové větve, každá s jiným požadavkem na výstupní proud a použití. Návrh regulátoru není hlavním bodem této práce, proto je pro zjednodušení použit nástroj WEBENCH Power Designer od společnosti Texas Instruments, prostředí tohoto nástroje je zobrazeno na obr. 4.5. Tento nástroj po zadání okrajových podmínek nejen navrhne vhodný regulátor, ale umožní navržený obvod také simulovat [32].



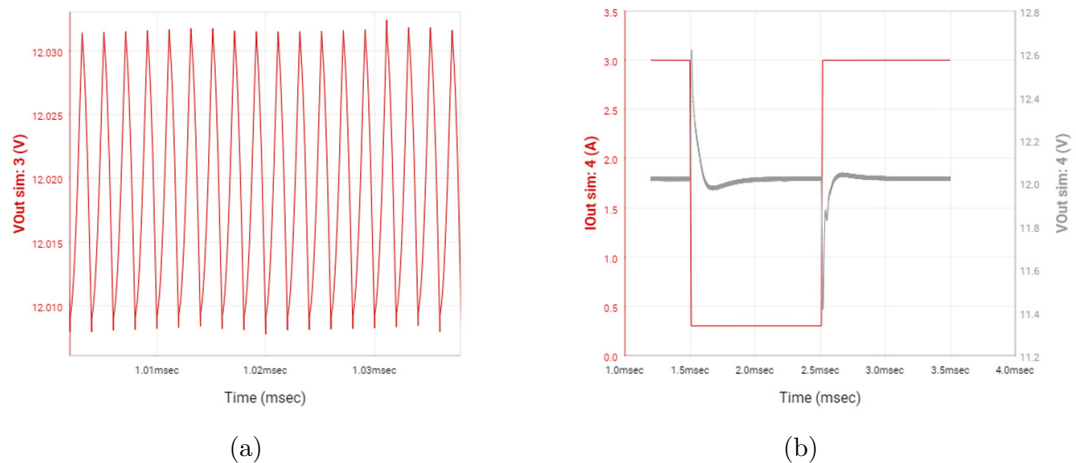
Obr. 4.5: Prostředí nástroje WEBENCH Power Designer

Po zadání okrajových podmínek nástroj WEBENCH Power Designer vygeneroval návrh spínaného regulátoru s čipem TPS5450, obr. 4.6, vzhledem na požadavky na jednotku byl návrh ještě upraven. Elektrolytické vstupní kondenzátory byli vyměněny za keramické typu X7R a výstupní cívka za nižší tak, aby vyhovovala požadavkům na rozměry jednotky.



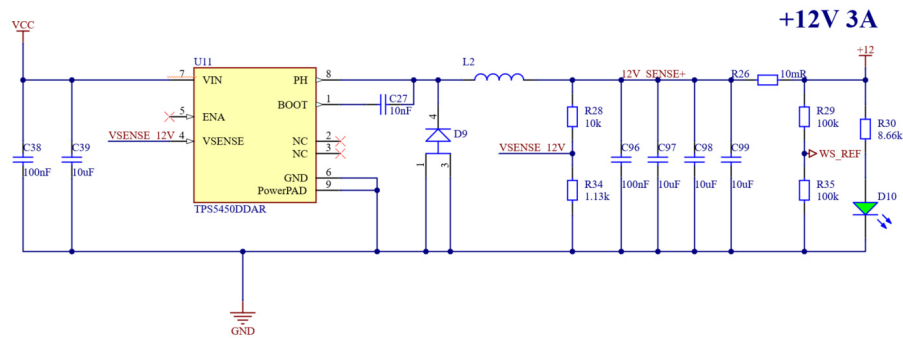
Obr. 4.6: Vygenerované zapojení TPS5450

Na upraveném návrhu regulátoru napětí byla přímo v nástroji provedena simulace ustáleného stavu a změny zátěže připojené na výstup regulátoru (250 mA – 3 A), výsledky jsou zobrazeny na obr. 4.7. Po dokončení DPS a osazení součástek byla simulace ověřena měřením.



Obr. 4.7: (a) Ustálený stav (b) Změna zátěže

Regulátor byl vložen do schémata řídicí jednotky, k návrhu byl přidán bočník na výstup regulátoru, z důvodu měření výstupního proudu a indikační dioda sloužící pro jednodušší diagnostiku regulátoru. Finální zapojení je na obr. 4.8.

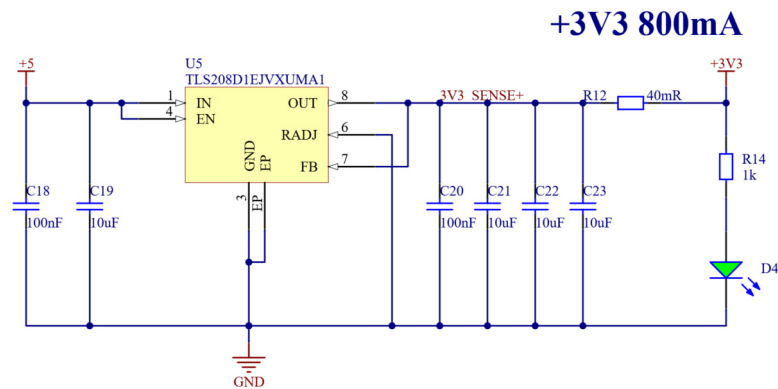


Obr. 4.8: Schéma zapojení spínaného regulátoru

Aby byl omezen počet různých druhů součástek, byl využit stejný regulátor na 5 V a 12 V větvi, liší se pouze hodnoty napěťového děliče, výstupní kapacity a indukčnosti výstupní cívky.

#### 4.2.2 Lineární regulátor

Regulátor na 3.3 V, který napájí mikrokontroler byl zvolen lineární. Vysoké vstupní napětí, by ale znamenalo jeho zbytečné zahřívání, proto je napájen z výstupu 5 V.



Obr. 4.9: Schéma zapojení lineárního regulátoru

## 4.3 Vstupy

Vstupy řídicí jednotky slouží k čtení stavu tlačítek na palubní desce, snímání senzorů a měření proudu.

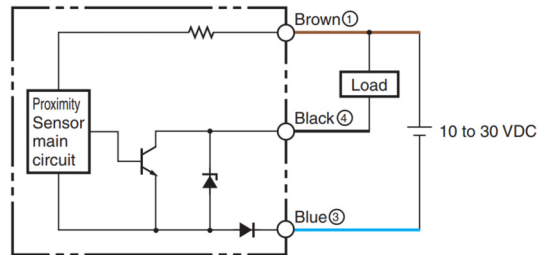
### 4.3.1 Sensory otáček kol

Otáčky kol jsou důležitý parametr při přerozdělování výkonu do motorů a jsou klíčové pro fungování algoritmu kontroly trakce. Pomocí dat z nich je jednotka schopna detekovat prokluz kol a dokáže na něj reagovat. Na autě jsou celkem čtyři snímače otáček kol, pracují na principu indukce, kde bezdotykově detekují přítomnost kovového materiálu. Na detekci je použit indukční snímač E2E-S05S12-WC-C1 od společnosti OMRON. Tento snímač je zobrazen na obr. 4.10.



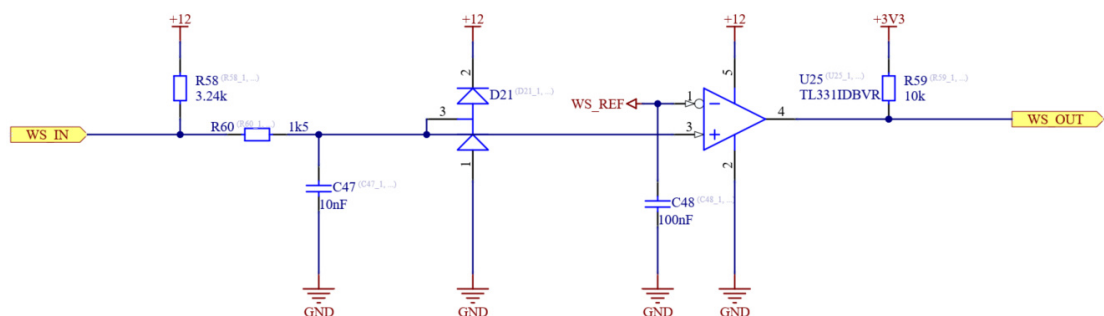
Obr. 4.10: Snímač E2E-S05S12-WC-C1

Použitý snímač má výstup typu NPN NO, to znamená, že je jako výstupní prvek použit NPN tranzistor, který je otevřený, když není na vstupu snímače detekovaný kovový materiál [33]. Aby bylo možné detekovat otáčky, je v jednotce připojen výstup snímače přes odpor na kladné napájení, výstup snímače je totiž typu otevřený kolektor. Na obr. 4.11 je zobrazeno interní zapojení tohoto snímače.



Obr. 4.11: Interní zapojení snímače E2E-S05S12-WC-C1

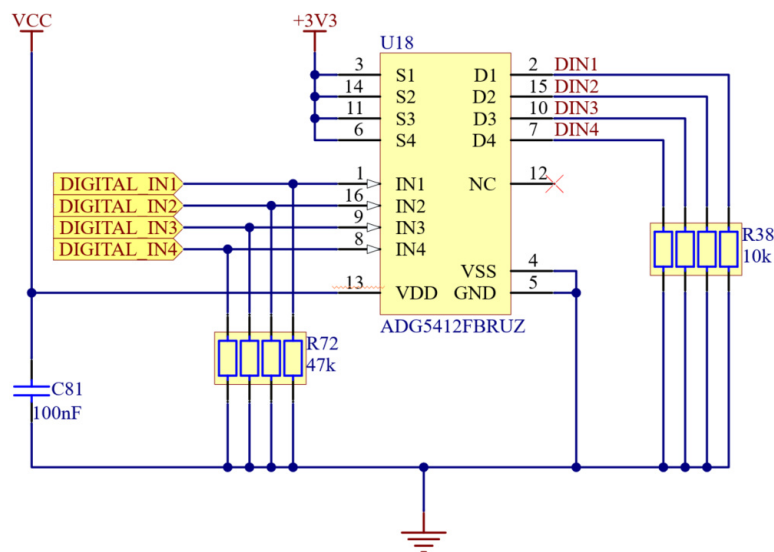
Vzhledem na požadavky kladené na jednotku je nutné zajistit ochranu všech vstupů viz. obr. 4.12, toho je docíleno přidáním sériového odporu R60, který v případě poruchy omezí proud dvojicí ochranných diod D21. Dioda připojena k zemi chrání před záporným napětím na vstupu a dioda připojena na 12 V větev chrání před napětím které by mohlo poškodit připojený komparátor. Komparátor U25 následně porovnává zašuměný signál z indukčního senzoru s referenčním napětím WSREF a vytváří tak obdélníkový signál s amplitudou 3.3 V, který je připojen do vstupu mikrokontroleru.



Obr. 4.12: Schéma zapojení vstupu snímače otáček kol

### 4.3.2 Digitální vstupy

Digitální vstupy slouží primárně k detekci stavu tlačítek a spínačů rozmístěných po celém autě. Jednoduchým řešením by bylo připojení těchto tlačítek přímo do mikrokontroleru, to by ale omezilo maximální napětí digitálních vstupů na 3.3 V popřípadě na 5V u pinů mikrokontroleru, které jsou 5 V tolerantní. Vstupní ochrana těchto signálů by také byla rozměrná a vyžadovala by velké množství diskretních součástek na každý kanál. Proto byl použit čip ADG5412F od společnosti Analog Devices. Který již integruje potřebnou vstupní ochranu pro čtyři vstupy v jednom čipu a umožňuje zapojit digitální vstupy i vyšších napětí [34].

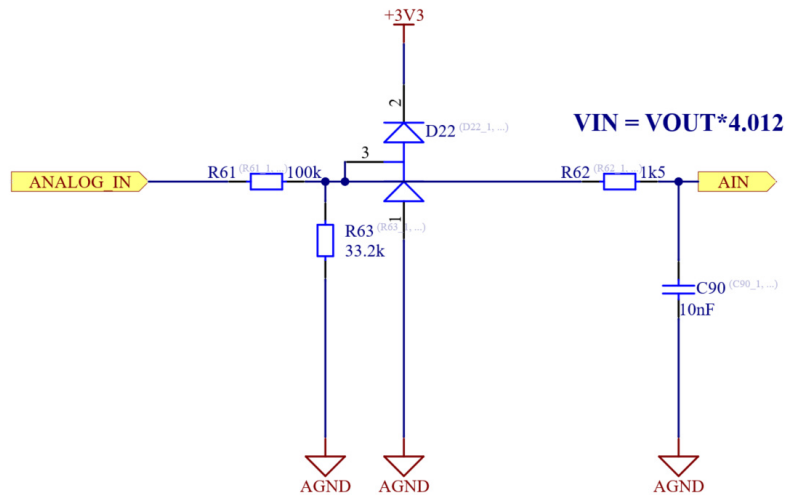


Obr. 4.13: Schéma zapojení digitálního vstupu

Schéma digitálního vstupu do řídicí jednotky je zobrazeno na obr. 4.13. Vstupní signál je přiveden do pinů IN1-4, tyto signály ovládají interní logiku a propojují S1-4 až D1-4. Mikrokontroler měří napětí na výstupu D1-4, tím detekuje stav vstupů. Pole odporů R72 slouží na ustálení stavu vstupů v případě, že není žádný vstupní spínač nebo tlačítko připojené do jednotky. Pole odporů R38 slouží na připojení vstupu mikrokontroleru k zemi v případě, že je S1-4 a D1-4 rozpojené.

### 4.3.3 Analogové vstupy

Analogový vstup je v jednotce používáný na měření výstupního napětí různých senzorů. Většina senzorů používaných na formuli má výstupní napětí v rozsahu od 0.5 V do 4.5 V. Některé speciální senzory, ale mají výstupní napětí až 10 V [35]. Vzhledem k požadavkům na jednotku musí být analogový vstup univerzální a schopný změřit širokou škálu různých senzorů.



Obr. 4.14: Schéma zapojení analogového vstupu

Schéma analogového vstupu do řídicí jednotky je zobrazena na obr. 4.14. Vstupní signál do jednotky je zapojen do napětového děliče skládajícího se z odporů R61 a R63, z důvodů snížení na napětí, které nepoškodí připojený A/D převodník v mikrokontroleru. Vzhledem k vysokému rozlišení 16/bitového A/D převodníku toto snížení nijak zásadně neovlivní měření a přesnost bude dostačující. Dvojitá dioda D22 chrání před přepětím a před záporným napětím vstupu. Tento signál je následně připojen do neinvertujícího pinu operačního zesilovače zapojeného jako napětový sledovač, tento zesilovač zajišťuje impedanční oddělení vstupního signálu od signálu připojeného do mikrokontroleru. Výstup operačního zesilovače je dále opatřen filtrem.

Z rovnice 4.13 pro výpočet mezní frekvence  $f_{mezní}$  [36] filtru typu dolní propust je vyjádřena žádaná hodnota odporu  $R_{62}$  rovnicí 4.14, do které je dosazen použitý kondenzátor  $C_{90}$ .

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.13)$$

$$R_{62} = \frac{1}{f \cdot 2\pi \cdot C_{90}} = \frac{1}{10 \text{ kHz} \cdot 2\pi \cdot 10 \text{ nF}} = 1591 \Omega \doteq 1.5 \text{ k}\Omega \quad (4.14)$$

Vzhledem ke zvolené mezní frekvenci  $f_{mezní}$  bude na maximální vzorkovací frekvenci A/D převodníku dostatečný útlum. Identický filtr je implementován na všech vstupech do mikrokontroleru, které měří napětí a proud.

#### 4.3.4 Měření proudu

Úbytek napětí na bočníku se pohybuje v řádech desítek mV, to je příliš nízké napětí pro přímé měření pomocí A/D převodníku v mikrokontroleru. Proto je potřebné ho zesílit, na to byl zvolen zesilovač INA194, ten zesiluje úbytek napětí na bočníku 50krát [38]. Maximální napětí na vstupu A/D převodníku je 3.3 V. Z těchto základních údajů a z maximálního proudu protékajícího větvemi je určen vhodný bočník.

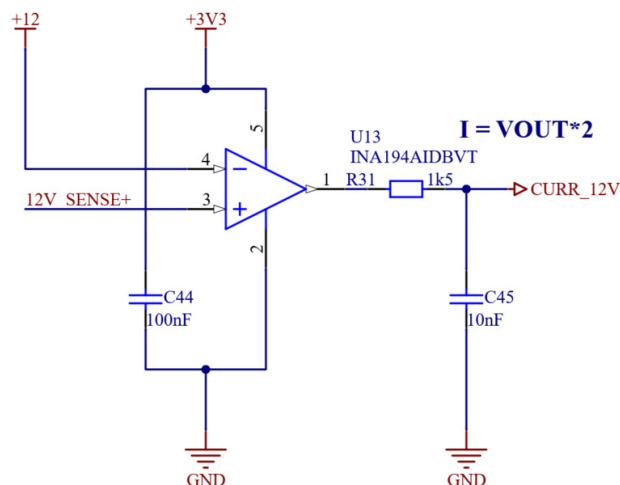
Parametry bočníku na měření proudu 12 V napájecí větve jsou získány dosažením zesílení  $G$ , potřebného proudového rozsahu s rezervou  $I_{sens(max)}$  a maximálního vstupního napětí A/D převodníku  $U_{ADC(max)}$  do rovnic 4.15 a 4.16.

$$R_{sens(12V)} = \frac{U_{ADC(max)}}{G \cdot I_{sens(max)}} = \frac{3.3 V}{50 \cdot 6 A} = 0.011 \Omega \doteq 10 m\Omega \quad (4.15)$$

$$P_{R_{sens(12V)}} = I_{sens(max)}^2 \cdot R_{sens(12V)} = (10 A)^2 \cdot 10 m\Omega = 0.36 W \quad (4.16)$$

Rezistor PCS1206DR0100ET od firmy Ohmite dané požadavky splňuje [39].

Výstup bočníku je přiveden do vstupu zesilovače INA194, který je napájený z 3.3 V větve. Výstup ze zesilovače je následně opatřen filtrem. Schéma měření proudu pomocí bočníku a zesilovače INA194 je na obr. 4.15.



Obr. 4.15: Schéma zapojení měření proudu

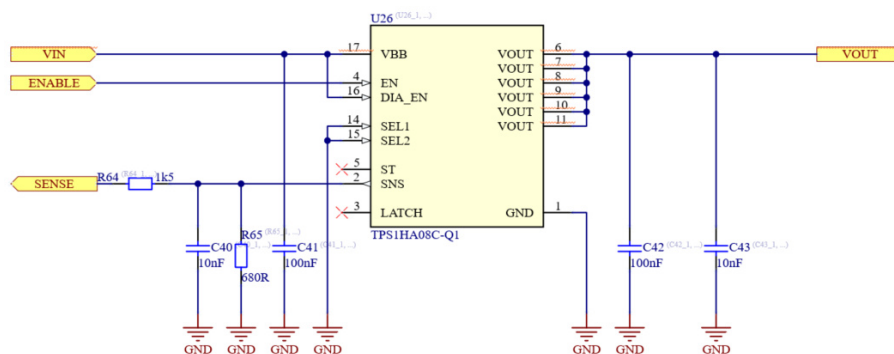
## 4.4 Výstupy

Výstupy z jednotky ovládají připojená zařízení, simulují senzory a indikují stav vozidla.

### 4.4.1 Výkonové spínače

Jednotka musí být schopná ovládat výkonné externí periferie jako je ventilátor na chlazení výměníku, čerpadlo zajišťující cirkulaci chladicí kapaliny nebo brzdové světlo. Jednoduchým řešením je spínání země pomocí tranzistoru. Toto řešení ale nespĺňuje požadavky na ochranu před zkratem výstupu. Ochrana výstupu a měření proudu, které je potřebné pro diagnostiku funkčnosti spínaných periférií by znamenalo zkomplikování schémata a celkově DPS. Proto byl použit čip TPS1HA08C, který integruje spínání napájení, chrání výstup před zkratem a zároveň měří proud výstupu, který je jednotka schopna číst [40].

Zapojení spínače v jednotce je na obr. 4.16. Čip je ovládaný digitálním signálem z mikrokontroleru, připojeným na pin 4 (EN), na pin 17 (VBB) je připojeno napájení které je spínáno, výstup spínače je na pinech 6-11 (VOUT). Piny 16 (DIAEN) a 14,15 (SEL1,2) nastavují diagnostický výstup, který mikrokontroler čte na pinu 2 (SNS).



Obr. 4.16: Schéma zapojení výkonového spínače

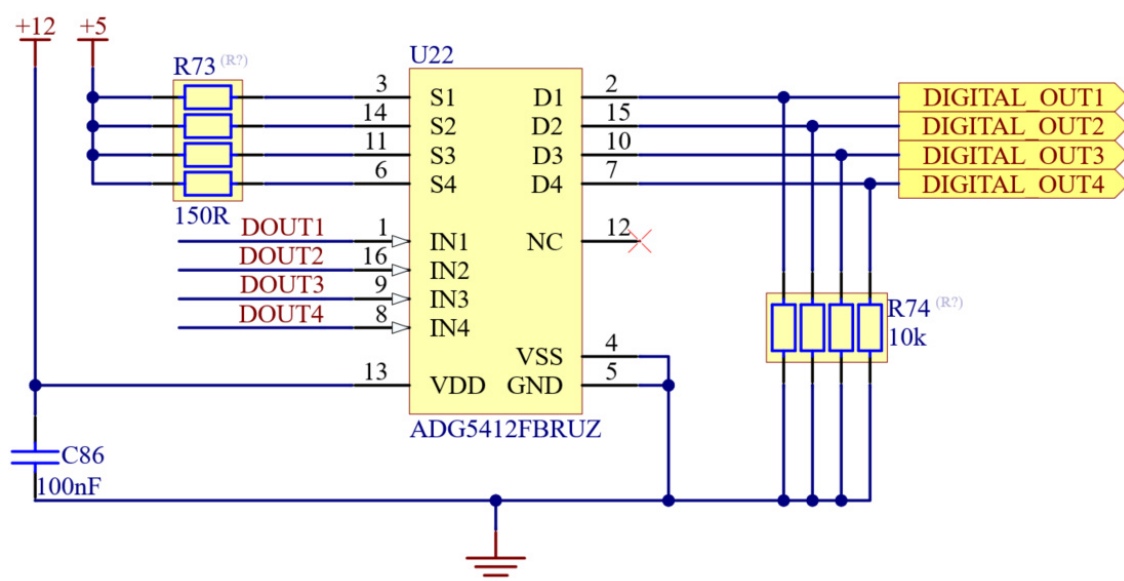
Rezistor R64 určuje napětí diagnostického výstupu. Je vypočítán dosazením maximálního vstupního napětí A/D převodníku  $U_{ADC(max)}$  do rovnice 4.17.

$$R_{65} = \frac{U_{ADC(max)} \cdot 0.9}{4.348 \text{ mA}} = 683 \Omega \doteq 680 \Omega \quad (4.17)$$

## 4.4.2 Digitální výstupy

Digitální výstup je použit primárně na indikaci stavu auta, na tyto výstupy jsou připojeny indikátory, které nejsou náročné na proud. Tyto výstupy se také používají na konfiguraci a spuštění měřicího zařízení dodávaného organizátory soutěže.

Výstup z mikrokontroleru má napětí maximálně 3.3 V, to je příliš nízké pro detekci logické 1 na některých zařízeních, proto je nutné toto napětí zvýšit. To se dá vyřešit diskrétně pomocí tranzistoru a několika pasivních prvků, spolu s potřebnou ochranou by se už počet součástek nahromadil a zabíral by velký prostor na DPS. V projektu je už použit čip ADG5412F, ten má potřebné ochrany integrované, proto je použit i v tomto případě.



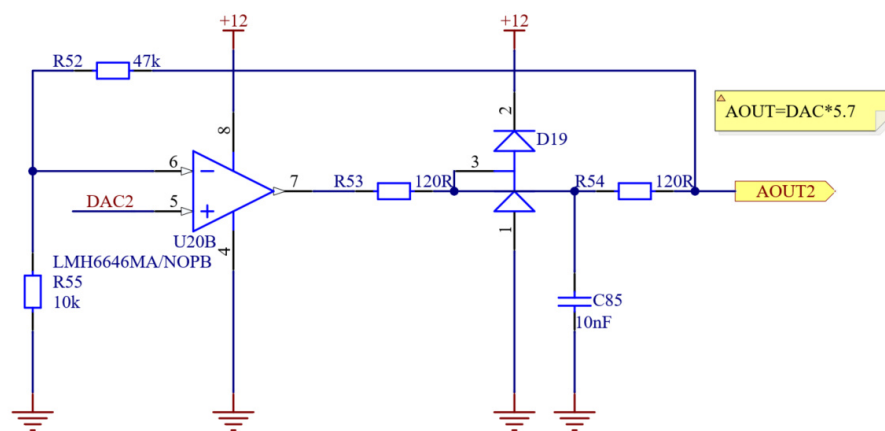
Obr. 4.17: Schéma zapojení digitálního výstupu

Schéma zapojení digitálního výstupu jednotky je na obr. 4.17. Digitální signál je přiveden z mikrokontroleru na vstupy IN1-4, které při log. 1 spojí S1-4 a D1-4, tím pádem bude napětí na výstupech DIGITALOUT1-4 přibližně rovno napětí na S1-4.

### 4.4.3 Analogové výstupy

Analogové výstupy slouží primárně na simulování senzorů při testování, ale vzhledem k širokému rozsahu výstupních napětí je možné je použít na napájení velmi citlivých snímačů, které jsou použity na formuli během testování a validace simulací aerodynamických prvků.

Integrovaný 12bitový D/A převodník v mikrokontroleru je schopný generovat analogové napětí od 0 do 1.8 V. Vzhledem k tomu, že většina senzorů má napěťový výstup do hodnoty 4.5 V, některé až do 10 V, je 1.8 V příliš nízká hodnota a výstupní napětí musí být násobeno operačním zesilovačem [28].



Obr. 4.18: Schéma zapojení analogového výstupu

Výstup z mikrokontroleru je přiveden na neinvertující vstup operačního zesilovače, na výstupu je rezistor R54 omezující výstupní proud ze zesilovače a také proud v případě chybného napětí na výstupu zesilovače, tato situace může nastat například při chybě v kabeláži. Schéma zapojení je na obr. 4.18.

Operační zesilovač je zapojen jako neinvertující a jeho zesílení se určuje pomocí rezistorů R52 a R55. Hodnota odporu R55 je získána dosazením hodnot R52 a požadovaného zesílení  $A_u$  do rovnice 4.19, která je odvozena ze vztahu 4.18 [41].

$$A_u = 1 + \frac{R_{52}}{R_{55}} \quad (4.18)$$

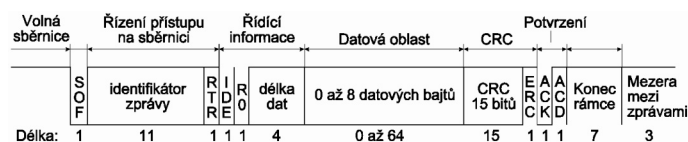
$$R_{55} = \frac{R_{52}}{A_u - 1} = \frac{470 \text{ k}\Omega}{5.7 - 1} = 100 \text{ k}\Omega \quad (4.19)$$

## 4.5 Komunikace

Kromě ovládání výstupů a čtení senzorů, jednotka komunikuje s dalšími zařízeními na monopostu.

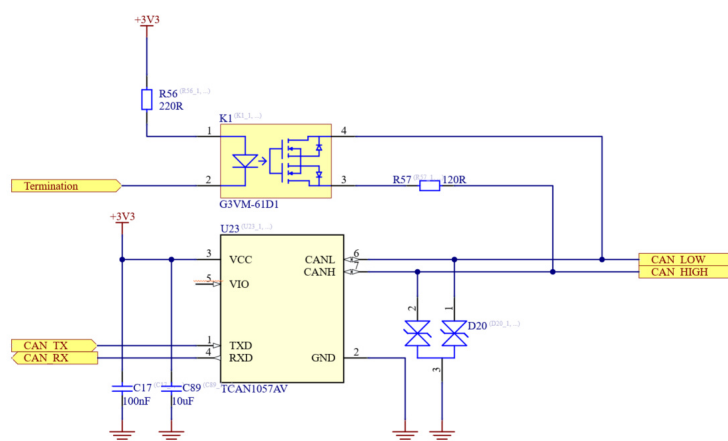
### 4.5.1 CAN

CAN sběrnice je sériová sběrnice široce využívaná v automobilovém a leteckém průmyslu. Je to velmi robustní způsob komunikace, který je odolný vůči rušení. Nový standard CAN FD umožňuje komunikaci o přenosové rychlosti až 5 Mbit/s. Kvůli kompatibilitě s dalšími zařízeními na sběrnici byl ale použit standard 2.0 B, který má maximální přenosovou rychlost 1 Mbit/s. Na obr.4.19 je zobrazen formát CAN zprávy standardu 2.0 B [42].



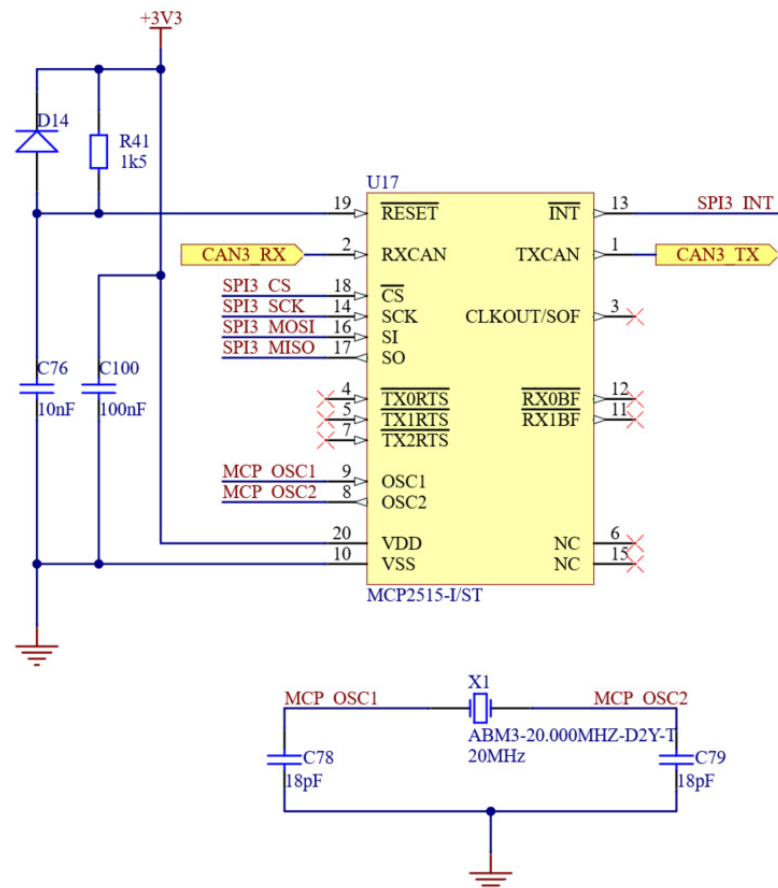
Obr. 4.19: Formát zprávy CAN 2.0B

Aby se zařízení mohlo připojit do CAN sběrnice musí být na každý řadič ještě připojen transceiver, který převede signály TXD a RXD z řadiče na signály CANH a CANL kompatibilní s CAN sběrnici. Použit byl miniaturní transceiver TCAN332G od firmy Texas Instruments pracující až na rychlosti 5Mbit/s. [44].



Obr. 4.20: Zapojení CAN transceiveru

CAN sběrnice potřebuje na obou koncích zakončovací odpor hodnoty 120 Ohmů. Vzhledem k požadavku na univerzálnost není pozice řídicí jednotky na sběrnici pevně daná, musí tedy být možné zakončovací odpor jednoduše připojit a odpojit pomocí signálu z mikrokontroleru. Na to bylo použito tranzistorové NO relé G3VM-61D1 od výrobce OMRON [45]. Schéma zapojení CAN transceiveru TCAN332G a relé je na obr. 4.20.

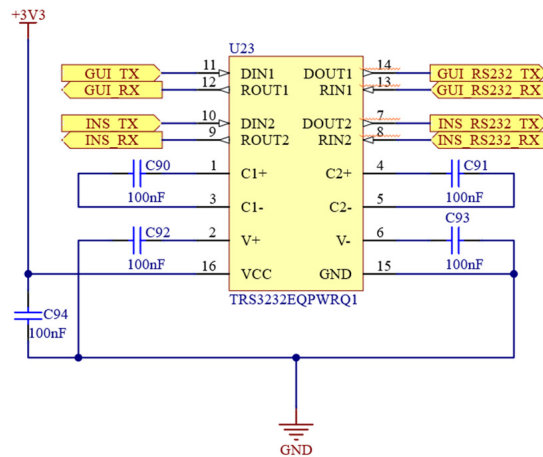


Obr. 4.21: Zapojení řadiče MCP2515

Aby zařízení mohlo komunikovat na CAN sběrnici, potřebuje mít integrovaný nebo externí CAN řadič. Použitý mikrokontroler má tyto řadiče dva [28]. Jednotka ale potřebuje komunikovat na třech nezávislých CAN sběrnících, byl proto přidán externí CAN řadič MCP2515 od společnosti Texas Instruments, který s mikrokontrolerem komunikuje pomocí SPI sběrnice [43]. Zapojení tohoto řadiče je zobrazeno na obr. 4.21.

## 4.5.2 RS232

RS232 je standard sériové komunikace definovaný již v roce 1960, využívá se v průmyslu. Model INS jednotky, která je na formuli, komunikuje s řídicí jednotkou pomocí RS232 rozhraní. Toto rozhraní je použito i pro komunikaci s grafickým rozhraním řídicí jednotky, proto byl zvolen dvojitý transceiver TRS3232E-Q1 od společnosti Texas Instruments.

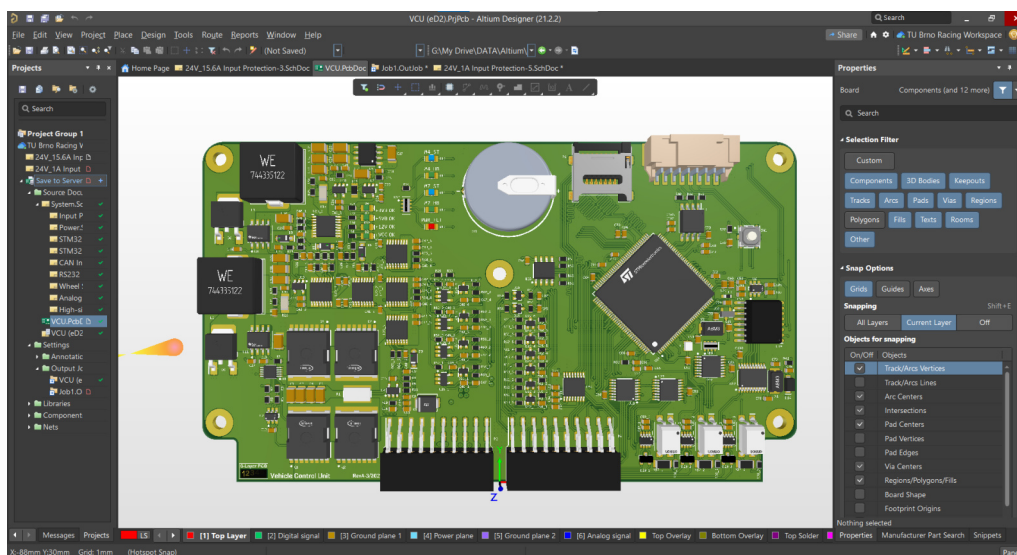


Obr. 4.22: Zapojení RS232 převodníku

Čip TRS3232E-Q1 již integruje potřebné ochrany, proto nejsou na obr. 4.22 přidáné žádné externí [46].

## 5 Návrh DPS

Na návrh DPS byl zvolen program Altium Designer 20 a jeho rozšíření Altium 365, umožňující centralizované cloudové uložení souborů, jednoduché verzování a také využití již existujících týmových knihoven součástek. Zároveň byli v tomto programu vygenerovány výrobní soubory a následně provedena i jejich kontrola před zadáním do výroby. Prostředí pro návrh DPS je rozložením podobné jako prostředí pro návrh schémat, ale s jinými funkcemi, náhled je zobrazen na Obr. 5.1.



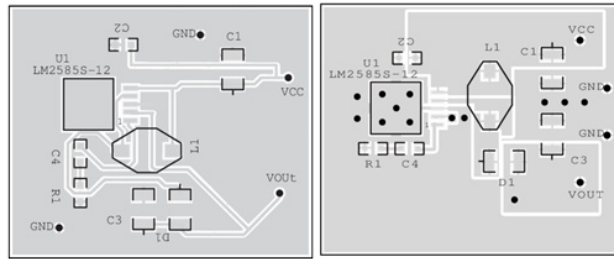
Obr. 5.1: Prostředí návrhu DPS

### 5.1 Rozložení DPS

Vzhledem k požadavkům na rozměry jednotky bylo nutné spojit na jednu DPS výkonovou část i část zpracovávající signály a starající se o komunikaci. Kvůli citlivosti analogové části, musel být během návrhu DPS kladen důraz na zachování signálové integrity. Toto bylo docíleno mimo jiného spojením výkonové a analogové země pouze v jednom bodě a tím zamezením vzniku zemních smyček.

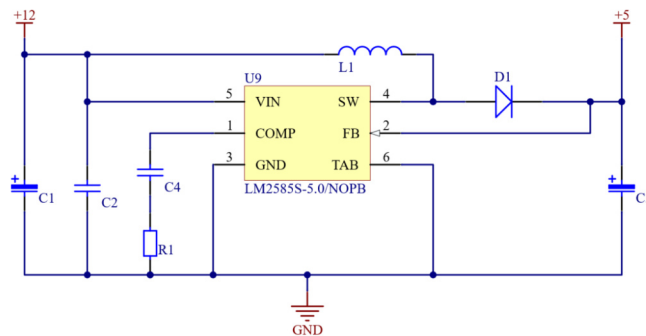
#### 5.1.1 Výkonová část

Na řídicí jednotce byly použity spínané zdroje, u kterých je nutné dodržet zásady pro omezení jejich elektromagnetického záření. Cílem bylo navrhnout rozmístění výkonových komponent (cívka, dioda, spínací prvek) tak, aby byly použity co nejkratší cesty s co nejnižší možnou parazitní indukčností. Zpětná vazba pro regulaci výstupního napětí je vedena mimo tyto prvky na opačné straně DPS a je také od výkonových prvků odstíněná celistvou vrstvou země.



Obr. 5.2: Návrhy DPS spínaného zdroje [15]

Na Obr. 5.2 jsou dvě verze rozložení prvků spínaného zdroje z Obr. 5.3 a jejich propojení. Na levé straně Obr. 5.2 je vidět nevhodné umístění cívky, příliš úzká šířka propojovacích cest a vedení zpětné vazby blízko spínacích prvků. Na pravé straně Obr. 5.2 jsou zásady návrhu spínaných zdrojů dodrženy.



Obr. 5.3: Schéma zapojení lineárního regulátoru

## 5.1.2 Analogová část

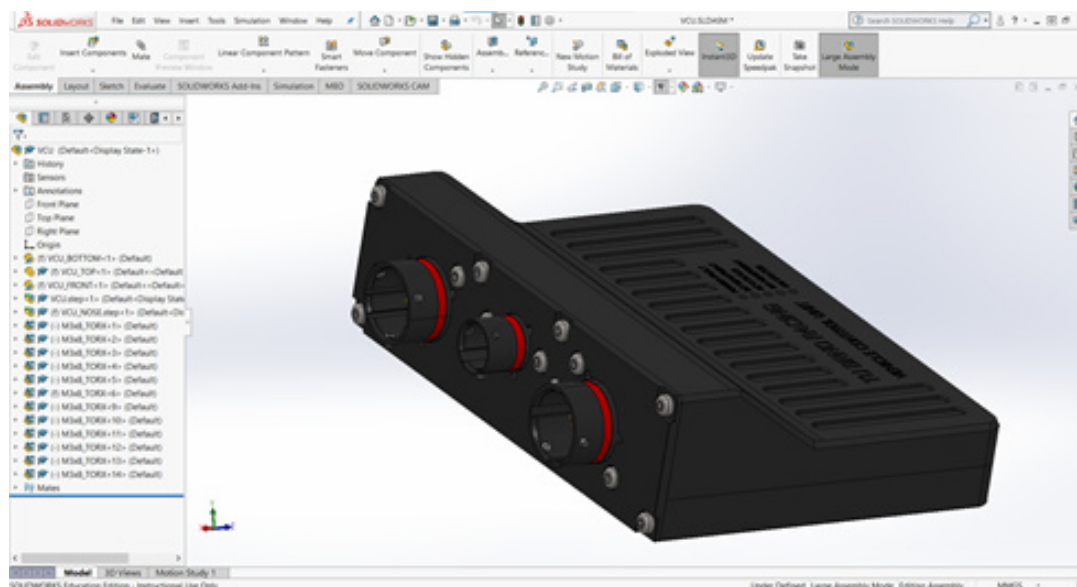
Při návrhu analogové části bylo nutné zajistit integritu citlivých signálů, důraz byl tedy kladen na dodržení co největší možné vzdálenosti od výkonové části a také na odstínění od digitálních, vedením na jiné vrstvě DPS a také minimálním počtem přechodů mezi jednotlivými vrstvami.

## 5.2 Rozložení vrstev

DPS byla původně navrhována na čtyři vrstvy, s postupným přidáváním funkcí a s ohledem na případné rušení mezi jednotlivými segmenty řídicí jednotky bylo nakonec zvoleno použití šesti vrstev. Díky tomuto rozhodnutí je jedna vnitřní vrstva téměř celistvá zem, odděluje tak analogové signály od digitálních. Horní vrstva slouží pro uchycení SMD součástek a jejich signálové propojení, vnitřní pro vedení napájení a zemí a spodní vrstva slouží pro vedení analogových signálů.

## 6 Obal jednotky

Obal řídicí jednotky byl navržen v programu Solidworks 2019, jedná se 3D CAD software vyvinut společností Dassault Systemes. Prostředí tohoto programu je zobrazeno na Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Prostředí Solidworks 2019

### 6.1 Návrh

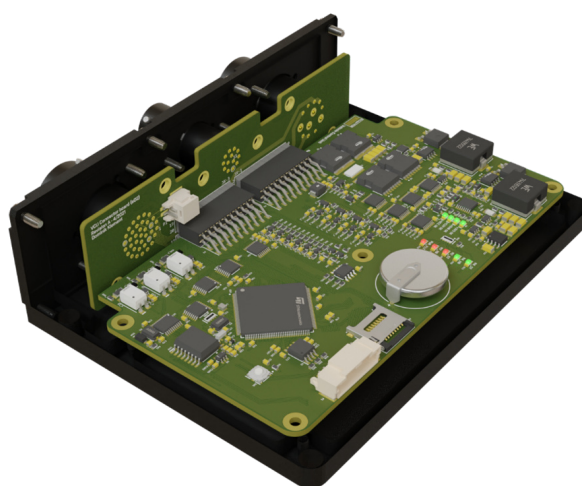
Do tohoto programu byly vloženy 3D modely DPS vyexportovaných z programu Altium Designer 20, pomocí nich byl následně obal vymodelován. Ten se skládá ze tří částí, spodní díl slouží pro uchycení DPS, k druhému dílu jsou uchyceny výstupní konektory a třetí díl slouží jako kryt a zároveň je žebrovaný, to umožňuje chladiť řídicí jednotku.



Obr. 6.2: Vizualizace řídicí jednotky

## 6.2 Výroba

Na jednotku jsou kladené vysoké požadavky na odolnost vůči mechanickému poškození, zároveň musí být jednotka vodotěsná. Z těchto důvodů byl obal vyfrézován z hliníkové slitiny EN AW 6061, ta poskytuje dostatečně dobré mechanické vlastnosti a zároveň se dobře obrábí. Tuto slitinu je možné eloxovat a změnit tak její vzhled. Všechny díly řídicí jednotky byly eloxovány do černé barvy. Na Obr. 6.2 je 3D vizualizace kompletní řídicí jednotky včetně obalu a výstupních konektorů.



Obr. 6.3: Vizualizace jednotky bez krytu

Na Obr. 6.3 je zobrazena vnitřní struktura řídicí jednotky, hlavní DPS a dceřiná DPS do které jsou zapájeny a uchyceny výstupní konektory a přední kryt.

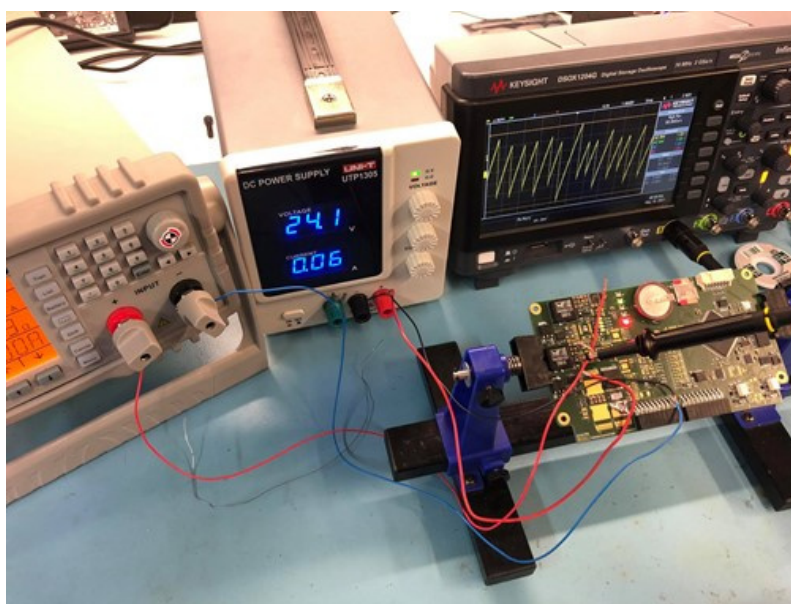


## 8 Implementace

Vzhledem k množství funkcí a celkové komplexnosti řídicí jednotky bylo nutné v implementaci a samotném ožívování postupovat systematicky a rozdělit ji na několik kroků. Řídicí jednotka se skládá z několika opakujících se bloků, proto bylo v první fázi testování dostačující osadit součástky například jednoho kanálu analogového vstupu. Tímto se v případě chyby a následné výrobě další revize řídicí jednotky předejde plýtváním součástí a zároveň se urychlí proces testování a implementace.

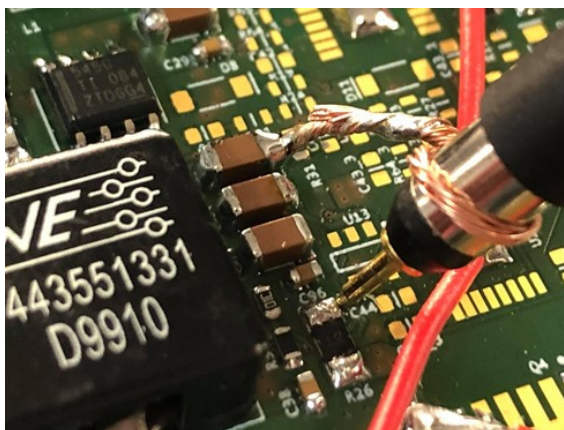
### 8.1 Validace simulací

V návrhové fázi byla vytvořena simulace regulátorů spínaného napětí, jedním z bodů této práce je ověření těchto simulací. K tomu byla použita elektronická zátěž Axiomet AX-EL600W, laboratorní zdroj UNI-T UTP1305 a čtyř kanálový osciloskop Keysight DSOX1204G. Měřící pracoviště je zobrazeno na Obr. 8.1.



Obr. 8.1: Měřící pracoviště

Pro zajištění minimálního ovlivnění měření externím šumem byla sonda osciloskopu připojena krátkým koaxiálním kabelem s nízkou impedancí a indukčností. Připojení reference sondy se díky tomu nechová jako anténa, detail tohoto připojení je zobrazen na Obr. 8.2. Sonda je umístěna v blízkosti výstupních filtračních kondenzátorů.

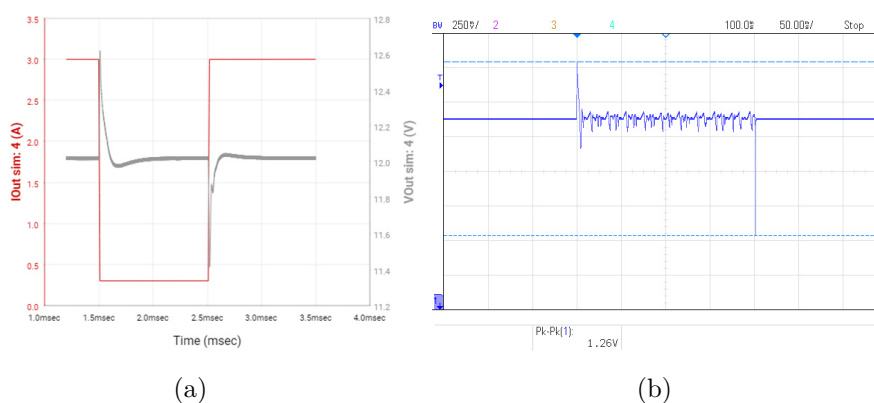


Obr. 8.2: Detail měření

Osciloskop byl nastaven na střídavé napětí, byla tedy odstraněna stejnosměrná složka výstupního napětí a porovnávána byla odchylka vrchol-vrchol. V následujících sekcích jsou porovnány simulace s naměřenými daty.

### 8.1.1 Změna zátěže

Na elektronické zátěži byl v případě měření skokové změny zátěže přepnut proud z 250 mA na 3 A a zpět. Elektronická zátěž byla připojena na napěťový výstup 12 V regulátoru napětí. Pomocí výstupní funkce osciloskopu byla elektronická zátěž spínána a následná změna na výstupu regulátoru byla zaznamenána do paměti osciloskopu.

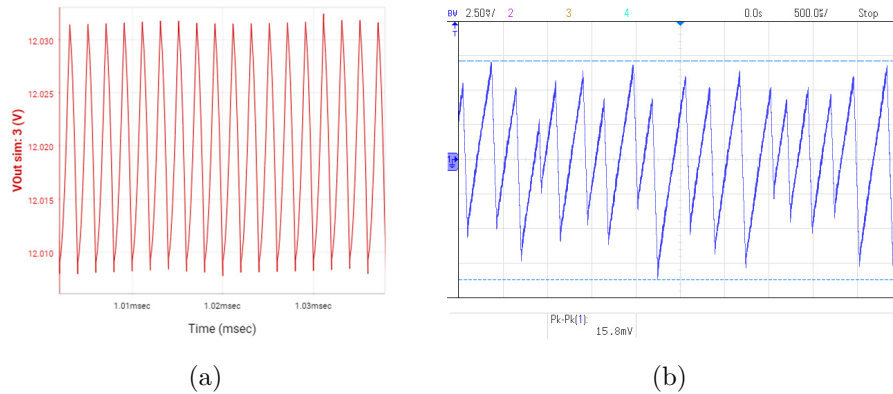


Obr. 8.3: Změna zátěže (a) Simulace (b) Měření

Na Obr. 8.3 je možné vidět porovnání průběhu simulace a měření reálného zapojení. Hodnota vrchol-vrchol výstupního napětí dosahovala v simulovaném prostředí až 1.3 V naměřená hodnota se pohybovala v rozmezí 1.23 až 1.35 V.

## 8.1.2 Ustálený stav

Ověření správnosti simulace ustáleného stavu napěťového regulátoru bylo změřeno stejným způsobem, elektronická zátěž byla ale nastavena na 100 mA, tak aby napěťový regulátor nepracoval naprázdno.



Obr. 8.4: Ustálený stav (a) Simulace (b) Měření

Na Obr. 8.4 je možné vidět porovnání průběhu simulace a měření reálného zapojení. Hodnota vrchol-vrchol dosahovala v simulovaném prostředí až 25 mV naměřená hodnota se pohybovala v rozmezí 16 až 18 mV.

## 8.2 Kabeláž

Pro implementaci a používání řídicí jednotky na autě bylo nutné vytvořit přehlednou tabulku všech vstupů a výstupů. Tato tabulka následně slouží při návrhu a výrobě kabelového svazku. Na Obr. 8.5 je tabulka popisující zapojení jednoho ze tří konektorů řídicí jednotky.

VCU2		Connector Manufacturer	Deutsch	Label		VCU2	
		Connector Type	13P AS Series - (Shell 10)				
		Product code	AS210-35PN	Deutsch			
		Boot	Straight	Mates with:		AS610-35SN	
Notes	VCU1						
Pin	Function	Label	Contact	Gauge	Colour	Shell	Destination
1	GND	VCU2-1	38943-22				
2	CAN3 HIGH	VCU2-2	38943-22				
3	CAN3 LOW	VCU2-3	38943-22				
4	VCC UNPROTECTED	VCU2-4	38943-22				
5	GUI RS232 RX	VCU2-5	38943-22				
6	GUI RS232 TX	VCU2-6	38943-22				
7	INS RS232 RX	VCU2-7	38943-22				
8	CAN1 HIGH	VCU2-8	38943-22				
9	CAN2 HIGH	VCU2-9	38943-22				
10	5V OUTPUT	VCU2-10	38943-22				
11	CAN2 LOW	VCU2-11	38943-22				
12	INS RS232 TX	VCU2-12	38943-22				
13	CAN1 LOW	VCU2-13	38943-22				

Obr. 8.5: Popis konektoru

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vyvinout robustní řídicí jednotku splňující přísné požadavky na ochranu vstupů a výstupů a schopnost pracovat v širokém teplotním rozsahu. Vzhledem k charakteru soutěže, kde se každým rokem vymění až 1/3 týmu a razantně se mění celkový koncept auta. Velký důraz byl kladen na univerzálnost řídicí jednotky. Jednotlivé funkční bloky jsou vytvořené jako moduly, které je možné jednoduše přidávat, odebírat a popřípadě upravovat. Vytvořeno bylo také blokové schéma napájení nové generace monopostu Formule Student Electric, které má za cíl zjednodušení výroby kabeláže a tak usnadnění diagnostiky chyb napájecích sběrnic.

Pro optimální volbu regulátorů napětí použitých na napájení sběrnic bylo nutné porovnat existující metody regulace napětí. Vlastnosti spínaných zdrojů jsou výhodné v situaci, kdy je nutné napájet jednotky jenž obsahují interní regulaci napětí a nejsou tak citlivé na rušení. Z tohoto důvodu byli použity pro 5 V a 12 V napájecí sběrnice. Tyto spínané regulátory byli odsimulované a následně byla tato simulace validována měřeními. Lineární regulátor napětí byl použit v řídicí jednotce na napájení interních komponent, jako jsou například operační zesilovače a mikrokontroler.

Vzhledem k požadované modularitě a univerzálnosti museli být vybrány vhodné komponenty tak, aby byli jednoduše dostupné u co nejvíce dodavatelů a nedocházelo tak k prodlevám. Toto bylo nutné dodržet i při návrhu univerzálního napájecího modulu použitého pro ostatní jednotky napájené ze sběrnic. Tento modul byl vytvořen za cílem usnadnění návrhu jednotek, umožňuje použití ověřeného bloku ochrany napájení a tím i zrychlení případné diagnostiky chyb.

Řídicí jednotka byla implementována v testovacím svazku, byly tak ověřeny všechny vstupní a výstupní funkce potřebné pro chod vozidla a také byla zprovozněna komunikace s ostatními jednotkami na sběrnicích. Ostrý test v prostředí podobném tomu na závodech bude dokončen během letního testování vozidla.

# Literatura

- [1] TU Brno Racing: *FORMULE STUDENT* [online]. 2020, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://tubrnoracing.cz/o-nas/formula-student/>> vc
- [2] VICOR: *DCM™ DC-DC Converter (Datasheet)* [online]. 2020, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <[http://www.vicorpower.com/documents/datasheets/DCM4623xD2H31E0y7z\\_ds.pdf](http://www.vicorpower.com/documents/datasheets/DCM4623xD2H31E0y7z_ds.pdf)>
- [3] Battery University: *BU-302: Series and Parallel Battery Configurations* [online]. 2019, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://cutt.ly/vjwaavM>>
- [4] Stepa: *Formáty papírů* [online], [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.stepa.cz/o-nas/technicka-data/formaty-papiru>>
- [5] Kristen Hall-Geisler: *How Electronic Stability Control Works* [online]. 11/2009, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://auto.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/electronic-stability-control.htm>>
- [6] Prokes-auto.cz: *Ventilátor SPAL univerzální sací 24V průměr 385mm VA18-BP70/LL-86A* [online], [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.prokes-auto.cz/ventilator-spal-univerzalni-saci-24v-prumer-385mm-va18-bp70-ll-86a/>>
- [7] Shenpeng: *Water Heater Pump P6078* [online], [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<http://www.spminipump.com/product/200.html>>
- [8] SBG Systems: *MINIATURE HIGH PERFORMANCE Inertial Sensors* [online]. 11/2020, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <[https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ellipse\\_Series\\_Leaflet.pdf](https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ellipse_Series_Leaflet.pdf)>
- [9] Bourns: *CRT Series - Thin Film Precision Chip Resistors (Datasheet)* [online], [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://cz.mouser.com/datasheet/2/54/CRT-1649066.pdf>>
- [10] Steve Guinta: *Ask The Applications Engineer-21: Capacitance And Capacitors* [online]. 04/1996, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/capacitance-and-capacitors.html>>
- [11] Michal Hřebíček: *Kondenzátory* [online]. 2008, [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <[http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke\\_soucastky/kondenzatory.html](http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/kondenzatory.html)>

- [12] Brian Brunette, AVX Corporation: *The Basics & Benefits of Tantalum & Ceramic Capacitors* [online]. 11/2020, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://passive-components.eu/the-basics-benefits-of-tantalum-ceramic-capacitors/>>
- [13] electronics notes: *Ceramic Capacitor: C0G, X7R, Y5V, NP0, etc* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/capacitors/ceramic-dielectric-types-c0g-x7r-z5u-y5v.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/capacitors/ceramic-dielectric-types-c0g-x7r-z5u-y5v.php)>
- [14] Michal Černý: *Základní zapojení – Ochrana proti přepólování napájení* [online]. 7/2015, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<http://robodoupe.cz/2015/zakladni-zapojeni-ochrana-proti-prepolovani-napajeni/>>
- [15] Texas Instruments: *AN-1149 Layout Guidelines for Switching Power Supplies* [online]. 09/2019, [cit. 21.5.2021]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/an/snva021c/snva021c.pdf?ts=1621577530384&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM2595](https://www.ti.com/lit/an/snva021c/snva021c.pdf?ts=1621577530384&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM2595)>
- [16] Analog Devices: *Overvoltage, Undervoltage and Reverse Supply Protection Controller LTC4365 (Datasheet)* [online]. 09/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC4365.pdf>>
- [17] Analog Devices: *100V UV/OV and Reverse Protection Controller with Bidirectional Circuit Breaker (Datasheet)* [online]. 09/2019, [cit. 21.5.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc4368.pdf>>
- [18] Texas Instruments: *LM74700-Q1 Low IQ Reverse Battery Protection Ideal Diode Controller (Datasheet)* [online]. 02/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm74700-q1.pdf?ts=1603049383355&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM74700-Q1](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm74700-q1.pdf?ts=1603049383355&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM74700-Q1)>
- [19] Texas Instruments: *LM5069 Positive High-Voltage Hot Swap and In-Rush Current Controller with Power Limiting (Datasheet)* [online]. 01/2020, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5069.pdf?ts=1603205018685&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM5069](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5069.pdf?ts=1603205018685&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM5069)>
- [20] Texas Instruments: *11 Ways to Protect Your Power Path* [online]. 2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/eb/slyy168/>>

- slyy168.pdf?ts=1609230877897&ref\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>
- [21] Analog Devices: *Understanding How a Voltage Regulator Works* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.analog.com/en/technical-articles/how-voltage-regulator-works.html>>
- [22] EL PRO CUS: *Basic Types of Voltage Stabilizers* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.elprocus.com/types-voltage-stabilizers-and-their-working/>>
- [23] Rich Nowakowski and Rober Taylor, Texas Instruments: *Linear versus switching regulators in industrial applications with a 24-V bus* [online]. 2013, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/an/slyt527/slyt527.pdf>>
- [24] Texas Instruments: *TPS5450-Q1 Automotive 5.5-V to 36-V, 5-A Buck Converter (Datasheet)* [online]. 6/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5450-q1.pdf?ts=1609148464131>>
- [25] Dave Knight: *Introduction to Linear Voltage Regulators* [online]. 2/2016, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-linear-voltage-regulators>>
- [26] Infineon Technologies: *TLS208D1 Linear Voltage Post Regulator (Datasheet)* [online]. 2/2015, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLS208D1-DS-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc1015969daf3894230](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLS208D1-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc1015969daf3894230)>
- [27] Electronics Tutorials: *Switch Mode Power Supply* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.electronics-tutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html>>
- [28] STMicroelectronics: *STM32H745xI/G (Datasheet)* [online]. 5/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h745zi.pdf>>
- [29] STMicroelectronics: *STM32CubeMX* [online]. 11/2020, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/stm32cubemx.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/stm32cubemx.pdf)>
- [30] Aleksander Tamari, Altium: *Using Hierarchical Schematic Design to Stay Organized and Synchronized* [online]. 2/2017, [cit.

- 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://resources.altium.com/p/using-hierarchical-design-to-stay-organized-and-synchronized>>
- [31] Infineon Technologies: *IAUT260N10S5N019 OptiMOS™-5 Power-Transistor (Datasheet)* [online]. 3/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IAUT260N10S5N019-DataSheet-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4625ee5d4cd015f2460488e3241](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IAUT260N10S5N019-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4625ee5d4cd015f2460488e3241)>
- [32] Texas Instruments: *WEBENCH® Power Designer* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://cutt.ly/2jwgNCA>>
- [33] OMRON: *Small-diameter Proximity Sensor E2E (Datasheet)* [online]. 5/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v6/d115\\_e2e\\_small-diameter\\_proximity\\_sensor\\_datasheet\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v6/d115_e2e_small-diameter_proximity_sensor_datasheet_en.pdf)>
- [34] Analog Devices: *ADG5412F/5413F (Datasheet)* [online]. 10/2017, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG5412F\\_5413F.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG5412F_5413F.pdf)>
- [35] SensorsONE: *TPSA PRECISION PRESSURE TRANSMITTER (Datasheet)* [online]. 01/2006, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://www.sensorsone.com/wp-content/uploads/2013/09/TPSA.pdf>>
- [36] Electronics Tutorial: *Passive Low Pass Filter* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html)>
- [37] EE Power: *Shunt resistor* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/shunt-resistor/>>
- [38] Texas Instruments: *INA19x Current Shunt Monitor -16 V to +80 V Common-Mode Range (Datasheet)* [online]. 1/2015, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina194.pdf?ts=1609165731546&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA194](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina194.pdf?ts=1609165731546&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA194)>
- [39] Ohmite: *PCS Series Low Resistance Value Chip Resistors (Datasheet)* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://cz.mouser.com/datasheet/2/303/res\\_pcs-1665423.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/303/res_pcs-1665423.pdf)>
- [40] Texas Instruments: *TPS1HA08-Q1, 40-V, 8-mOhm Single-Channel Smart High-Side Switch (Datasheet)* [online]. 12/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné

- z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps1ha08-q1.pdf?ts=1603050054814&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps1ha08-q1.pdf?ts=1603050054814&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>
- [41] Electronics notes: *Op Amp Non-Inverting Amplifier: Operational Amplifier Circuit* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.electronics-notes.com/articles/analogue\\_circuits/operational-amplifier-op-amp/non-inverting-amplifier.php](https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/operational-amplifier-op-amp/non-inverting-amplifier.php)>
- [42] Ing. Karel Polák: *Sběrnice CAN* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03021/index.html>>
- [43] Microchip: *MCP2515 Stand-Alone CAN Controller with SPI Interface (Datasheet)* [online]. 2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP2515-Stand-Alone-CAN-Controller-with-SPI-20001801J.pdf>>
- [44] Texas Instruments: *TCAN33x 3.3-V CAN Transceivers with CAN FD (Datasheet)* [online]. 11/2019, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcan337g.pdf?ts=1608732216041&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTCAN337G](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcan337g.pdf?ts=1608732216041&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTCAN337G)>
- [45] OMRON: *G3VM-61A1/D1 MOSFET Relays (Datasheet)* [online], [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://cz.mouser.com/datasheet/2/307/en-g3vm\\_61a1\\_d1-754332.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/307/en-g3vm_61a1_d1-754332.pdf)>
- [46] Texas Instruments: *TRS3232E-Q1 3-V TO 5.5-V MULTICHANNEL RS-232 LINE DRIVER/RECEIVER WITH ±15-kV IEC ESD PROTECTION (Datasheet)* [online]. 9/2009, [cit. 27.12.2020]. Dostupné z URL: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/trs3232e-q1.pdf?ts=1609234708947&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/trs3232e-q1.pdf?ts=1609234708947&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>

## Seznam symbolů a zkratek

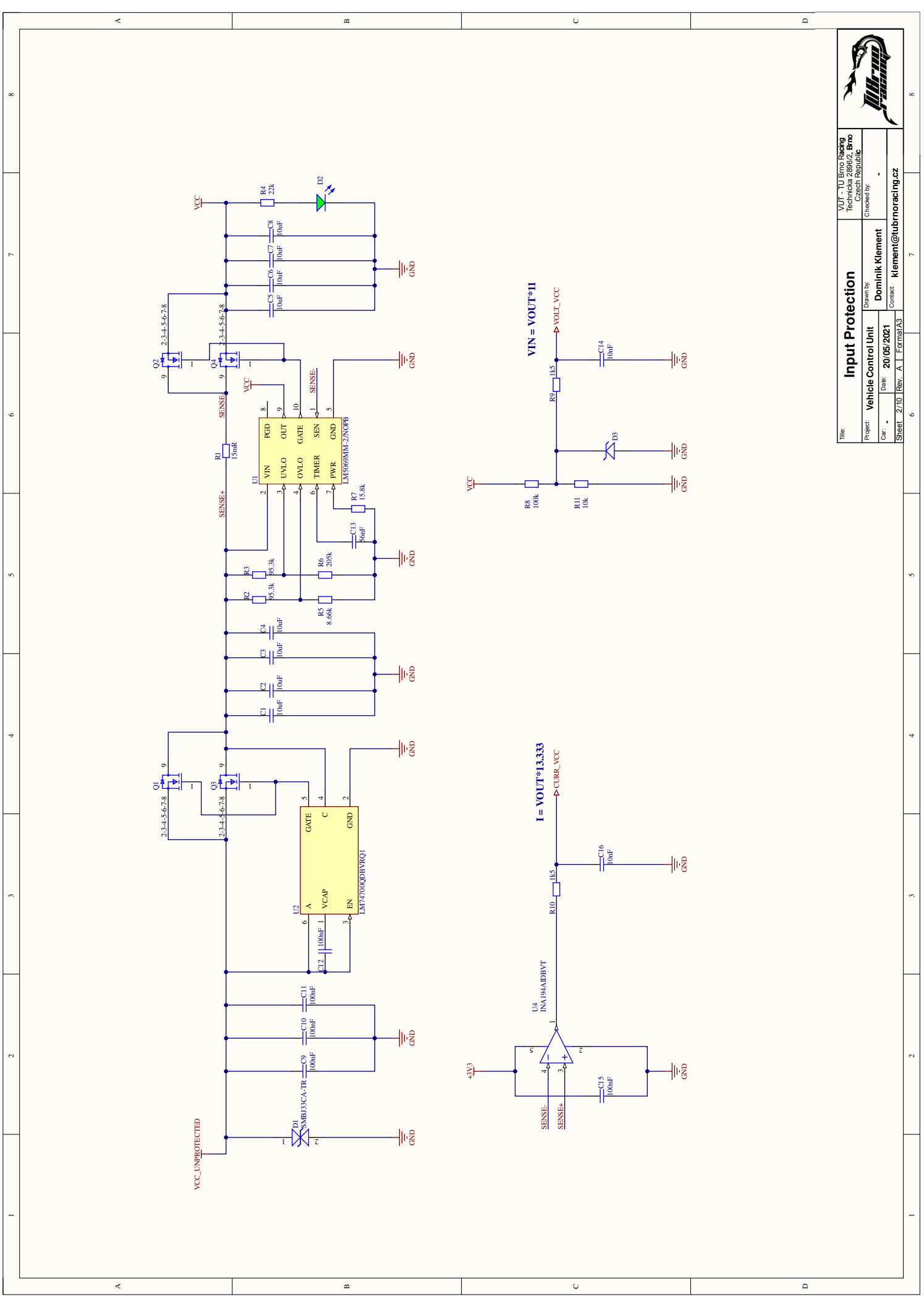
<b>A/D</b>	Analog - Digital
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>D/A</b>	Digital - Analog
<b>DPS</b>	Deska Plošných Spojů
<b>DRS</b>	Drag Reduction System
<b>ESP</b>	Elektronický Stabilizační Program
<b>ESR</b>	Equivalent Series Resistance
<b>FD</b>	Flexible Data-Rate
<b>HV</b>	High Voltage - Vysoké napětí
<b>INS</b>	Inerciální Navigační Systém
<b>NO</b>	Normally Open - Normálně otevřené
<b>SOA</b>	Safe Operating Area
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>TVS</b>	Transient Voltage Suppression
<b>VCU</b>	Vehicle Control Unit


# Seznam příloh

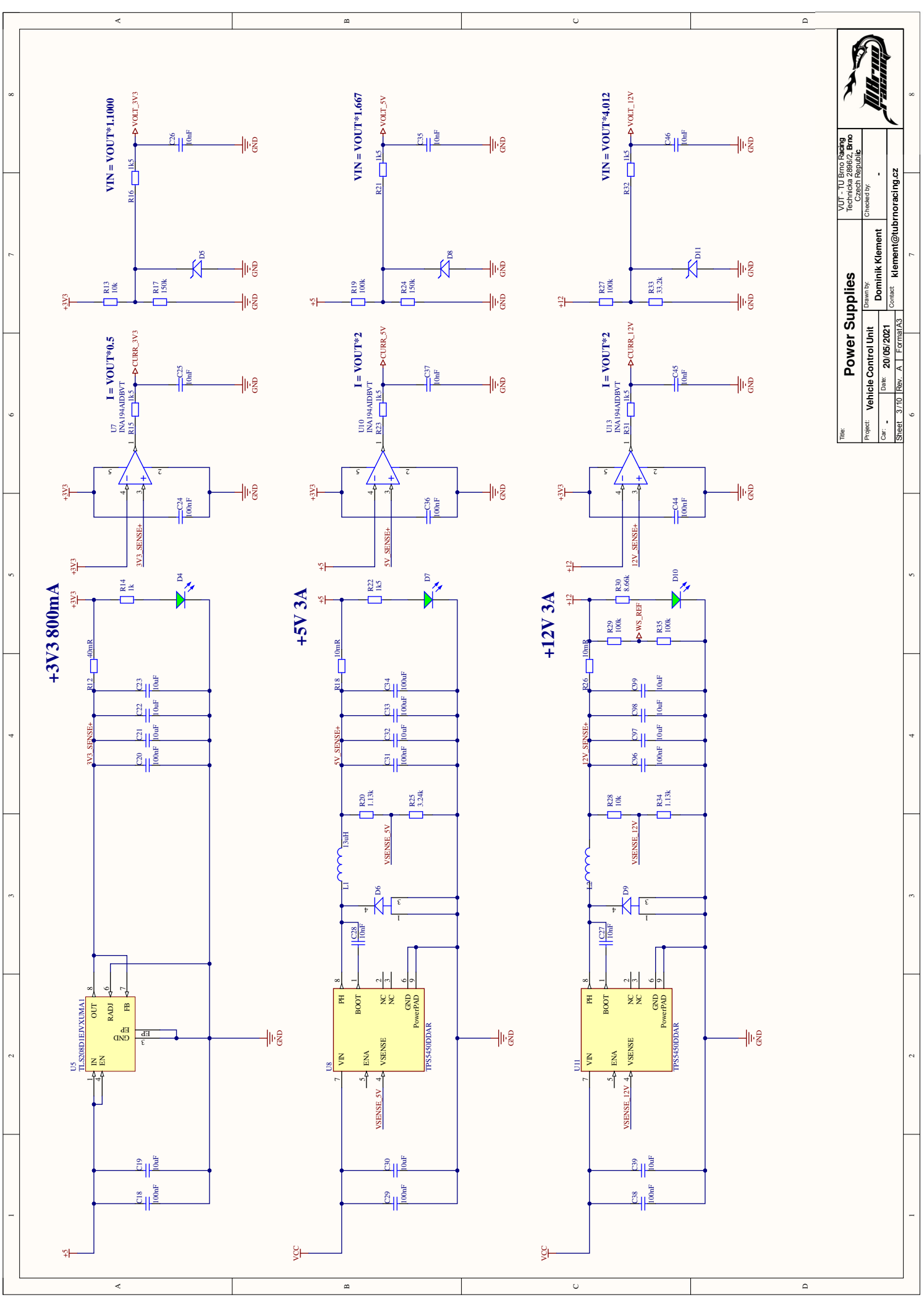
A Schéma řídicí jednotky	62
B Návrh DPS řídicí jednotky	73
C Blokové schéma monopostu eD1	81
D Schémata univerzálních modulů napájení	83
E Vizualizace vzhledu řídicí jednotky	87

## **A Schéma řídicí jednotky**



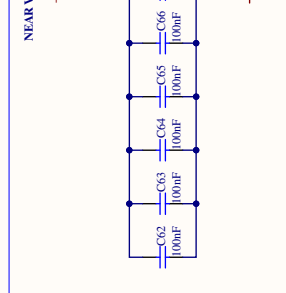
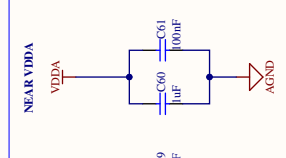
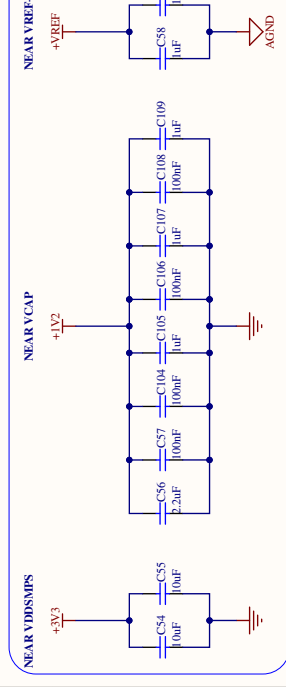
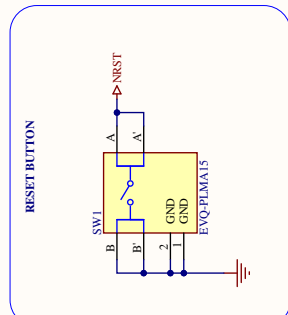
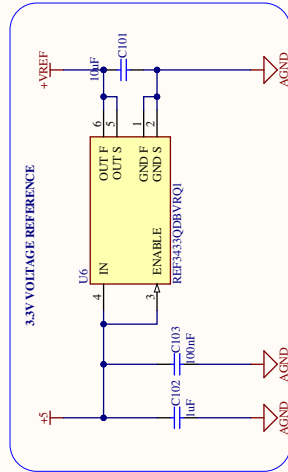
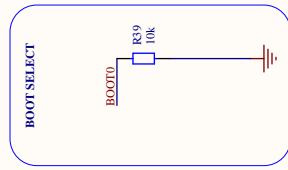
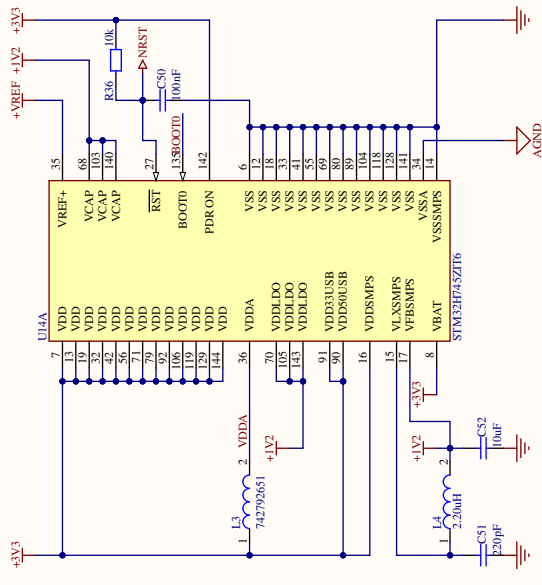


	
<b>Title:</b> Input Protection	
<b>Project:</b> Vehicle Control Unit	<b>Drawn by:</b> Dominik Klement
<b>Car:</b> -	<b>Date:</b> 20/05/2021
<b>Sheet:</b> 2/10	<b>Rev.:</b> A
<b>Contact:</b> klement@ubnorracing.cz	



Title: VUT - TU Brno Racing Technika 2006/2, Brno Czech Republic		Checked by: -	
Project: Vehicle Control Unit		Drawn by: Dominik Klement	
Car: -	Date: 20/05/2021	Contact: klement@ubnorracing.cz	
Sheet: 3/10	Rev: A	Format: A3	

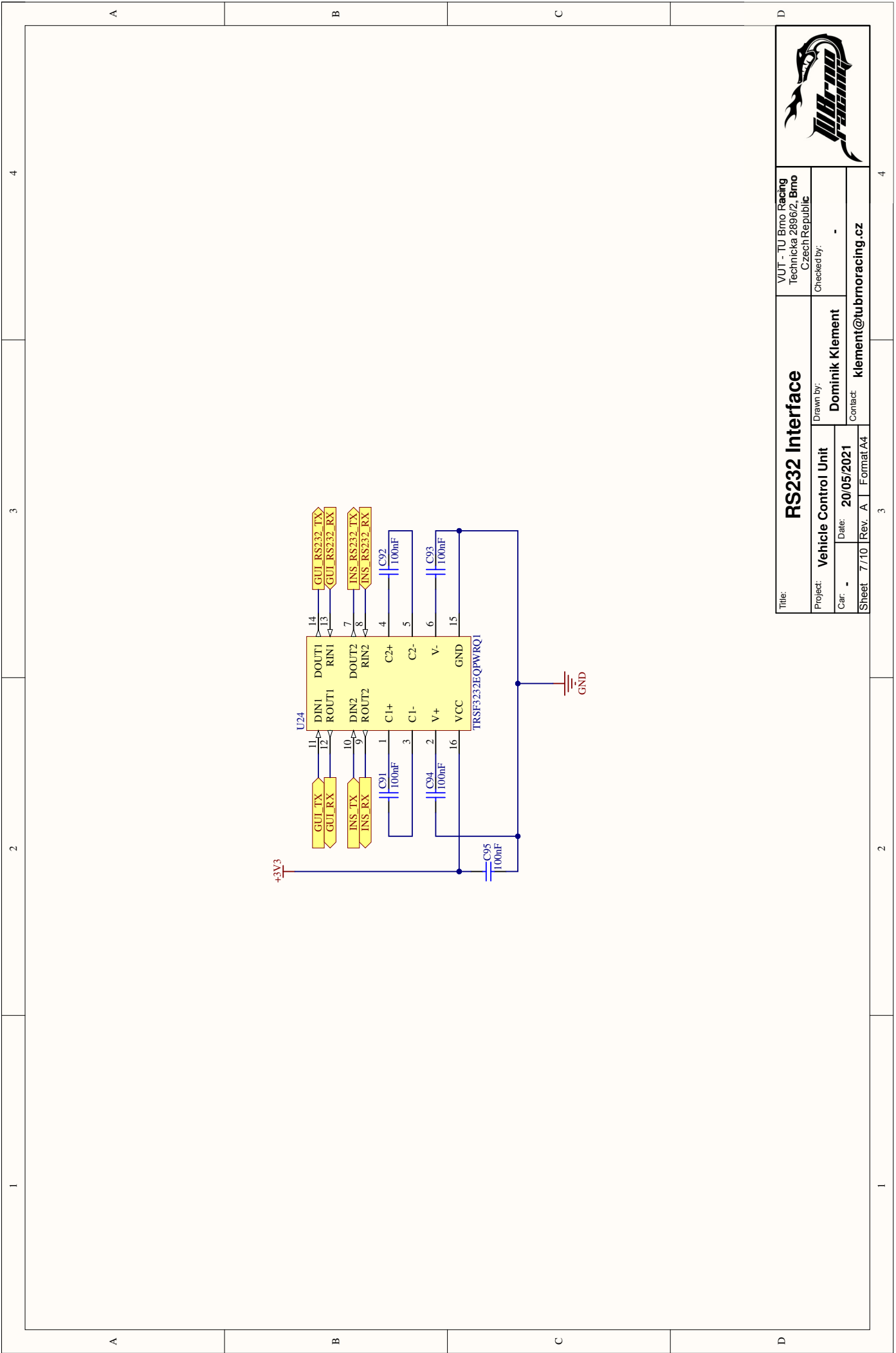




Title: <b>STM32 Power</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>Vehicle Control Unit</b>		Checked by:	
Car: -		Drawn by: <b>Dominik Klement</b>	
Date: <b>20/05/2021</b>		Contact: <b>klement@ubnroracing.cz</b>	
Sheet: 4/10	Rev. A	Format: A3	

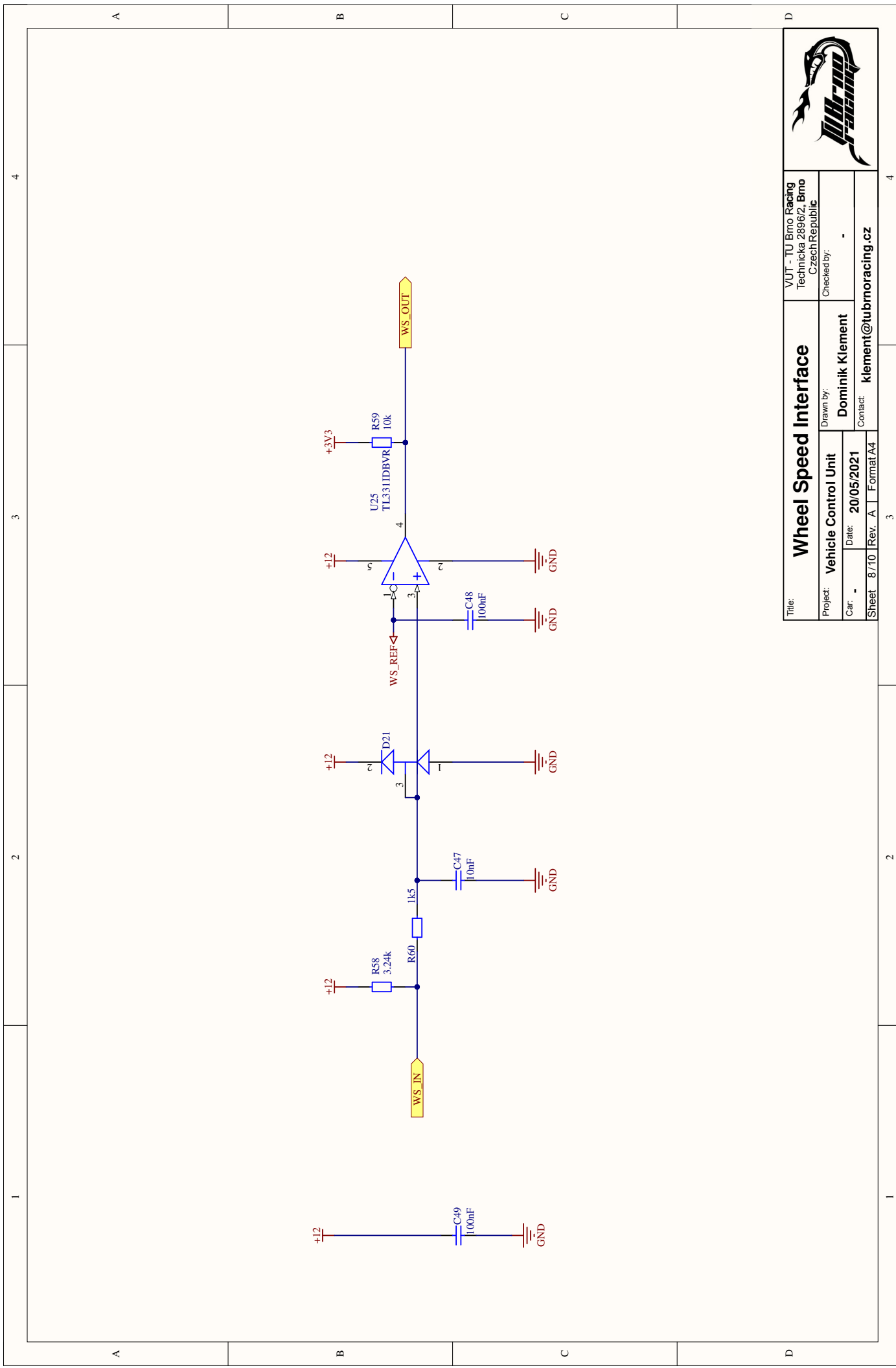






Title: <b>RS232 Interface</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>Vehicle Control Unit</b>	Drawn by: <b>Dominik Klement</b>	Checked by: -	
Car: -	Date: <b>20/05/2021</b>	Contact: <b>klement@tubnoracing.cz</b>	
Sheet 7/10	Rev. A	Format A4	





Title: <b>Wheel Speed Interface</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>Vehicle Control Unit</b>	Drawn by: <b>Dominik Klement</b>	Checked by: -	
Car: -	Date: <b>20/05/2021</b>	Contact: <b>klement@tubmotoracing.cz</b>	
Sheet: 8/10	Rev. A	Format: A4	

1

2

3

4

A

B

C

D

A

B

C

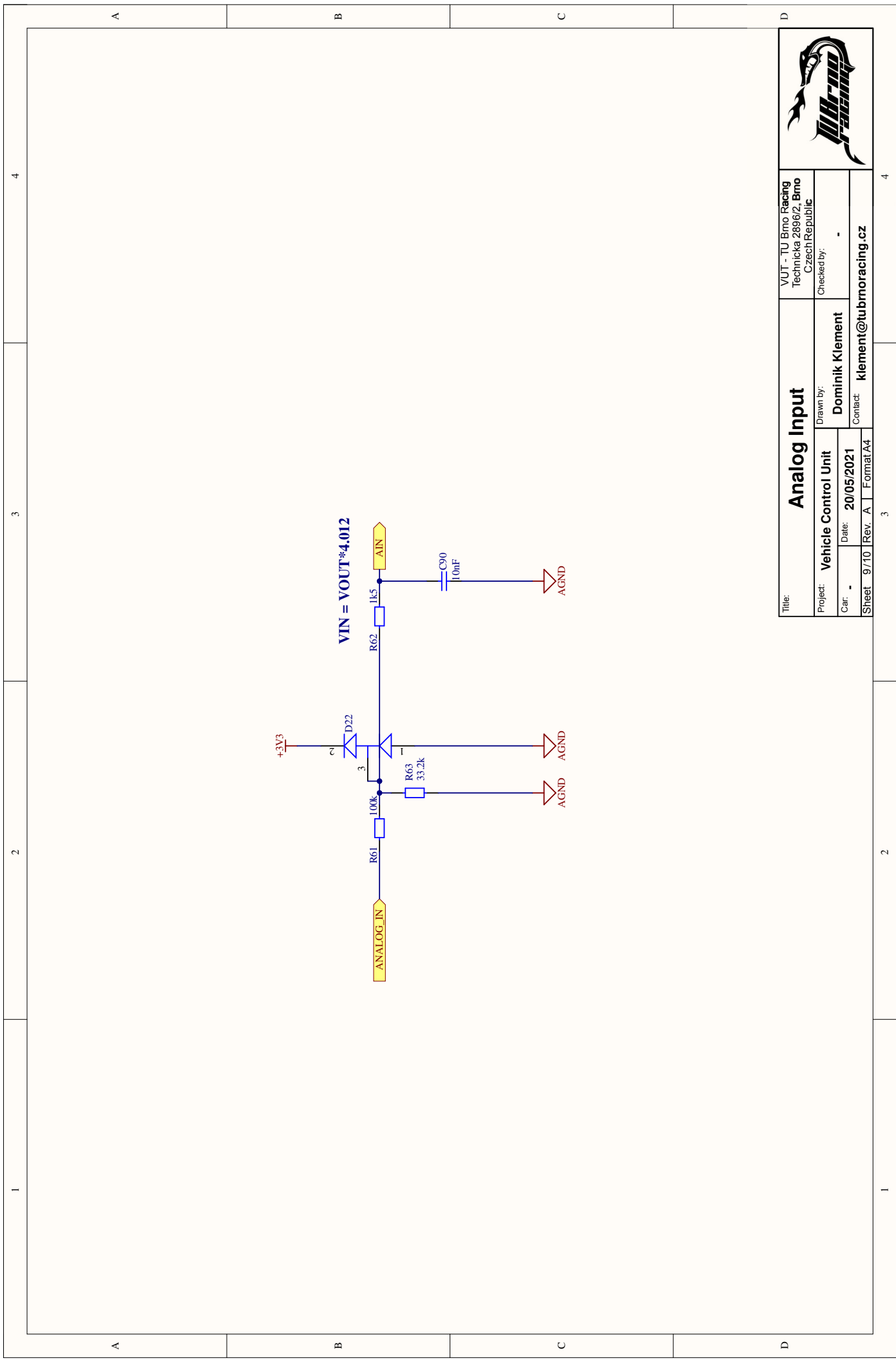
D

1

2

3

4



Title: <b>Analog Input</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>Vehicle Control Unit</b>	Drawn by: <b>Dominik Klement</b>	Checked by: -	
Car: -	Date: <b>20/05/2021</b>	Contact: <b>klement@tubnoracing.cz</b>	
Sheet 9/10	Rev. A	Format A4	



4

3

2

1

A

B

C

D

A

B

C

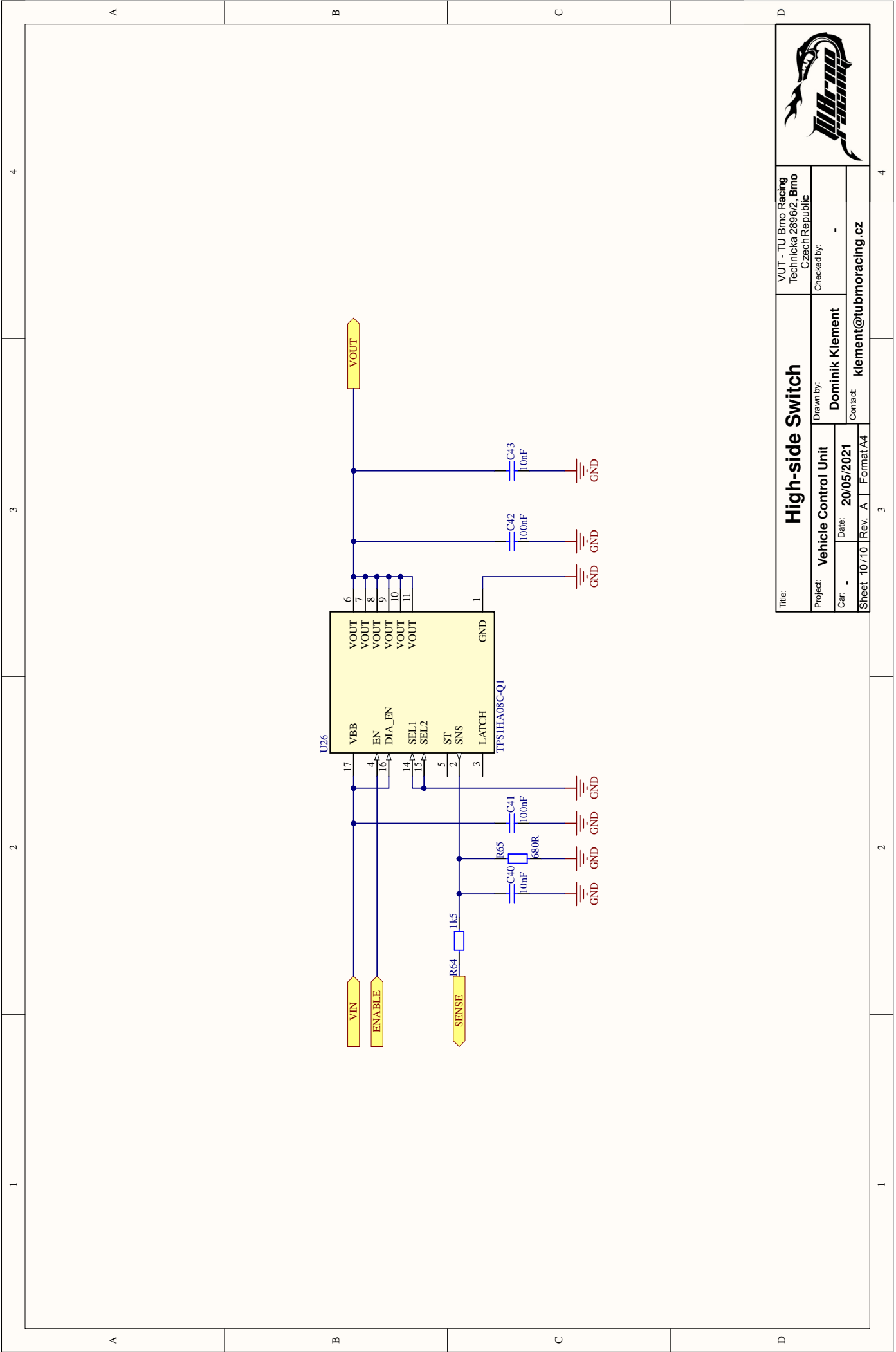
D


4

3

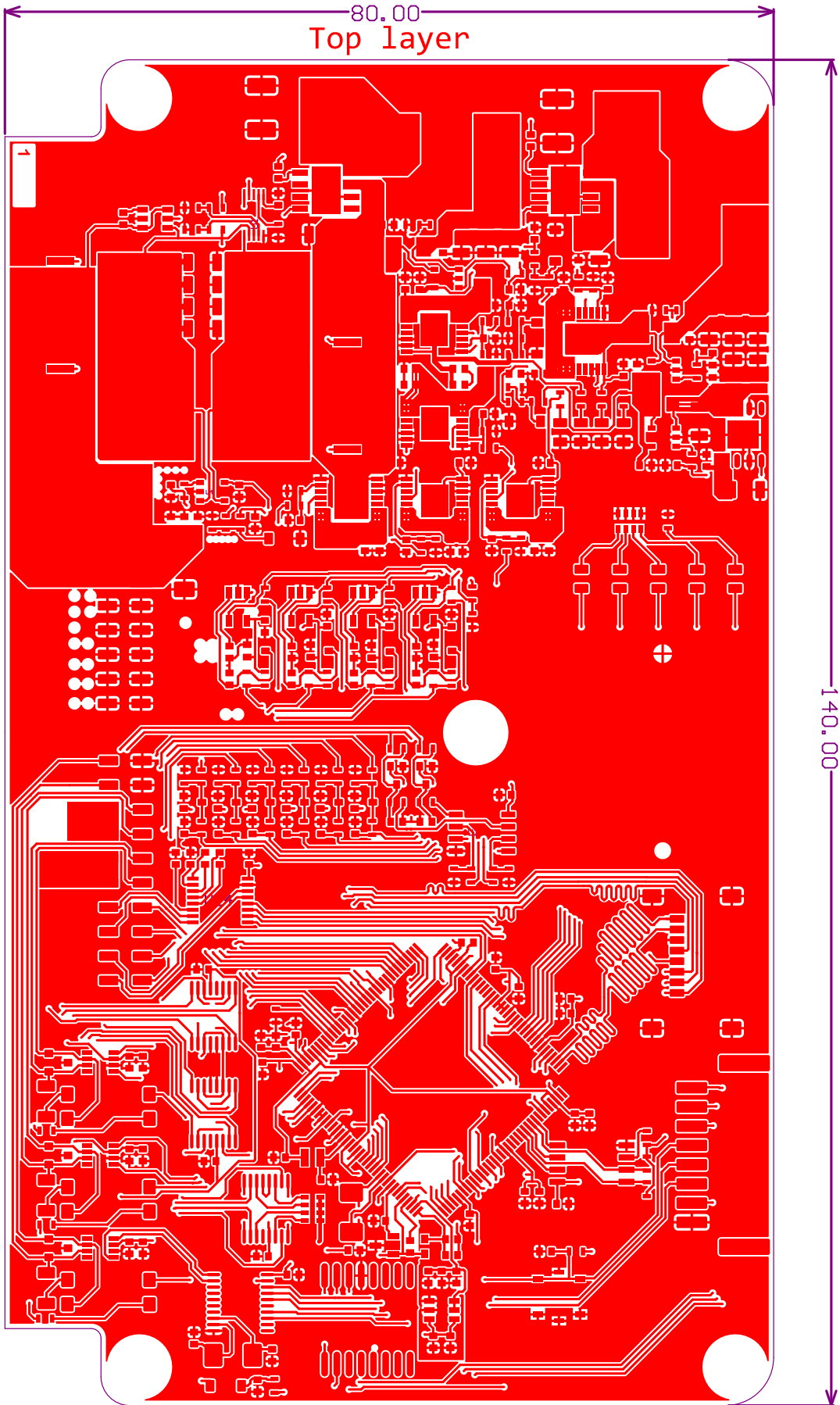
2

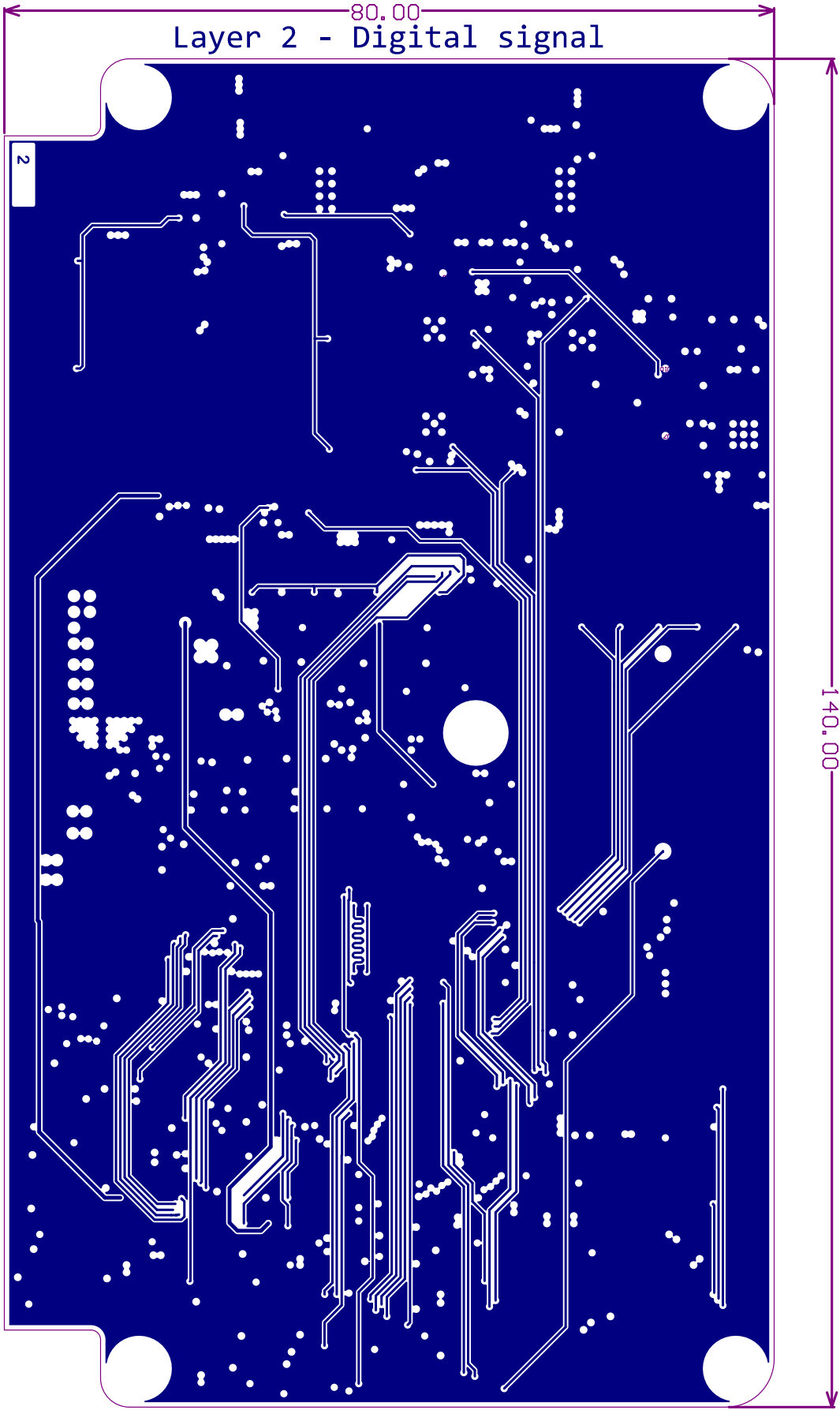
1

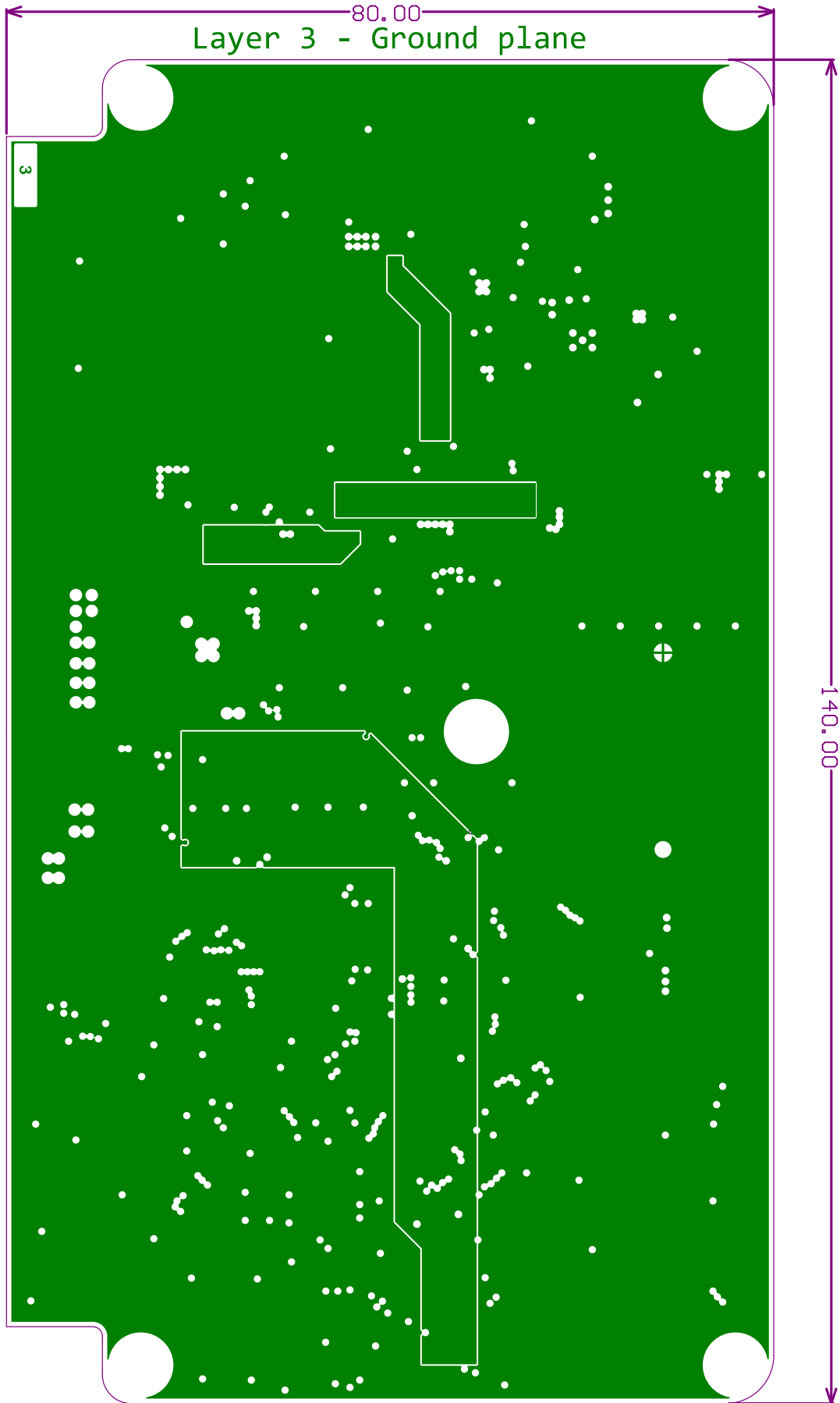


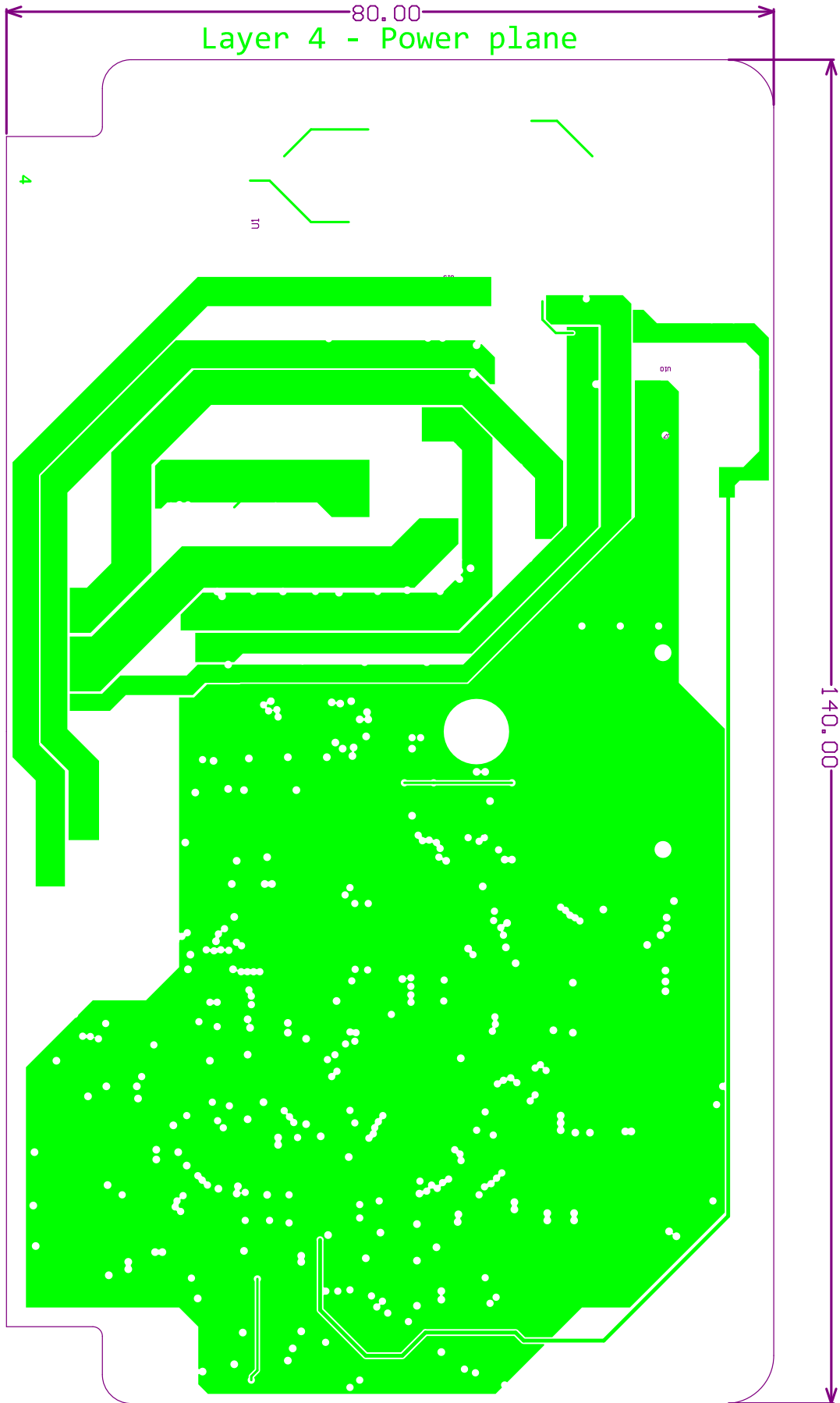
	
<b>Title:</b> High-side Switch	
<b>Project:</b> Vehicle Control Unit	<b>Drawn by:</b> Dominik Klement
<b>Car:</b> -	<b>Date:</b> 20/05/2021
<b>Sheet 10/10</b>   Rev. A   Format A4	<b>Contact:</b> klement@tubmoracing.cz

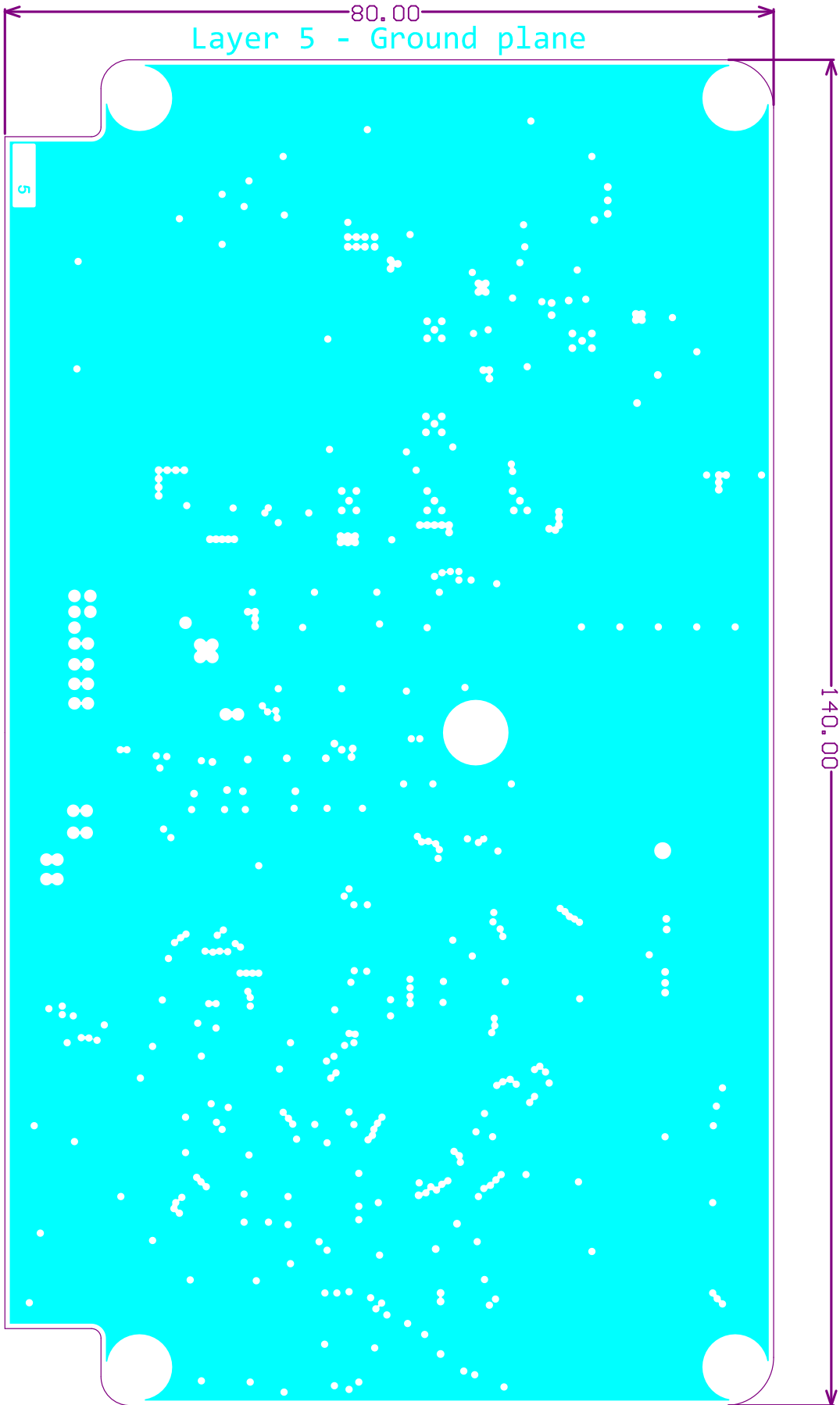
## **B Návrh DPS řídicí jednotky**

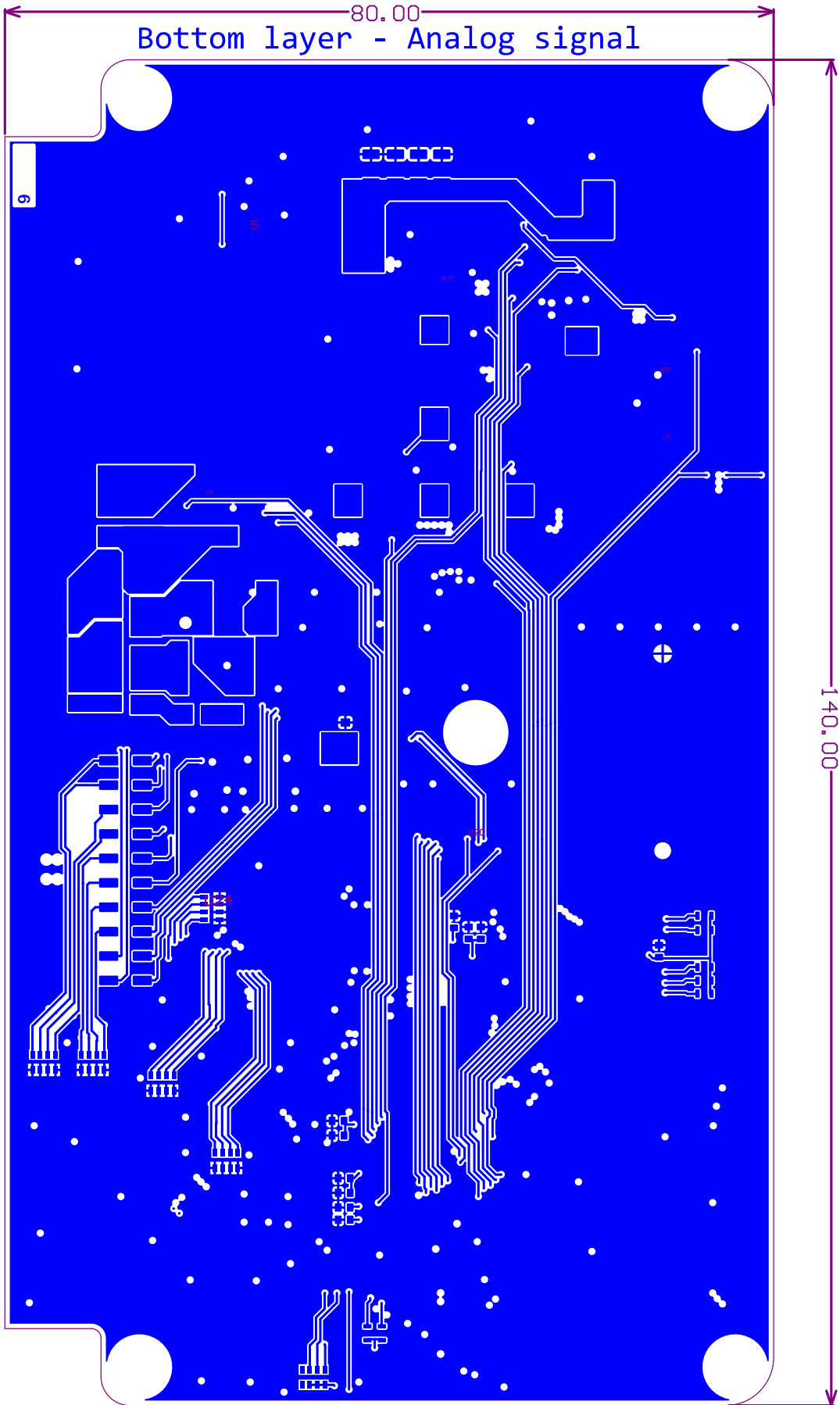


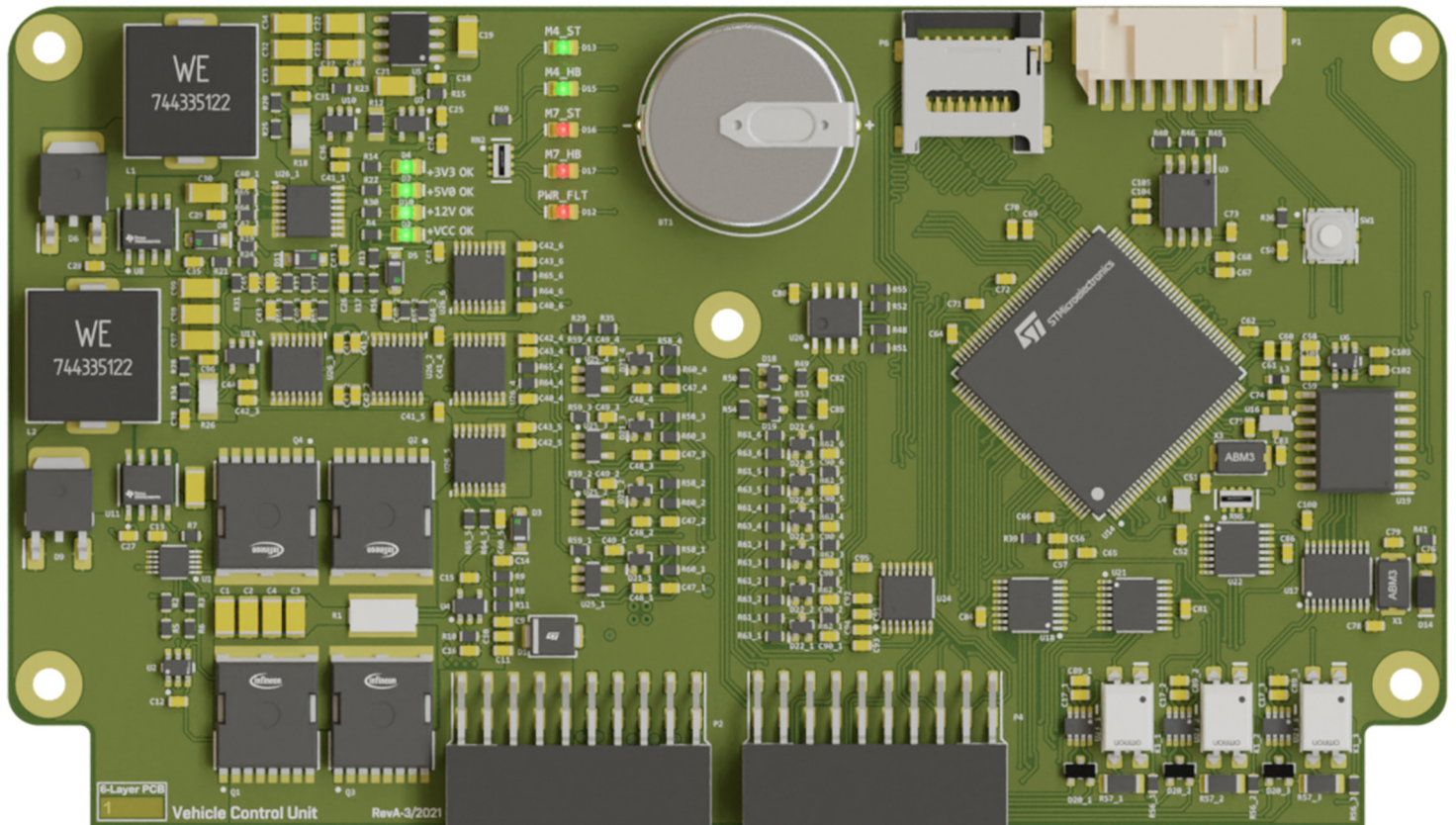
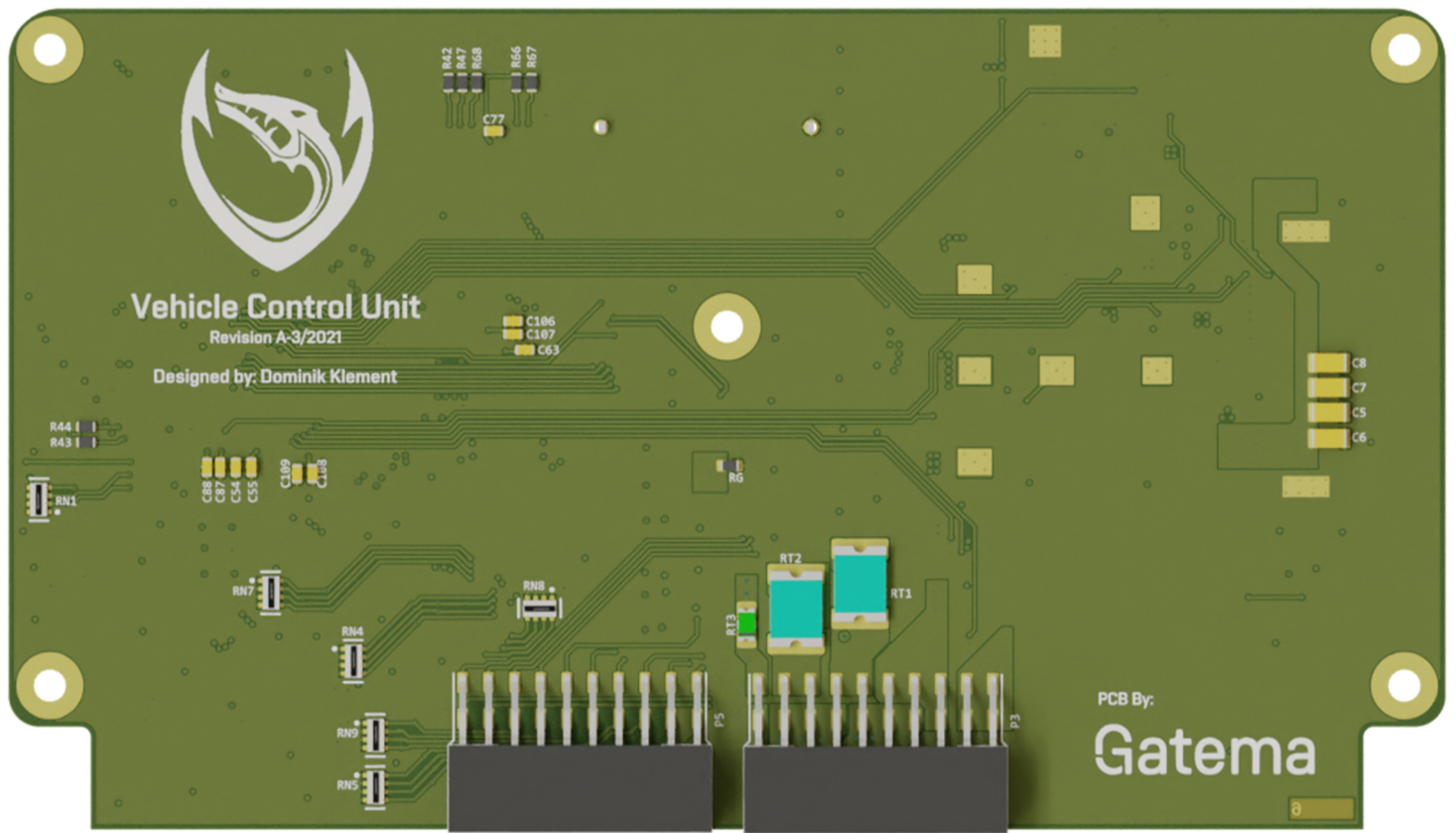




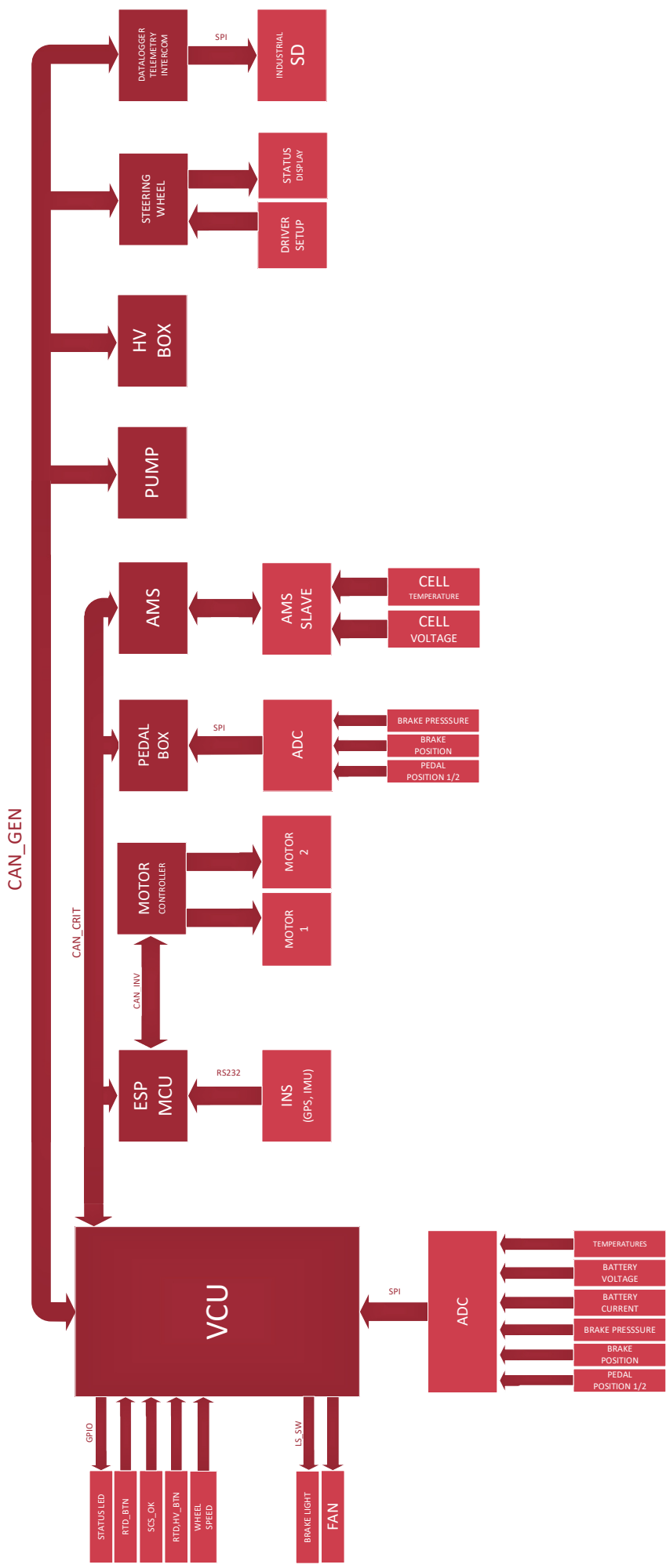




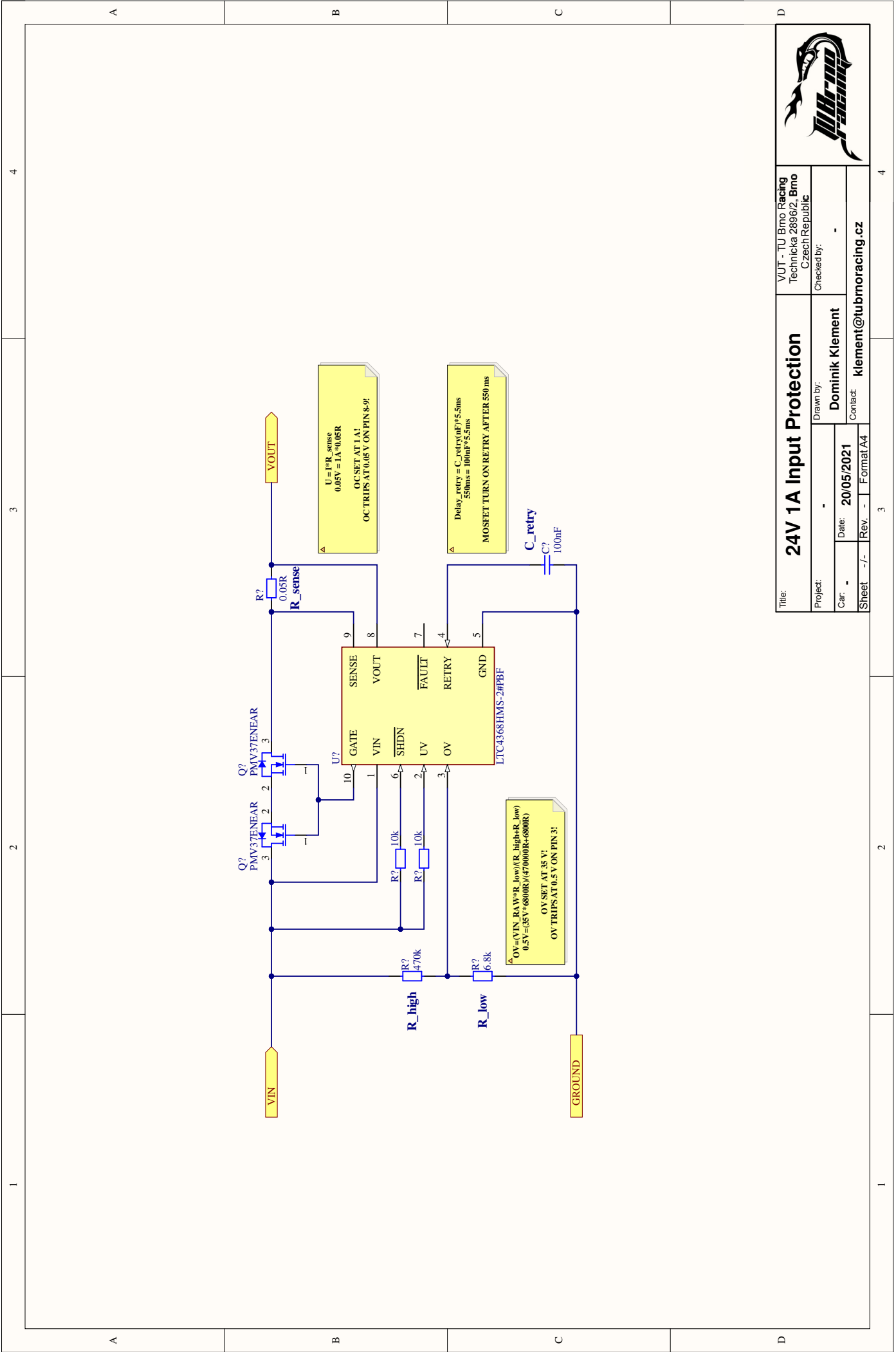




## **C Blokové schéma monopostu eD1**



## **D Schémata univerzálních modulů napájení**



**Title:** 24V 1A Input Protection

**Project:** VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2 Brno Czech Republic

**Car:** -

**Date:** 20/05/2021

**Rev.:** - / -

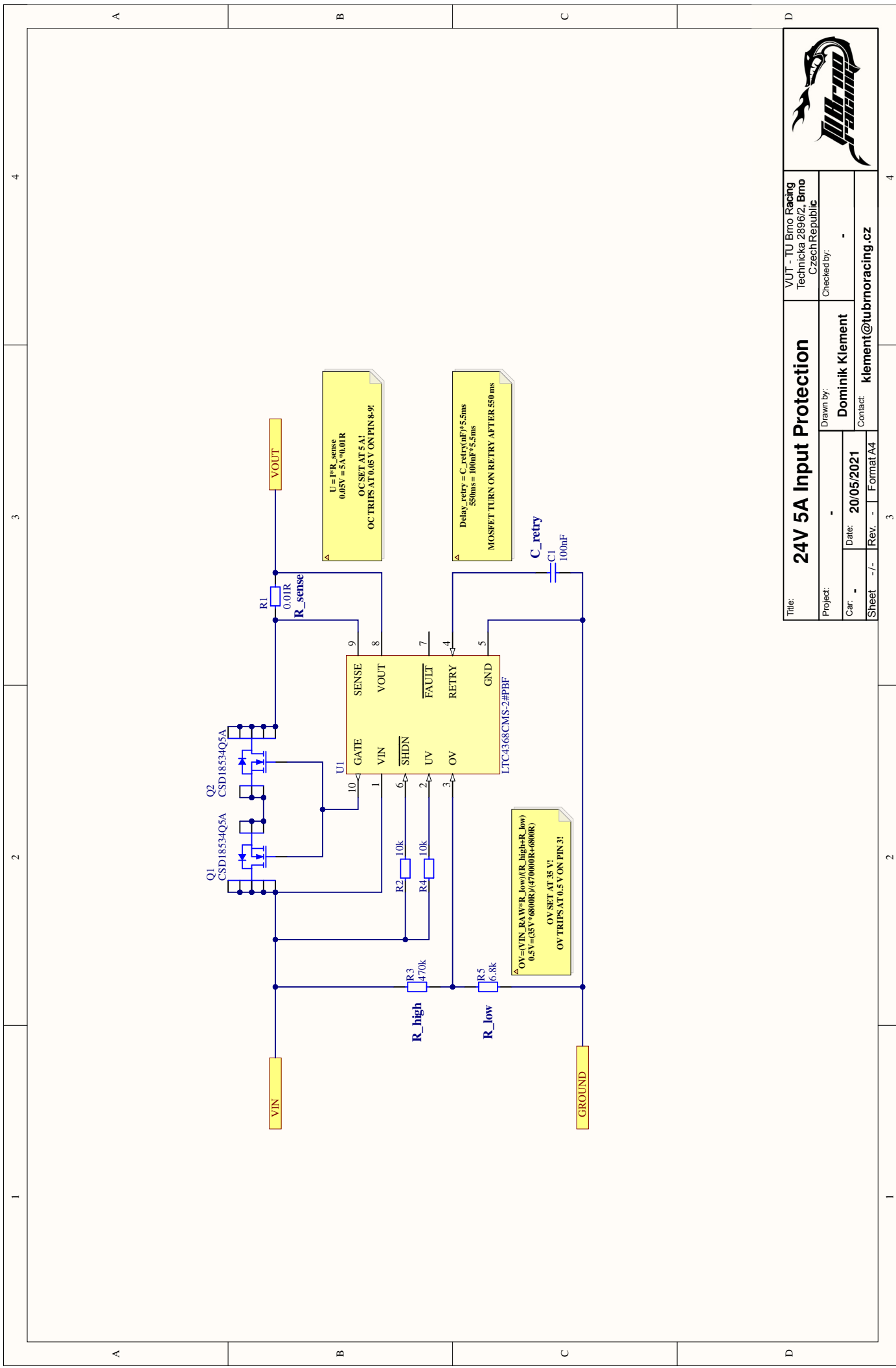
**Format:** A4


**Drawn by:** Dominik Klement

**Contact:** klement@tubmoracing.cz

**Checked by:** -





	
<b>Title:</b> 24V 5A Input Protection	
VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: -	Checked by:
Car: -	Drawn by: <b>Dominik Klement</b>
Date: <b>20/05/2021</b>	Contact: <b>klement@tubmoracing.cz</b>
Sheet - / -	Rev. - / - Format A4



## **E Vizualizace vzhledu řídicí jednotky**

