

Bakalářská práce



**České
vysoké
učení technické
v Praze**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

Palubní deska a řídicí jednotka elektrické formule ČVUT FSE.07

Petr Hainc

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Obor: Aplikovaná elektronika

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hainc** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **456966**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Palubní deska a řídicí jednotka elektrické formule ČVUT FSE.07

Název bakalářské práce anglicky:

Dashboard and Control Unit for Electric Formula CTU FSE.07

Pokyny pro vypracování:

- 1) Uveďte seznam vstupů a výstupů palubní desky a ECU-Front, který vzešel z předcházejícího projektu.
- 2) Nakreslete blokové schéma obou desek a popište ho.
- 3) Vytvořte schéma zapojení, popište návrh každého funkčního bloku s důrazem na výběr součástek.
- 4) Navrhněte layout desek plošných spojů (DPS) se zvláštním ohledem na zabudování do vozidla Formula Student. Popište a přiložte výkres DPS a finální mechanické zabudování do vozidla.
- 5) Navrhněte a popište postup pro osazování DPS s důrazem na ožívování jednotlivých funkčních bloků.
- 6) Otestujte funkčnost a přiložte fotografii plně rozsvícené palubní desky.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, Praha 2008
- [2] Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
- [3] Katalogové listy součástek a aplikační poznámky výrobců

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Luborovi Jiráskovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 16. května 2018

.....
Petr Hainc

Abstrakt

Cíl této práce je navrhnout a vyrobit řídicí jednotku ECU-Front a palubní desku pro vozidlo kategorie Formula Student Electric.

K její realizaci bylo nezbytné vytvořit schémata zapojení a navrhnout desky plošných spojů obou zařízení. Dále tyto desky osadit součástkami, oživit je a otestovat jejich funkčnost.

Takto vyrobená jednotka ECU-Front a palubní deska bude zabudována do závodního monopostu FSE.07, kde bude fungovat v nadcházející sezóně 2018.

Klíčová slova: Formula Student, řídicí jednotka, palubní deska, deska plošných spojů

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.
Katedra mikroelektroniky FEL ČVUT,
Technická 2,
166 27 Praha 6

Abstract

The goal of this project was to design and manufacture the ECU-Front control unit and the dashboard for a Formula Student Electric class vehicle.

It was essential to create schematic and to design printed circuit boards for both devices. The next step was to install the components on them, revive them and test their functionality.

Thus produced ECU-Front unit together with the dashboard will be built into the FSE.07 racing monopost, which will be operating in the outcoming season 2018.

Keywords: Formula Student, electronic control unit, dashboard, printed circuit board

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
1 Úvod	3
2 Stanovení požadavků na palubní desku a jednotku ECU-Front	5
2.1 Vstupy a výstupy palubní desky	5
2.2 Vstupy a výstupy jednotky ECU-Front	6
2.3 Koncept palubní desky a jednotky ECU-Front	7
3 Návrh schématu	11
3.1 Schéma jednotky ECUF	11
3.1.1 Napájecí část	11
3.1.2 Mikrokontrolér a komunikace	13
3.1.3 Zpracování signálů ze senzorů	16
3.1.4 Měření SDC	18
3.2 Schéma palubní desky	20
4 Návrh desek plošných spojů	23
4.1 DPS jednotky ECUF	24
4.2 DPS palubní desky	26
5 Osazování a testování desek plošných spojů	29
5.1 Osazování jednotky ECUF	29
5.2 Osazování palubní desky	30
6 Změny provedené v druhé revizi	33
6.1 Úpravy jednotky ECUF	33
6.2 Úpravy palubní desky	35
7 Závěr	37
A Literatura	39
B Výkresy, schémata, soupisky součástek	41

Obrázky

2.1 Blokové schéma jednotky ECUF a palubní desky	8
3.1 Schéma napájecího zdroje jednotky ECUF	12
3.2 Zapojení integrovaného high-side switche	12
3.3 Zapojení pro spínání 5 V	13
3.4 Zapojení napěťové reference	13
3.5 Zapojení krystalového oscilátoru	14
3.6 Zapojení pro komunikaci s jednotkou <i>TireTemp</i>	14
3.7 Zapojení CAN budiče	15
3.8 Buffer pro komunikaci s palubní deskou	16
3.9 Zpracování Pt1000	17
3.10 Zpracování SWS	17
3.11 Principiální schéma SDC	18
3.12 Zapojení pro měření SDC	19
3.13 Setrvačné nárazové senzory od firmy Sensata [18]	19
3.14 Bezpečnostní tlačítko OMRON [19]	20
3.15 Napájecí zdroj palubní desky ..	20
3.16 Zapojení LED budiče	21
3.17 Zapojení LED AMS a IMD, fototranzistoru a prepínače	21
4.1 Napájecí vrstva jednotky ECUF	24
4.2 Konektory typu WR-MPC3 [20]	25
4.3 Konektory DEUTSCH Autosport [21]	25
4.4 Horní 3D pohled na DPS jednotky ECUF	26
4.5 3D pohled na DPS palubní desky	27
4.6 3D model reflektoru na palubní desku	27
4.7 Překryvné vrstvy palubní desky	28
5.1 Částečně osazená jednotka ECUF	31
5.2 Osazená palubní deska	31
5.3 Zkompletovaná plně rozsvícená palubní deska	32
6.1 Zapojení pro měření napájecího napětí	33
6.2 Lineární potenciometr DSR [22]	34
6.3 Zapojení pro zpracování DSR ..	34
6.4 3D zobrazení druhé verze DPS jednotky ECUF	35
6.5 Ošetření vstupů palubní desky ..	36
6.6 Konektor JST XH [23]	36
6.7 3D zobrazení druhé verze palubní desky s reflektorem	36
B.1 Okótovaný výkres reflektoru na palubní desku	41
B.2 Potisk přední strany DPS palubní desky	42
B.3 Motiv spojů přední strany DPS palubní desky (bez polygonu)	43
B.4 Motiv spojů zadní strany DPS palubní desky (bez polygonu, zrcadlově)	43
B.5 Potisk zadní strany DPS palubní desky (zrcadlově)	43
B.6 Potisk přední vrstvy DPS jednotky ECUF	46
B.7 Motiv spojů přední vrstvy DPS jednotky ECUF (bez polygonů) ...	47
B.8 Motiv napájecí vrstvy DPS jednotky ECUF	47
B.9 Motiv zemní vrstvy DPS jednotky ECUF	48
B.10 Motiv spojů zadní vrstvy DPS jednotky ECUF (bez polygonů, zrcadlově)	48
B.11 Předpokládaná zástavba palubní desky do vozu FSE.07	49

B.12 Předpokládaná zástavba jednotky ECUF do vozu FSE.07	49
---	----

Tabulky

2.1 Význam zkratk uvedených v blokovém schématu	8
2.2 Maximální příkon spínaných jednotek	9
B.1 Soupiska součástek palubní desky	42
B.2 Soupiska součástek jednotky ECUF (1. část)	44
B.3 Soupiska součástek jednotky ECUF (2. část)	45
B.4 Soupiska součástek jednotky ECUF (3. část)	46

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Význam (jednotka)
A	plocha příčného řezu vodičem (mil^2)
C	elektrická kapacita (F)
DT	teplotní nárůst ($^{\circ}C$)
g	tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
I	elektrický proud (A)
K	poměr výstupního a měřeného proudu (-)
P	výkon/příkon (W)
R	elektrický odpor (Ω)
V	elektrické napětí (V)
Zkratka	Význam
ECU-F	Electronic Control Unit-Front
-P	Pedals
-S	Steering wheel
-T	Telemetry
-G	Gyroscope (inerciální měřicí jednotka)
-A	Accumulator
DTLG	Datalogger
FW FAN	Front Wheel Fan
TireTemp	Tire Temperature unit
TS (ON)	Tractive System (ON)
AMS	Accumulator Management system
IMD	Insulation Monitoring Device
SWS	Steering Wheel Sensor
FWIL	Front Wheel Interlock
SDC	Shutdown Circuit
SDBC	Shutdown Button Cockpit
PWM	Pulse Width Modulation
CAN	Controller Area Network
USB	Universal Serial Bus
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
MOSI	Master Output Slave Input
PCB	Printed Circuit Board
DPS	Deska plošných spojů
ADC	Analog to Digital Converter
TVS	Transient Voltage Suppression (diode)
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MCU	Microcontroller Unit
DSR	Damper Sensor
SMD	Surface Mount Device



Zkratka **Význam**

ESD	Electrostatic Discharge
AIR	Accumulator Insulation Relay
FDM	Fused Deposition Modeling
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren



Kapitola 1

Úvod

eForce FEE Prague Formula je tým, fungující pod záštitou FEL ČVUT, který se účastní celosvětové soutěže pro studenty technických univerzit Formula Student (kategorie Electric), je složený převážně ze studentů elektrotechnické a strojní fakulty ČVUT v Praze. Úkol této soutěže spočívá v tom, každý rok postavit nový závodní monopost vlastního návrhu a konstrukce a tento následně prezentovat na závodech.

Členem týmu jsem se stal v říjnu 2017 a pro sedmou generaci elektrické formule FSE.07 mám na starost návrh a výrobu palubní desky a jedné z řídicích jednotek, konkrétně jednotky ECUF (Electronic Control Unit Front). Zároveň jsem si toto téma zvolil i pro svou bakalářskou práci, neboť úzce souvisí s mým studijním oborem a je to činnost, které bych se rád věnoval i v budoucnosti.

Pro tuto práci bylo nejdříve nutné stanovit požadavky na zmiňovaná zařízení a na základě těchto poznatků navrhnout koncept palubní desky a jednotky ECUF. Těmito tématy se zabývá druhá kapitola.

Ve třetí a čtvrté kapitole je popsán návrh schématu a desek plošných spojů palubní desky a jednotky ECUF. Pátá kapitola přibližuje postup osazování desek součástkami a jejich testování. Šestá kapitola shrnuje změny provedené při tvorbě druhé revize obou zařízení. V závěru jsou zhodnoceny celkové dosažené výsledky.

Hlavní cíl této bakalářské práce je navrhnout a vyrobit dvě zařízení – jednotku ECU-Front a palubní desku, které budou reálně fungovat v závodním monopostu FSE.07 pro sezónu 2018.

Kapitola 2

Stanovení požadavků na palubní desku a jednotku ECU-Front

Funkce a design palubní desky a jednotky ECU-Front vozu FSE.07 jsou ovlivněny několika faktory, analýzou těchto požadavků se zabýval semestrální projekt předcházející této práci. Analýza spočívala v nastudování aktuálních pravidel soutěže Formula Student, průzkumu palubních desek některých evropských týmů a následné diskuzi s piloty formule, neboť palubní deska je jedním z uživatelských rozhraní pilota.

Další důležitý bod bylo seznámení se s realizací palubní desky a jednotky ECUF v předešlé generaci elektrické formule a pochopení konceptu monopostu FSE.07 jako celku, neboť z něho vycházejí nové požadavky pro obě desky. Takto získaný seznam požadavků je shrnut v následujících podkapitolách. Dále je v této kapitole popsán koncept spolu s blokovým schématem obou desek.

2.1 Vstupy a výstupy palubní desky

Prvky palubní desky jsou v první řadě nezbytně nutné náležitosti dle pravidel soutěže Formula Student, bez kterých by monopost neprošel technickými přejímkami na závodech. Následující seznam je výtah z pravidel Formula Student Germany 2018 v1.1 [1] (kód v hranaté závorce odkazuje na konkrétní bod pravidel).

1. **Tractive System (TS) button** [EV 5.11.1]
Pilot musí být schopen aktivovat a deaktivovat TS z kokpitu bez asistence další osoby.
2. **Start button** [EV 5.11.5]
Po aktivaci TS jím pilot přepne vozidlo do ready-to-drive (RTD) módu (aktivuje plynový pedál). Po stisku se ozve zvuk (ready-to-drive sound) trvající 1-3 sekundy (80-90 dBA). [EV 5.12]
3. **Shutdown button** [EV 7.3.5]
Bezpečnostní tlačítko o průměru 24 mm, po stisku rozpojí shutdown okruh. Musí být umístěno vedle volantu na místě, které je pro pilota snadno dosažitelné.

4. **Indikace chyby AMS (Accumulator Management system)** [EV 6.8.8]
Dobře viditelná červená kontrolka označená nápisem „AMS“. Rozsvítí se v případě, že AMS rozpojí bezpečnostní obvod SDC (shutdown circuit) a svítí, dokud není chybový stav ručně resetován.
5. **Indikace chyby IMD (Insulation Monitoring Device – monitorování izolace)** [EV 7.4.5]
Dobře viditelná červená kontrolka označená nápisem „IMD“. Rozsvítí se v případě, že IMD rozpojí bezpečnostní obvod SDC a svítí, dokud není chybový stav ručně resetován [1].

Další vyžadované prvky palubní desky jsou:

- bargraf BATTERY STATUS, který bude ukazovat stav nabití trakčního akumulátoru
- 3 kontrolky informující o stavech palubních systémů (kritické teploty, kontrola trakce apod.)
- senzor pro jasovou regulaci LED na palubní desce
- 3 programovatelné přepínače s indikací sepnutí

2.2 Vstupy a výstupy jednotky ECU-Front

Jedna z důležitých funkcí jednotky ECUF je distribuce napájení ostatním řídicím jednotkám, zařízením a senzorům v přední části vozu. Seznam výstupů je následující:

- 3× výstup +24 V s měřením odebíraného proudu (pro jednotky ECUP – pedálová jednotka, ECUS – volantová jednotka, ECUT+DTLG – telemetrie + datalogger)
- 1× výstup +24 V pro ventilátor předních brzd (FW FAN)
- 1× výstup +24 V pro napájení palubní desky
- 1× výstup +5 V pro jednotku TireTemp
- 1× výstup +3,3 V pro senzor natočení volantu (SWS)

Jednotka ECUF dále vyhodnocuje signály ze senzorů:

- 1× vstup pro PWM signál ze senzoru natočení volantu (magnetický enkodér)
- 2× analogový vstup pro senzor teploty předních brzd (Pt 1000)
- 1× digitální vstup pro data z jednotky TireTemp (teplota pneumatik)
- 1× analogový vstup pro signál ze senzoru osvětlení palubní desky

Další funkcí je vyhodnocení přerušení SDC (shutdown circuit), k tomuto účelu slouží 3 měřicí body sledující stav bezpečnostních prvků - nouzového tlačítka SDBC (po stisku bliká), setrvačného vypínače INERTIA a konektoru FWIL. Jednotka ECUF bude řídit palubní desku, tzn. signalizovat stavy pomocí LED a vyhodnocovat stav přepínačů a tlačítek. ECUF bude komunikovat s ostatními řídicími jednotkami pomocí sběrnice CAN.

2.3 Koncept palubní desky a jednotky ECU-Front

Z výše stanovených požadavků vyplývá koncepce obou zařízení, jejich blokové schéma je na obrázku 2.1.

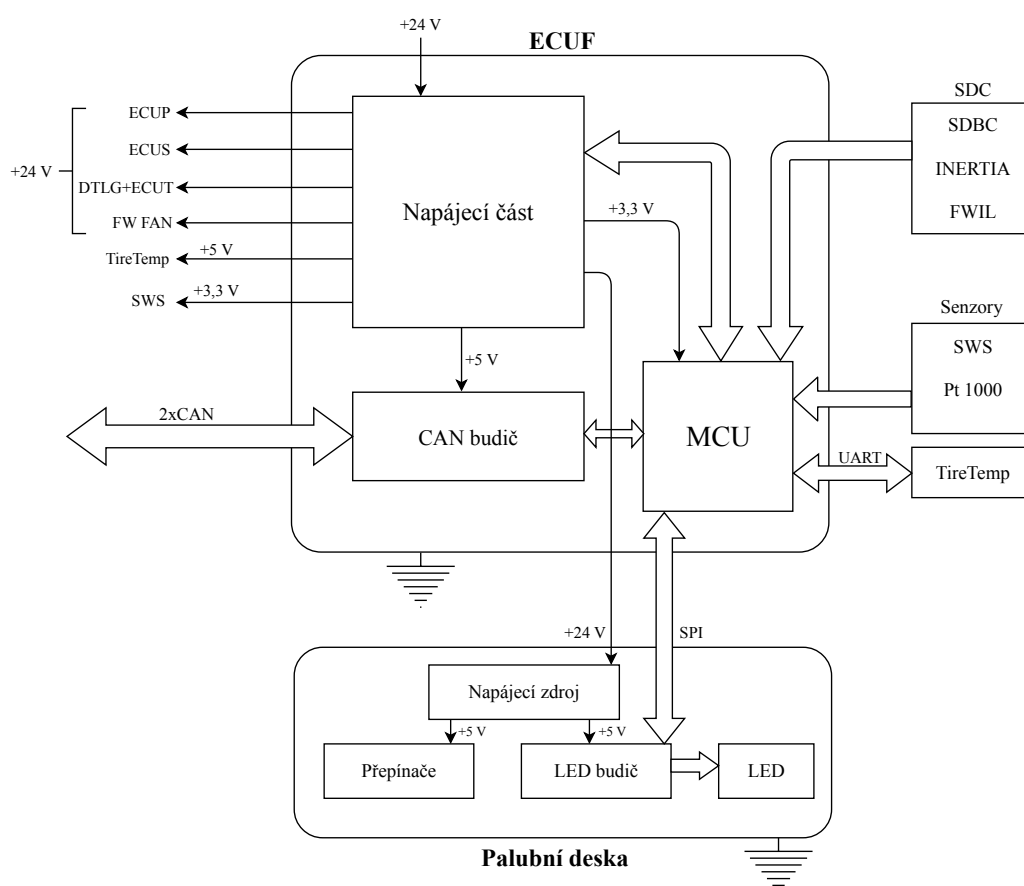
Jednotka ECUF a palubní deska budou dvě desky plošných spojů vzájemně propojené kabelem, jeho odhadovaná délka je cca 50 cm. Řídicí logická část se bude nacházet na jednotce ECUF, její funkce budou řízeny mikrokontrolérem. Palubní deska bude sloužit zejména jako signalizační a ovládací panel. Komunikace mezi oběma deskami bude probíhat pomocí sběrnice SPI a několika dalších vodičů pro přenos analogového signálu.

Blok *Napájecí část* je jedna z velkých a důležitých částí jednotky ECUF. Bude obsahovat snižující zdroj napětí z palubních 24 V na 5 V a dále na 3,3 V pro napájení mikrokontroléru. Dále bude obsluhovat spínání napětí pro palubní desku, další řídicí jednotky a zařízení. Předpokládaná spotřeba jednotky ECUF je maximálně 5 W.

CAN budič bude zajišťovat komunikaci pomocí dvou sběrnic CAN vedených mezi řídicími jednotkami v monopostu FSE.07. První sběrnice CAN slouží k přenosu důležitých informací, které jsou nezbytné pro jízdu vozu, po druhé se přenáší doplňkové informace, zejména údaje ze senzorů.

Jednotka ECUF bude měřit napětí ochranného obvodu SDC (Shutdown Circuit) ve třech bodech a tím zjišťovat, kde došlo k jeho rozpojení. Dále je nutné vyhodnocovat údaje ze dvou senzorů, jsou to *SWS* – senzor natočení volantu a *Pt1000* – měření teploty předních brzd. Komunikaci s jednotkou *TireTemp* bude zajišťovat sběrnice UART.

Z blokového schématu palubní desky je zřejmé, že tato deska bude napájena z palubního napětí 24 V. Blok *Napájecí zdroj* toto napětí sníží na 5 V, ze kterých budou, pomocí vhodně zvolených budičů, napájeny LED a přepínače. Maximální odhadovaná spotřeba palubní desky je 10 W.



Obrázek 2.1: Blokové schéma jednotky ECUF a palubní desky

Zkratka	Význam
ECU-	Electronic Control Unit-
-P	-Pedal
-S	-Steering wheel
-T	-Telemetry
DTLG	Datalogger
FW FAN	Front Wheel Fan
TireTemp	Tire Temperature
SDC	Shutdown Circuit
SDBC	Shutdown Button Cockpit
INERTIA	Inertia switch
FWIL	Front Wheel Interlock
SWS	Steering Wheel Sensor

Tabulka 2.1: Význam zkratk uvedených v blokovém schématu

jednotka	V_{CC} (V)	P_{max} (W)
ECUP	24	40
ECUS	24	6
ECUT	24	5
DTLG	24	5
FW FAN	24	2×35
Palubní deska	24	10
TireTemp	5	2,5

Tabulka 2.2: Maximální příkon spínaných jednotek

Kapitola 3

Návrh schématu

Návrh elektronických zařízení začíná u schématu, jež definuje obvodovou funkci daného zařízení. Schéma také obsahuje celou řadu prvků, které přímo nesouvisí s funkcí obvodu, takovými prvky jsou např. blokovací kondenzátory u integrovaných obvodů, ochranné součástky na vstupech a výstupech, odrušovací a filtrační prvky [2].

Na tyto prostředky je kladen velký důraz, neboť elektrickou formuli obecně považujeme za elektromagneticky zarušené prostředí. Už při návrhu schématu je vhodné součástkám přiřazovat správná pouzdra a také jejich 3D model, to usnadní návrh DPS. Potom také lze vygenerovat trojrozměrný model celé desky, který poskytuje lepší představu o mechanickém zabudování do formule (výroba krabičky apod.).

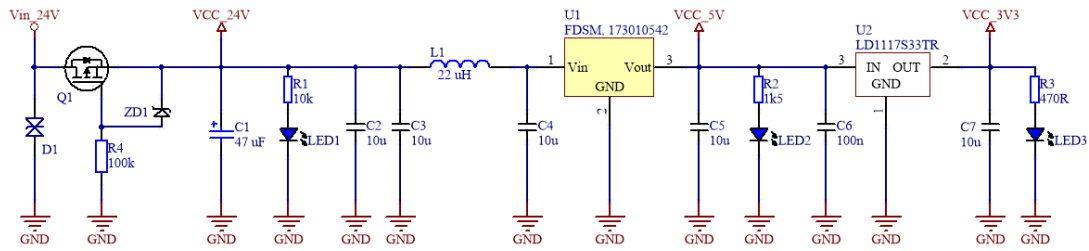
Schéma zapojení i desky plošných spojů jsou vytvořeny v programu *Altium Designer*, schéma je logicky rozděleno do jednotlivých částí dle funkce. Tato kapitola popisuje jednotlivé bloky.

3.1 Schéma jednotky ECUF

3.1.1 Napájecí část

První navrhovaná část je napájecí zdroj jednotky ECUF (viz blok *Power Management* na obrázku 2.1), do kterého vstupuje stejnosměrné palubní napětí +24 V. Na vstupu tohoto měniče je zapojena TVS dioda D1 chrání obvod proti indukovaným napěťovým špičkám. Následuje P-MOS tranzistor Q1, který slouží jako ochrana proti přepólování napájecího napětí a elektrolytický filtrační kondenzátor C1 o kapacitě 47 μF . Z tohoto bodu je odebíráno napětí 24 V, které se dále distribuuje.

Další prvek je modul spínaného step down regulátoru *MagI³C Power Module* U1 od firmy Würth Elektronik, jemu je předřazen filtr pro odrušení případného zvlnění vstupního napětí dle doporučení výrobce [3]. Napětí je na závěr upraveno na 3,3 V pomocí lineárního stabilizátoru U2. Každý stupeň obsahuje výstupní filtrační kondenzátor a LED indikaci detekující správnou funkci.



Obrázek 3.1: Schéma napájecího zdroje jednotky ECUF

Součástí napájecí části jsou tři obdobné bloky pro spínání napětí +24 V, jejich základ tvoří dvoukanálový integrovaný high-side switch, tento obvod je vhodný pro automotive užití a nese označení VND7020AJ. Také umožňuje indikovat některé chybové stavy, například zkrat, pokles napájecího napětí či přehřátí a tyto stavy řešit odpojením výstupu.

Další jeho funkce je analogové snímání odebíraného proudu, tato informace může být důležitá pro diagnostiku celého vozu. Informaci o spotřebovávaném proudu nám poskytuje napětí V_{SENSE} na rezistoru $R_{SENSE} = R20$, kterým teče proud I_{SENSE} , pro nějž platí

$$I_{SENSE} = \frac{I_{OUT}}{K}, \quad (3.1)$$

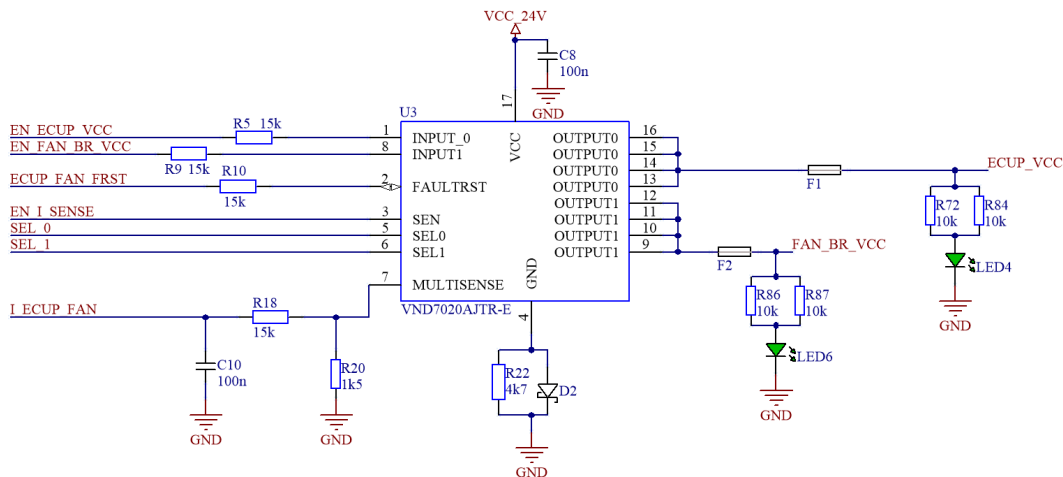
kde I_{OUT} je proud zátěže a K je konstanta udávající poměr výstupního a měřeného proudu [4]. Poté lze hodnotu rezistoru R20 dopočítat ze vztahu

$$V_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot I_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot \frac{I_{OUT}}{K}, \quad (3.2)$$

pro maximální $V_{SENSE} = 3 \text{ V}$ a $I_{OUT} = 5 \text{ A}$

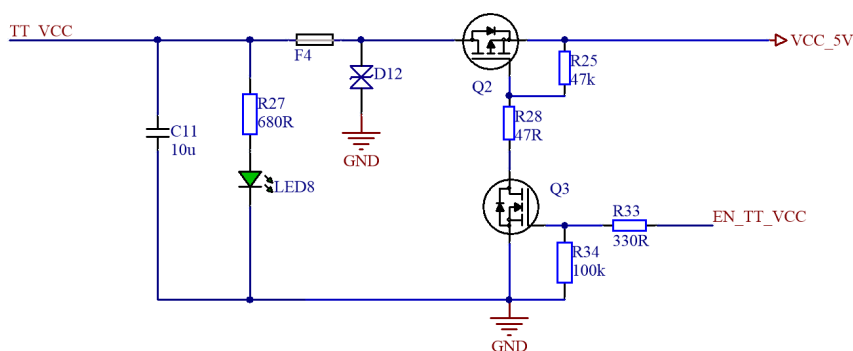
$$R_{SENSE} = V_{SENSE} \cdot \frac{K}{I_{OUT}} \approx 1,5 \text{ k}\Omega, \quad (3.3)$$

napětí V_{SENSE} je přivedeno na vstup AD převodníku mikrokontroléru. Každý výstup je jištěn standardní nožovou autopojistkou, sepnutí indikuje LED.



Obrázek 3.2: Zapojení integrovaného high-side switchu

Poslední zapojení v napájecí části je obvod zajišťující spínání 5 V pro jednotku *TireTemp*. Po přivedení logické jedničky na gate NMOS tranzistoru Q3 dojde k otevření PMOS tranzistoru Q2 a tím může téct proud do zátěže. Výstup je opět jistěn pojistkou s LED indikací a filtračním kondenzátorem, TVS dioda D12 slouží k ochraně obvodu proti případnému přepětí z vnější strany.

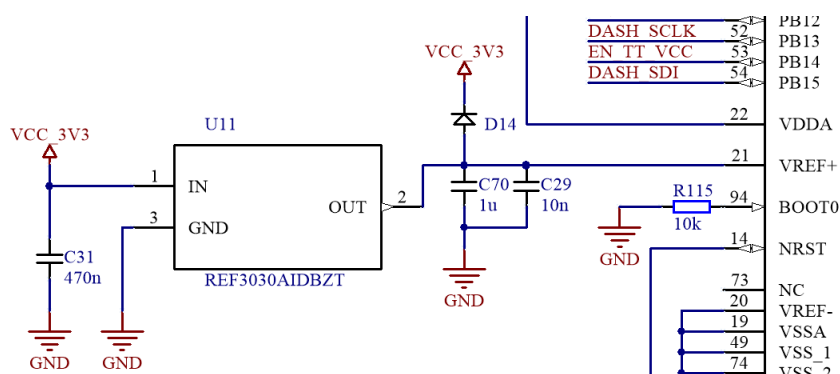


Obrázek 3.3: Zapojení pro spínání 5 V

3.1.2 Mikrokontrolér a komunikace

Pro řízení všech funkcí jednotky ECUF a palubní desky byl vybrán 32 bitový mikrokontrolér z rodiny STM32 firmy STMicroelectronics, tento konkrétní nese označení STM32F105VC ve variantě se sto piny (pouzdro LQFP 100). Mikrokontrolér je založen na jádře ARM[®] Cortex[®]-M3 a pracuje na maximální frekvenci 72 MHz [5]. Hlavním kritériem při výběru byl fakt, že obsahuje dvě komunikační rozhraní CAN.

Mikrokontrolér vyžaduje napájení stejnosměrným napětím 3,3 V, každý jeho napájecí vstup blokuje kondenzátor o hodnotě 100 nF. Další prvek související s funkcí MCU je externí napěťová reference, vhodná součást pro fungování zabudovaného analogově digitálního převodníku. Zde použitou referenci U11 typu REF3030 od firmy Texas Instruments doplňují filtrační keramické kondenzátory na vstupu a výstupu, ty zajišťují co nejlepší stabilitu referenčního napětí [6].



Obrázek 3.4: Zapojení napěťové reference

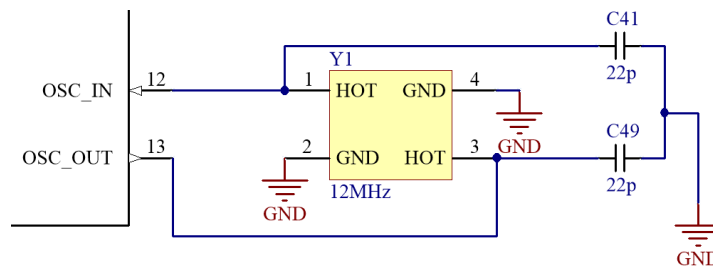
Mikrokontrolér bude provozován s externím krystalovým oscilátorem o frekvenci 12 MHz. Pro stabilní frekvenci oscilátor vyžaduje zatěžovací kapacitu C_L specifikovanou výrobcem. Tuto zajišťují paralelní kondenzátory C_{41} a C_{49} , jejich hodnotu lze vypočítat ze vztahu

$$C_L = \frac{C_{41} \cdot C_{49}}{C_{41} + C_{49}} + C_S, \quad (3.4)$$

kde C_S je kapacita krystalu [7]. V tomto případě $C_L = 18 \text{ pF}$ a $C_S = 7 \text{ pF}$ [8], tudíž

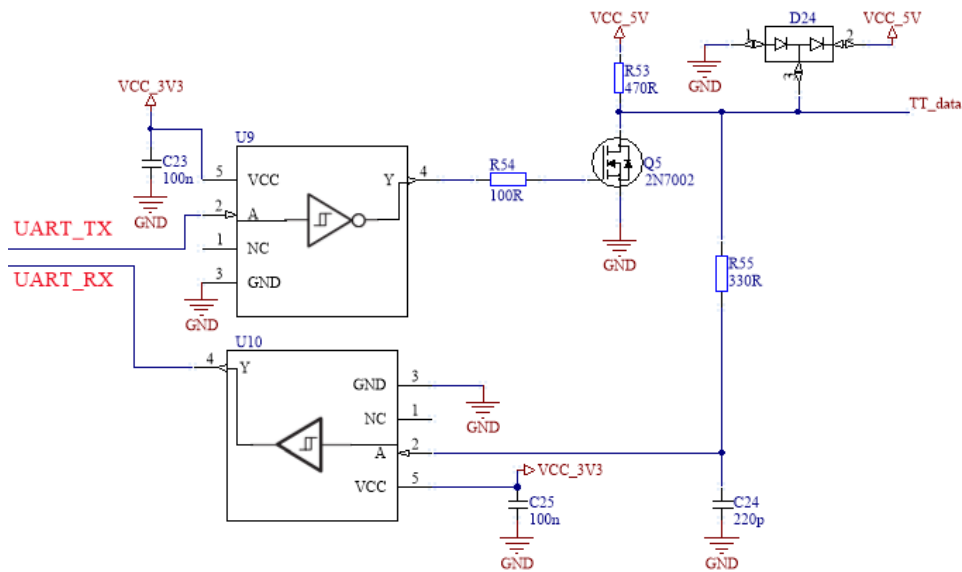
$$C_L - C_S = \frac{C_{41} \cdot C_{49}}{C_{41} + C_{49}} = 11 \text{ pF} \quad (3.5)$$

$$C_{41} = C_{49} = 22 \text{ pF} \quad (3.6)$$



Obrázek 3.5: Zapojení krystalového oscilátoru

Komunikaci s jednotkou *TireTemp*, která bezdotykově měří teplotu pneumatik, zajišťuje halfduplexní sběrnice UART vedená po jednom vodiči (viz obrázek 3.6). V zapojení je využito dvou hradel U9 a U10 se Schmittovým vstupem a NMOS tranzistoru Q5 typu 2N7002.

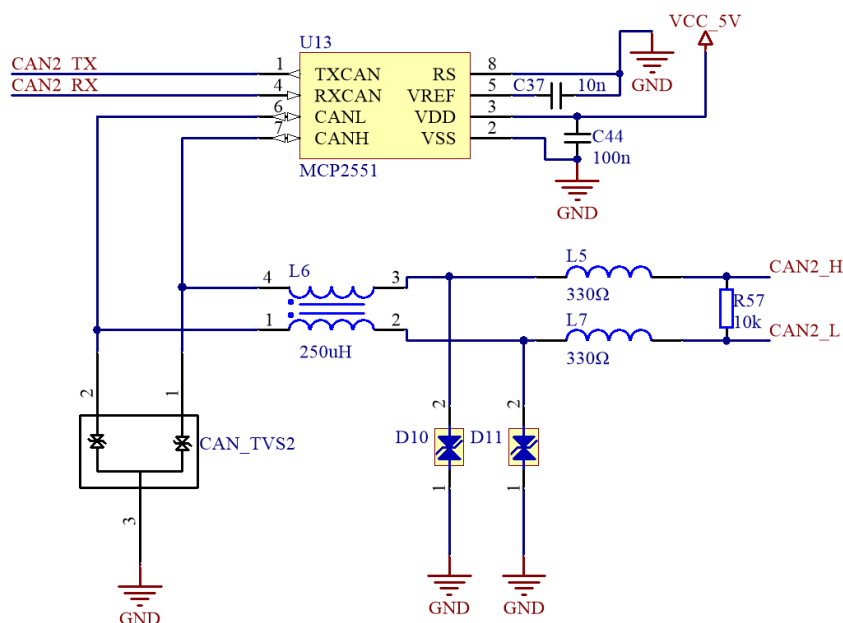


Obrázek 3.6: Zapojení pro komunikaci s jednotkou *TireTemp*

Komunikace mezi všemi jednotkami v elektrické formuli je realizována pomocí dvou sběrnic CAN (Controller Area Network), ta je velmi často využívána v automobilech a průmyslové automatizaci. Jednotka ECUF bude v pravidelných intervalech odesílat zprávy o stavech periférií, které vyhodnocuje a přijímat zprávy, na základě kterých bude zobrazovat informace na palubní desce.

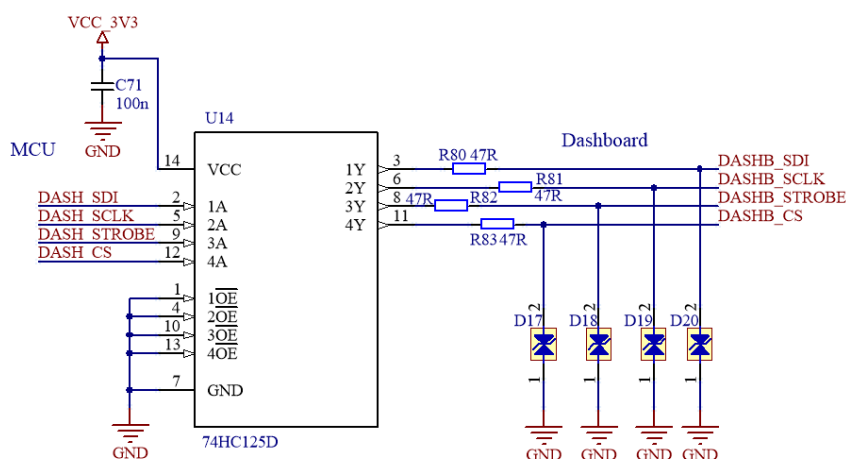
K tomuto účelu slouží CAN budič U13 typu MCP2551, jež funguje jako přijímač i vysílač zároveň [9]. Jeho zapojení je na obrázku 3.7, vstupy Tx a Rx jsou připojeny přímo k mikrokontroléru, napájecí vstup je opatřen blokovacím kondenzátorem C44 = 100 nF a vstup pro referenční napětí je přes kondenzátor C37 = 10 nF spojen se zemí.

Diferenční výstupy CANL a CANH jsou doplněny řadou ochranných prvků, proti ESD pulsům obvod chrání TVS diody (D10, D11 a CAN_TV2), vysokofrekvenční šum filtrují feritová jádra L5 a L7. Cívka L6 na společném jádře blokuje soufázové rušení, zakončovací rezistor R57 se standardně osazuje pouze na začátku a konci sběrnic, tudíž zde zůstane neosazen.



Obrázek 3.7: Zapojení CAN budiče

Ke komunikaci s LED budiči na palubní desce (viz část 3.2) slouží sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface), v tomto zapojení využívá jeden vodič pro data MOSI, další pro hodinový signál. Tyto dva ještě doplňuje vodič řídicí výstupy LED budičů a vodič pro signál *data strobe*. Signály jsou výkonově posíleny pomocí sběrnicového bufferu 74HC125D (U14), všechny jeho vstupy OE (Output Enable) jsou uzemněny, proto je buffer trvale otevřen. Zapojení sériového rezistoru na každém výstupu zajišťuje případné impedanční přizpůsobení, výstupy jsou též chráněny ESD ochranou v podobě TVS diody (předpokládaná délka kabelu mezi jednotkou ECUF a palubní deskou je 50 cm).



Obrázek 3.8: Buffer pro komunikaci s palubní deskou

3.1.3 Zpracování signálů ze senzorů

Senzory lze obecně definovat jako převodníky neelektrické veličiny, získané z okolního prostředí, na elektrický signál. Pro zpracování signálu ze senzorů se využívají elektronické jednotky, které ho často musí před jeho vstupem do procesoru upravit (zesílení, filtrace, AD převod apod.). Tyto jednotky bývají součástí nějakého systému, kde informace získané ze senzorů mohou být propojeny s řídicími signály či přenosem informace [10].

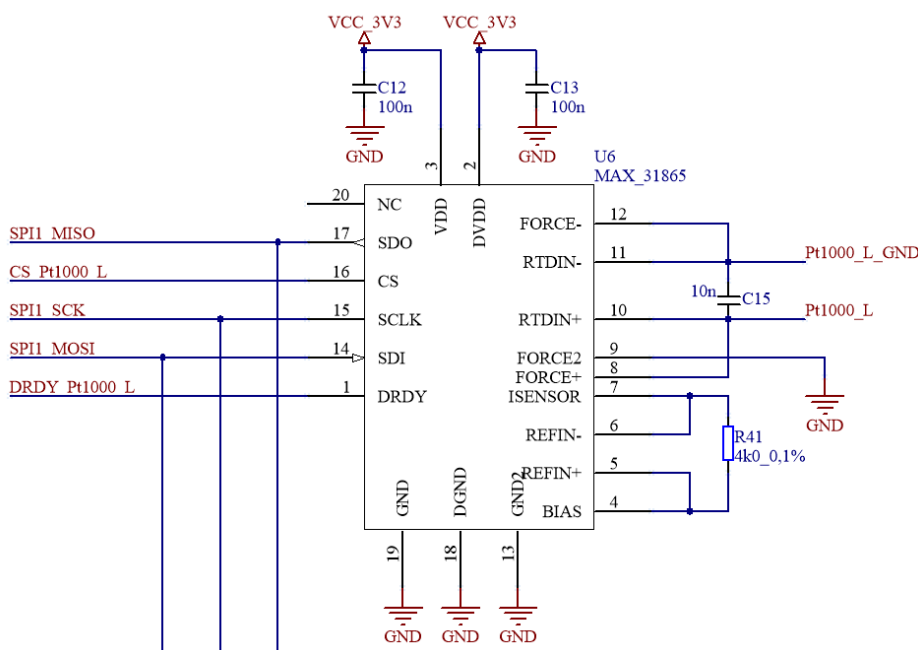
Podobný systém je i elektrická formule, která disponuje množstvím různých senzorů a elektronických jednotek zpracovávajících jejich signál. Jednotky dle těchto informací nějakým způsobem přímo reagují na nastalé situace (např. sepnutím ventilátoru, omezením točivého momentu apod.). Informace ze senzorů se též přenáší po sběrnici CAN tak, aby s nimi mohly nakládat i ostatní jednotky a také kvůli sběru jízdních dat a jejich následné analýze. Jednotka ECUF má za úkol zpracovávat údaje z měření teploty přených brzd a úhlu natočení volantu.

Při výběru senzoru pro měření teploty předních brzd byl kladen důraz na dobrou citlivost senzoru v poměrně velkém rozsahu měřených teplot (odhadem 0 až 350°C) a jeho mechanickou odolnost vzhledem k umístění. Termočlánky mají dobré mechanické vlastnosti, ale jejich citlivost je malá a přenos takového signálu na větší vzdálenosti (cca 1,5 m v okolí vodičů protékaných velkými proudy) by mohl způsobovat značnou chybu měření. Termistory disponují vysokou citlivostí, ale jejich teplotní koeficient odporu je silně závislý na teplotě, a proto mají nelineární výstup. U platinových odporových senzorů tento koeficient na teplotě téměř nezávisí, tudíž jejich výstupní údaj je takřka lineární funkcí teploty [10].

Na základě této úvahy byl pro měření teploty předních brzd zvolen platinový odporový senzor Pt1000 v pouzdru z nerezové oceli. Ke zpracování jeho signálu je využito analogově-digitálního převodníku MAX31865 (U6) v referenčním zapojení pro dvou vodičové připojení senzoru dle výrobce (viz obr. 3.9) [11].

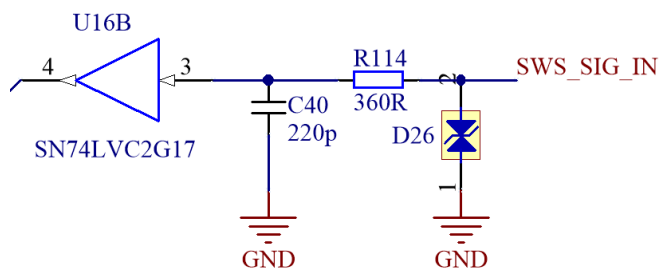
Tento integrovaný obvod je určen pro platinové senzory teploty, analogovou vstupní

hodnotu převádí na 15 bitovou digitální a tu je schopen odeslat pomocí sběrnice SPI (v tomto případě do MCU). Rezistorem R41 protéká stejný proud jako senzorem a napětí na něm slouží jako referenční napětí pro sigma-delta převodník. Na diferenční vstupy převodníku RTDIN+ a RTDIN- je přivedeno napětí senzoru Pt1000, výstupem AD převodníku je poměr odporů senzoru Pt1000 a rezistoru R41 [11]. Stejně zapojení je použito pro oba senzory Pt1000.



Obrázek 3.9: Zpracování Pt1000

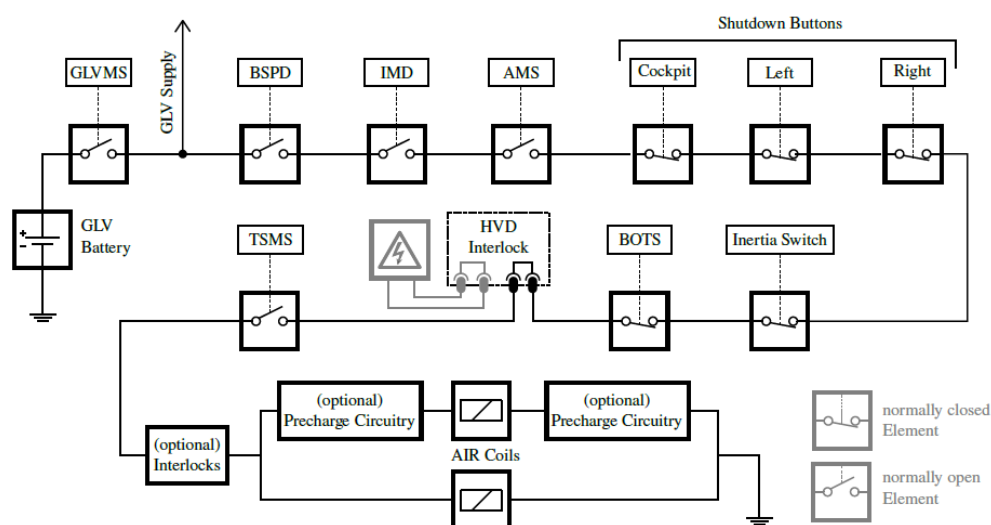
Jednotka ECUF vyhodnocuje úhel natočení volantu, jež je důležitý údaj pro kontrolu trakce vozu. Úhel natočení snímá magnetický enkodér AS5045, ten kombinuje Hallovy senzory a digitální zpracování signálu. Výstupem senzoru je 10 bitová absolutní hodnota úhlu natočení, kterou reprezentuje PWM signál, jehož střída se mění dle natočení volantu [12]. Tento signál je přiveden na vstup časovače mikrokontroléru, D26 slouží jako ESD ochrana, dolní propust filtruje vysokofrekvenční rušení a hradlo se Schmittovým vstupem upravuje signál na správné napěťové úrovni.



Obrázek 3.10: Zpracování SWS

3.1.4 Měření SDC

Ochranný obvod SDC (Shutdown circuit) je dle pravidel soutěže Formula Student definován jako sériové spojení konektorů, vypínačů, nouzových tlačítek a dalších bezpečnostních prvků vedené celou formulí. SDC je napájený z baterie nízkého napětí 24 V, prochází všemi bezpečnostními prvky a na svém konci ovládá dvě akumulátorová relé (*AIR coils* na obr. 3.11), která spínají napětí 400 V pro pohon vozu. V případě krizového stavu dojde k rozpojení SDC, ten rozepne akumulátorová relé a zastaví vůz [1].

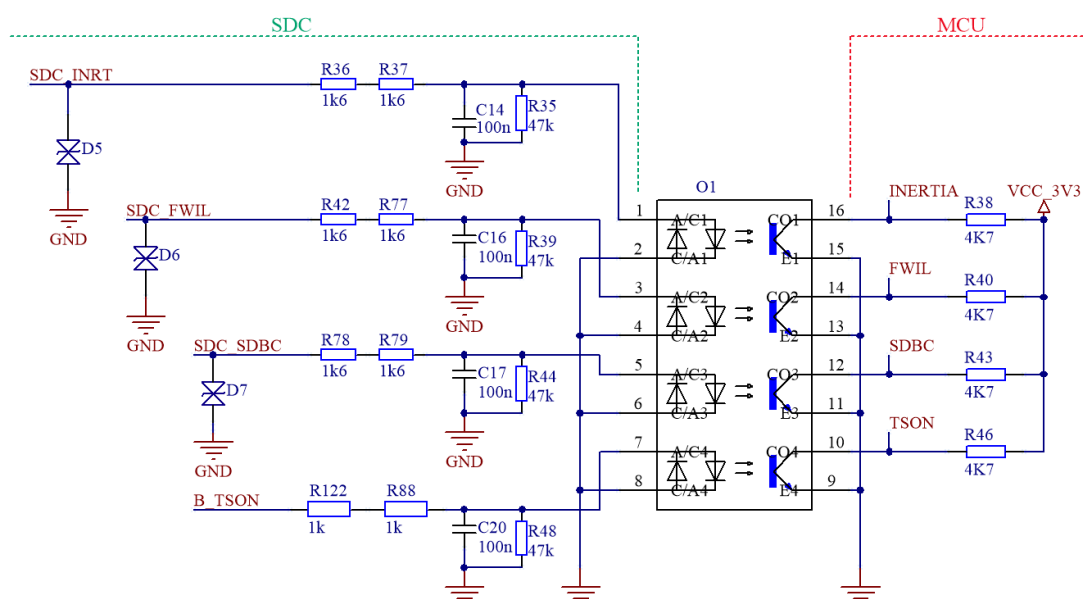


Obrázek 3.11: Principiální schéma SDC

Z principu fungování obvodu SDC vyplývá nutnost měřit jeho napětí za každým vypínacím prvkem tak, aby bylo možné snadno zjistit, kde byl obvod rozpojen a tento problém vyřešit. Jednotka ECUF měří napětí na třech místech SDC a rozhoduje zda je v těchto bodech požadovaných 24 V, pokud tomu tak není, ohlásí chybu v daném místě SDC.

Pro měření je použito zapojení s optočlenem ACPL-244 (O1 na obr. 3.12), každý vstup ze strany SDC je chráněn TVS diodou proti indukovaným napěťovým špičkám. Proud vstupující do optočlenu je omezen dvojicí sériových rezistorů na hodnotu cca 7 mA, rezistory zároveň tvoří s paralelním kondenzátorem dolní propust, jež filtruje případné kolísání napětí. Paralelně ke vstupu je též připojen pull-down rezistor, který definuje nulové napětí při rozpojení SDC. Na straně mikrokontroléru je každý kolektor optočlenu připojen přes pull-up rezistor na napětí 3,3 V. Je-li SDC v některém bodě rozpojen na daném vstupu MCU bude logická 1, v opačném případě logická 0. Obdobné zapojení je použito i pro vyhodnocení stavu tlačítek na palubní desce.

FWIL (Front Wheel Interlock) je prvek SDC, který se rozpojí při případném utržení jednoho z předních kol. Fyzicky je realizován jako kabelová smyčka s konektory vedená po obou předních nápravách až ke kolům, v případě poškození nápravy se konektor rozpojí. Z konektoru FWIL pokračuje SDC do setrvačného vypínače *INERTIA switch*,



Obrázek 3.12: Zapojení pro měření SDC

který ho rozepne v případě nárazu. Pravidla soutěže přikazují použít „Sensata Re-settable Crash Sensor“ nebo jeho ekvivalent a dále definují, že tento vypínač se musí rozepnout při decelaraci v rozmezí 6 g až 11 g [1]. Poslední prvek SDC, vyhodnocovaný jednotkou ECUF, je tlačítko pro nouzové zastavení umístěné v kokpitu vozidla - SDBC (Shutdown Button Cockpit). Nese označení OMRON A165E-LM, tlačítko po stisku bliká, do výchozí polohy se přepne otočením hmatníku ve směru hodinových ručiček [13].



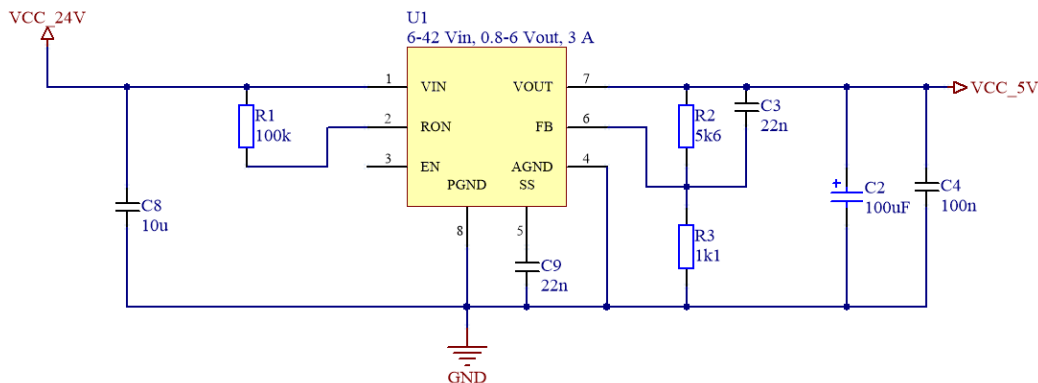
Obrázek 3.13: Setrvačné nárazové senzory od firmy Sensata [18]



Obrázek 3.14: Bezpečnostní tlačítko OMRON [19]

3.2 Schéma palubní desky

Palubní deska je napájena z jednotky ECUF napětím 24 V, toto napětí zde snižuje na 5 V modul spínaného step down regulátoru *MagI³C Power Module* (U1) od firmy Würth Elektronik. Modul má nastavitelné výstupní napětí v rozsahu 0,8 V - 6 V a maximální výstupní proud 3 A, je zapojen v referenčním zapojení s hodnotami součástek dle doporučení výrobce [14].



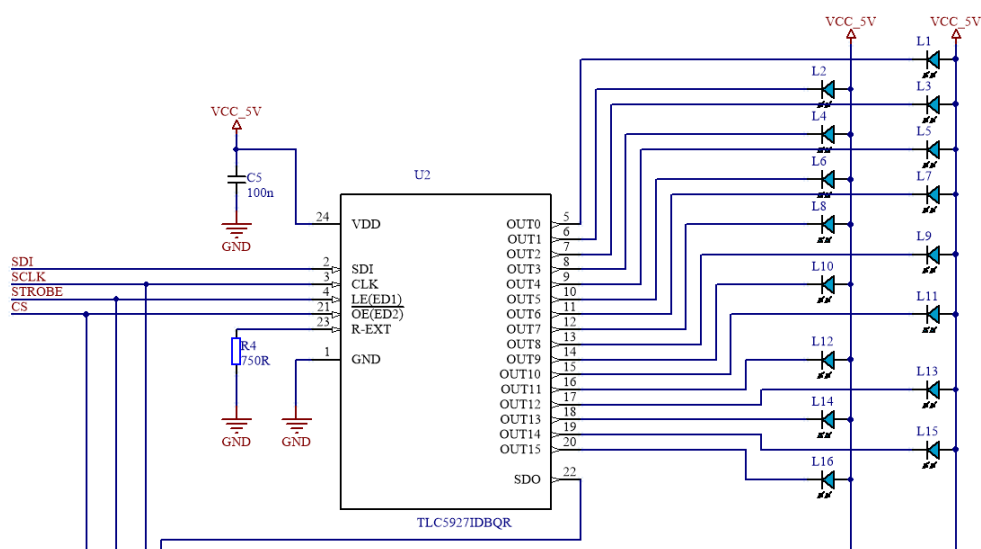
Obrázek 3.15: Napájecí zdroj palubní desky

Pro řízení LED signalizace byly vybrány 16 kanálové LED budiče TLC5927, ty fungují jako proudové zdroje, tudíž není třeba každé LED předřazovat rezistor. Proud LED nastavuje externí rezistor R4 (viz obr. 3.16), jehož hodnotu lze vypočítat ze vztahu

$$I_{OUT} = \frac{1,25}{R_{ext}} \cdot 15, \quad (3.7)$$

kde I_{OUT} je požadovaný proud LED diodou a $R_{ext} = R4$, případně tuto hodnotu odhadnout dle charakteristiky v katalogovém listu [15]. Pro zvolený odpor $R4 = 750 \Omega$ odpovídá proud jednou LED $I_{OUT} = 25 \text{ mA}$, hodnota rezistoru R4 může být pozměněna pro účely případné jasové optimalizaci. Komunikace s budičem probíhá po sběrnici SPI (viz část 3.1.2).

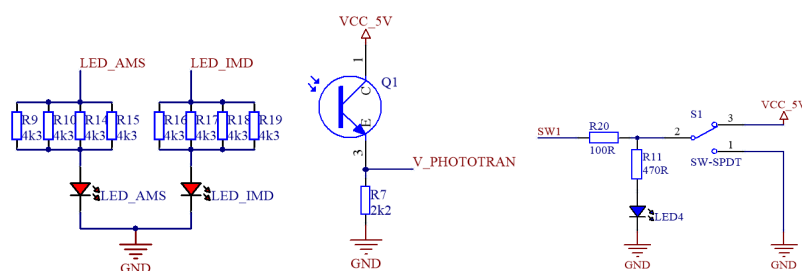
LED budiče se na palubní desce nacházejí celkem čtyři a všechny jsou řazeny za sebou v zapojení *daisy chain*. Z celkového počtu 64 LED buzených těmito budiči je



Obrázek 3.16: Zapojení LED budiče

48 použito na bargraf *BATTERY STATUS*, který poskytuje informaci o stavu nabití trakčního akumulátoru. Tyto LED jsou od firmy Osram v pouzdru 0603 o svítivosti cca 650 mcd a je plánováno osadit střídavě LED zelené a červené barvy, aby z nich následně mohla být skládána barva celého bargrafu. Další 3 LED slouží jako indikátory chybových či funkčních stavů, z důvodu barevného odlišení jednotlivých kontrolky jsou tyto 3 LED v barvách červená, žlutá a modrá, všechny v pouzdru 3528 o svítivosti přibližně 1200 mcd. Zbýlých 13 LED bude fungovat jako servisní osvětlení monokoku.

Palubní deska musí dle pravidel [1] obsahovat dvě červené kontrolky AMS a IMD (viz část 2.1), které musí být spínány analogově. Těmto diodám jsou pouze předřazeny rezistory omezující proud tekoucí skrz ně a za jejich rozsvícení je zodpovědná jednotka akumulátoru (ECUA). Dále se zde nachází fototranzistor pro měření osvětlení palubní desky, na základě kterého bude regulován jas LED, tak aby byly dobře viditelné i za přímého slunečního svitu a zároveň příliš neoslňovali pilota při snížené viditelnosti. Poslední částí palubní desky jsou tři páčkové přepínače s LED indikací sepnutí, jimž může být softwarově přiřazena libovolná funkce.



Obrázek 3.17: Zapojení LED AMS a IMD, fototranzistoru a přepínače

V této kapitole byly popsány důležité bloky schématu obou zařízení, kompletní schéma je přiloženo v příloze B.

Kapitola 4

Návrh desek plošných spojů

Návrh desek plošných spojů spočívá v tvorbě pouzder součástek, nastavení pravidel pro návrh plošného spoje, definici obrysů desky, rozmístění součástek, návrhu vlastních vodivých spojů, finálních úpravách (popisky, měřicí body apod.), poslední krok je kontrola návrhových pravidel a generování výrobních dat [2].

Pouzdra všech součástek byla definována již při návrhu schématu, to nyní usnadní návrh plošného spoje. V této práci jsou preferovány součástky pro povrchovou montáž (s ohledem na ruční osazování), pasivní součástky pak v pouzdru 0603. Při definici návrhových pravidel hraje klíčovou roli vyrobiteľnosť desky, ta se odvíjí od technologických možností daného výrobce [2]. Navrhované desky vyrobí firma PragoBoard s.r.o., s ohledem na její výrobní možnosti je minimální izolační vzdálenost a šířka spoje nastavena na 0,2 mm, minimální průměr vrtaného otvoru na 0,3 mm.

Rozmístění součástek na desce vyžaduje zásadní pozornost, nejdříve je třeba udělat rozvalu o rozmístění jednotlivých skupin součástek (analogová a digitální část, zdroj, konektory atd.) a teprve poté přistoupit k vlastnímu rozmísťovaniu. Zároveň je nutné zohľadnit spôsob osazovania navrhovanej desky a také fakt, aby po osazení součástek byl vidět jejich servisní potisk. Obecně lze říci, že na správném umístění součástek závisí správná funkce obvodu a této činnosti zpravidla věnujeme více času než samotnému návrhu vedení spojů [2].

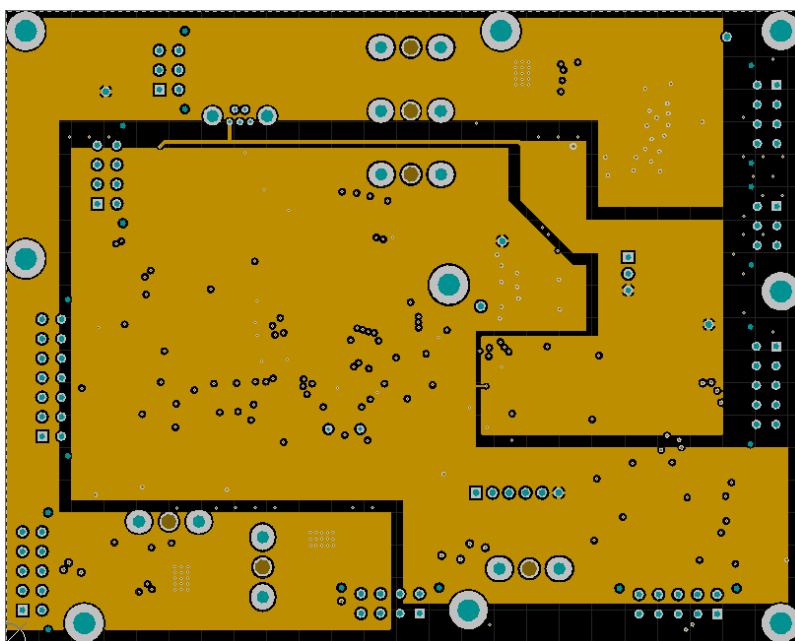
Při návrhu vodivých spojů mezi součástkami je třeba dbát důležitých zásad, jako jsou rozložení spojů v jednotlivých vrstvách (vedení kritických spojů ve vrstvách sousedících s rozlitou mědí), vhodně vedené napájecí a zemnicí spoje, délka vodičů (s délkou spoje rostou jeho parazitní vlastnosti – odpor, indukčnost, kapacita, impedance) a jejich proudová zatížitelnost, tu lze pro vodiče ve vnějších vrstvách vypočítat dle normy IPC-D-275 jako

$$I = 0,0647 \cdot (DT^{0,4281}) \cdot (A^{0,6732}), \quad (4.1)$$

kde $I(A)$ je maximální proud spoje, $DT(^{\circ}C)$ je nárůst okolní teploty a $A(mil^2)$ je plocha příčného řezu spojem. Proudovou zatížitelnost lze též odečíst z diagramu na webových stránkách firmy PragoBoard s.r.o. [16]. Další návrhová zvyklost doporučuje „rozliti“ mědi na místa, kde nevedou spoje a její připojení k zemi, to snižuje impedanci, vliv přeslechů, vyzařování apod. [2] Obě desky plošných spojů jsou navrženy v programu Altium Designer.

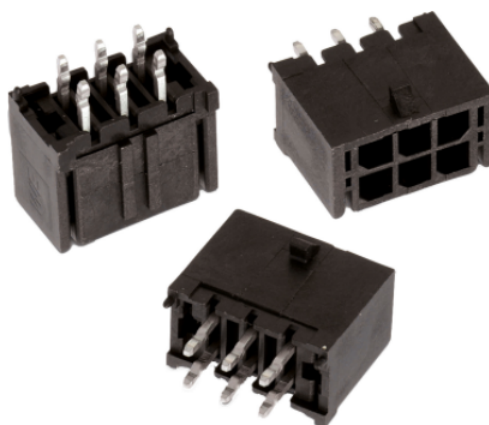
4.1 DPS jednotky ECUF

Jednotka ECUF je čtyřvrstvá deska plošných spojů o rozměru 122 mm × 97 mm a celkovém počtu součástek 233. Vzhledem k poměrně velkému počtu součástek byla zvolena varianta DPS o čtyřech vrstvách, to umožní vyšší hustotu integrace a usnadní vedení spojů. Řazení vrstev je po řadě: přední vrstva, napájecí vrstva, zemní vrstva a zadní vrstva. Všechny signálové spoje jsou vedeny v přední a zadní vrstvě, napájecí vrstva obsahuje tři rozlité plochy (viz obr. 4.1) – každá pro jedno z napájecích napětí (24 V, 5 V a 3,3 V), zemní vrstva je jednolitá plocha připojená na zem. V obou signálových vrstvách jsou, vzájemně (i se zemní vrstvou) prokovy propojené, zemní plochy rozlité mědi. Všechny součástky jsou, s ohledem na jednodušší osazování a testování, umístěny na přední straně DPS. Jednotka bude umístěna v kevlarové krabici, ke které se upevní devíti šrouby velikosti M3.



Obrázek 4.1: Napájecí vrstva jednotky ECUF

Na desce je použit jednotný typ konektoru WR-MPC3 od firmy Würth Elektronik, tyto se nacházejí po obvodu DPS ve směru hlavních kabelových svazků. Kabelové svazky budou připojeny ke krabici jednotky ECUF prostřednictvím konektorů DE-UTSCH Autosport od firmy TE connectivity (obr. 4.3), z nich bude svazek rozdělen do jednotlivých konektorů na DPS. Nejvyšší součástkou na desce jsou držáky na autopojistky, montážní otvory se nacházejí v těsném okolí těchto elektromechanických prvků, protože zde bude DPS nejvíce mechanicky namáhána (viz obr. 4.4). Na desce se dále nalézá programovací konektor s tlačítkem pro ruční reset MCU a mini USB konektor typu B pro případné napájení desky 5 V z počítače.



Obrázek 4.2: Konektory typu WR-MPC3 [20]



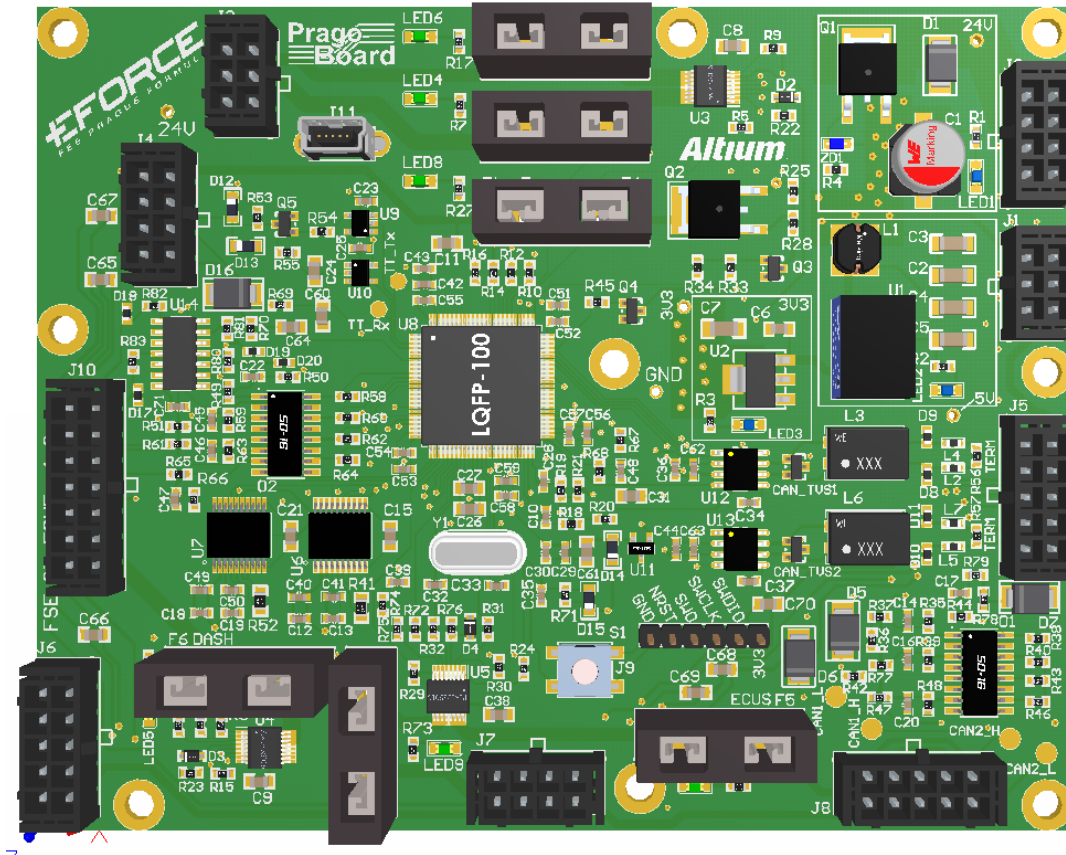
Obrázek 4.3: Konektory DEUTSCH Autosport [21]

V pravé horní části DPS se nachází napájecí zdroj, každý jeho stupeň má orámování a obsahuje měřicí bod s popiskem. Dále jsou v pravé části oba CAN budiče se svými ochrannými prvky, které jsou umístěny co nejbližše konektoru tak, aby se rušení nedostávalo do středu DPS k mikrokontroléru. Obě sběrnice CAN k sobě mají připojené testovací plošky (v pravém dolním rohu).

Uprostřed desky je umístěn mikrokontrolér s blokovacími kondenzátory v těsné blízkosti napájecích vývodů. Nutnost užití blokovacích kondenzátorů vyplývá z faktu, že zpoždění průchodu signálu (tedy i napájení) není nulové. Také při skokové změně spotřeby integrovaných obvodů lineární napěťový regulátor není schopen reagovat dostatečně rychle (reakční doba je řádově v jednotkách μs). Právě na překlenutí této doby je nezbytné integrovaným obvodům poskytnout napájení z fyzicky velmi blízkého

zdroje, kterým je blokovácí kondenzátor [2]. Blokovácí kondenzátor je přiřazen ke všem integrovaným obvodům na obou navrhovaných deskách desce.

V levé části desky se nachází zapojení pro komunikaci s jednotkou *TireTemp* pomocí sběrnice UART, kanály Rx a Tx této sběrnice jsou, stejně jako CAN, opatřeny měřicími ploškami. Konektor J10 slouží k připojení palubní desky, v jeho blízkosti je, spolu s ochrannými diodami, umístěn buffer pro sběrnici SPI a také optočlen pro vyhodnocení stavu tlačítek. Dále se zde nalézají dva integrované obvody, které zpracovávají signál ze senzorů Pt1000.

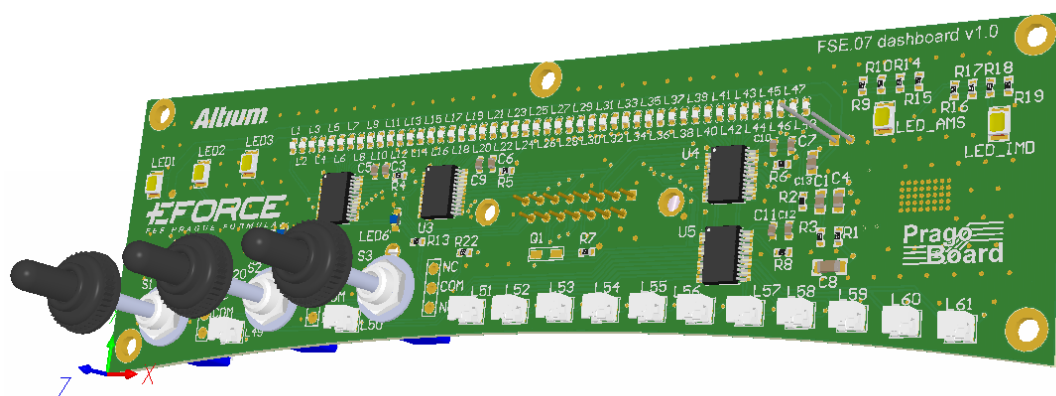


Obrázek 4.4: Horní 3D pohled na DPS jednotky ECUCF

4.2 DPS palubní desky

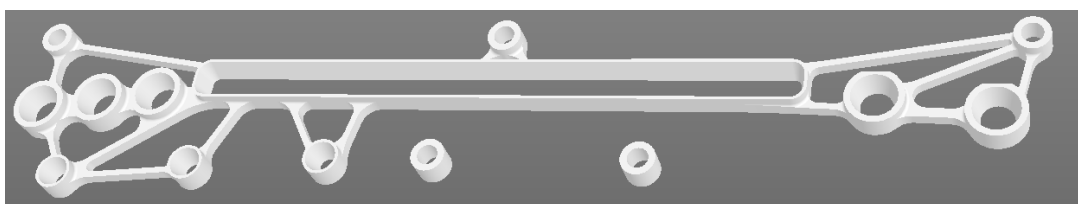
Palubní deska je dvouvrstvá deska plošných spojů s rozměry 170 mm × 50 mm, její dolní hrana je zaoblena do rádiusu kopírujícího tvar části monokoku formule, ke kterému bude připevněna. Oběma vrstvami vedou signálové spoje a stejně jako v případě jednotky ECUCF jsou zde vzájemně prokovené zemní plochy rozlité mědi. Z celkových 114 součástek se jich většina nachází na přední straně desky, na zadní je pouze konektor typu D-Sub ve variantě s 15 piny, spínaný buck regulátor a filtrační elektrolitický kondenzátor. Páčkové přepínače budou montovány přímo do DPS, tudíž jejich větší část vyčnívá na zadní stranu desky.

LED signalizace je umístěna v horní části desky tak, aby byla co nejbližší zornému poli pilota formule. LED ve střední části tvoří bargraf o délce cca 11 cm, v něm se nacházejí střídavě diody zelené a červené barvy. Bargraf po obou stranách doplňují signalizační LED, které sledují tvar zaoblení desky. Dolní hranu lemují devadesátistupňové bílé LED, nad ním, zhruba uprostřed desky, je umístěn fototranzistor, toto umístění by mělo zajišťovat, že fototranzistor nebude ovlivňován svitem LED. Každý LED budič je situován v blízkosti diod, které spíná.



Obrázek 4.5: 3D pohled na DPS palubní desky

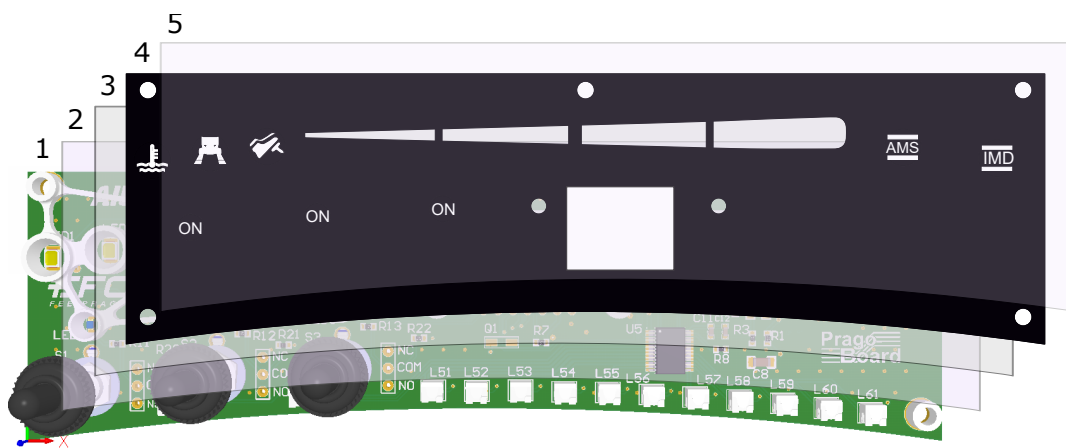
Pro usměrnění světla emitovaného svítivými diodami byl navržen a vymodelován reflektor (viz obr. 4.6), který zajistí, že LED budou svítit pouze dopředu. Tento reflektor je vysoký zhruba 5 mm (stejně jako stranové LED – nejvyšší součástka na DPS) a obklopuje každou LED kuželovitou plochou, bargraf poté jako celek ve tvaru obdélníku se zkosenými hranami. Jednotlivé části propojují vhodně rozmístěná žebra, těmi jsou také připojeny distanční sloupky blízkých montážních otvorů. Reflektor bude vytisknut 3D tiskárnou technologie FDM z materiálu ABS bílé barvy.



Obrázek 4.6: 3D model reflektoru na palubní desku

Z koncepce palubní desky plyne, že viditelnou částí desky mají být pouze přepínače a LED signalizace. Z toho důvodu bude DPS překryta několika vrstvami dle obrázku 4.7, kde vrstva číslo 1 představuje DPS s přiloženým reflektorem. Vrstvy 2 a 3 jsou fólie rozptylující světlo, protože LED představuje bodový zdroj světla, je třeba ho „homogenizovat“ v celém průměru kuželovitého reflektoru. Čtvrtá vrstva – průsvitová fólie – definuje výsledný tvar symbolu kontrolky a bargrafu a maskuje všechny ostatní části plošného spoje. Poslední pátá vrstva je plexisklo, které ochrání předchozí části

před nežádoucími mechanickými vlivy (roztržení, otěr apod.). V závislosti na způsobu montáže palubní desky (uvnitř či vně monokoku) může být mezera mezi DPS a překryvnými vrstvami vyplněna čirým epoxidem, tak se palubní deska utěsní proti vlhkosti.



Obrázek 4.7: Překryvné vrstvy palubní desky

Kapitola 5

Osazování a testování desek plošných spojů

Vzhledem k prototypové povaze obou vyráběných zařízení je od začátku návrhu počítáno s ručním osazováním všech komponent na DPS. Pro tuto metodu pájení je třeba vybrat vhodné součástky a při návrhu plošného spoje dbát na větší vzdálenosti mezi součástkami a jejich pouzdra s většími pájecími ploškami [2]. K osazení obou desek bude použita standardní hrotová páječka, případně pájecí stanice s horkovzdušnou pistolí, samozřejmostí pro správné připájení součástek je použití kvalitního tavidla.

Před samotným osazením plošného spoje součástkami je třeba se zamyslet nad funkcí zařízení jako celku a funkcí jednotlivých částí. Na základě toho při osazování postupovat dle správné strategie a každý osazený funkční blok oživit a otestovat, zda funguje podle očekávání. Tímto způsobem lze snadno objevit případné chyby v návrhu a eliminovat tak možnost poškození drahých součástek (v horším případě i plošného spoje).

5.1 Osazování jednotky ECUF

Po zvážení všech možností a rizik při osazování a oživování jednotky ECUF byl navržen následující postup pro osazování jednotlivých bloků:

1. Napájecí zdroj

Osazení vstupního tranzistoru a obou snižujících zdrojů napětí (tzn. součástek D1, Q1, ZD1, R1, R2, R3, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, U1, U2, L1, LED1, LED2, LED3) a připojení napětí 24 V na napájecí svorky desky. Napětí na měřicích bodech musí mít velikost 5 V, resp. 3,3 V, proměřit též lze ostatní napájecí plošky na desce. Následuje test jednotlivých bloků zdroje při zátěži a pozorování, zda mají stabilní výstupní napětí a nepřehřívají se.

2. Spínací prvky

Připájení všech (integrovaných i diskretních) spínacích obvodů (součástky U2, U3, U4, Q2, Q3, C8, C9, C10, C11, C28, C38, C39, D2, D3, D4, D12, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED 10, R5, R6, R9, R10, R11, R14, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R32, R33, R34, R47, R50, R69, R70, R71, R72, R73, R74, R75, R76, R84, R86, R87) a vyzkoušení funkčnosti

postupným přikládáním logické jedničky na jejich řídicí vstupy. Pojistky byly prozatím nahrazeny drátovými propojkami.

3. Optočleny

Osazení optočlenů a souvisejících součástek (tzn. O1, O2, D5, D6, D7, C14, C16, C17, C20, C22, C45, C46, C47, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R42, R43, R44, R46, R48, R49, R51, R58, R59, R60, R61, R62, R63, R64, R65, R66, R77, R78, R79, R85, R88, R121, R122), postupným buzením jejich vstupů napětím 24 V a 5 V (SDC, tlačítka) se na výstupech objevují příslušné logické úrovně.

4. Napěťová reference a krystalový oscilátor

Ověření funkce těchto dvou prvků (součástky U11, D14, Y1, C29, C31, C41, C49, C70) je důležité pro zajištění správné funkce mikrokontroléru. Na výstupu napěťové reference musí být přesně 3 V, osciloskopem lze změřit, zda krystalový oscilátor kmitá na patřičné frekvenci.

5. MCU a zbývající komponenty

Vzhledem k tomu, že funkce všech součástek, které nebyly dosud osazeny, je nějakým způsobem spjata s mikrokontrolérem, lze je v tomto kroku osadit najednou s MCU. Jedná se zejména o části pro komunikaci (sběrnice CAN, UART, SPI) a o zapojení pro vyhodnocení senzorů (Pt1000, senzor natočení volantu, fototranzistor), tzn. všechny ostatní součástky než výše jmenované. Plnou funkčnost těchto částí bude možné otestovat až po nahrání řídicího programu.

6. Elektromechanické součástky

Montáž konektorů a pojistkových držáků je posledním krokem při osazování jednotky ECUF, jejich dřívější osazení by mohlo znesnadnit pájení malých SMD součástek.

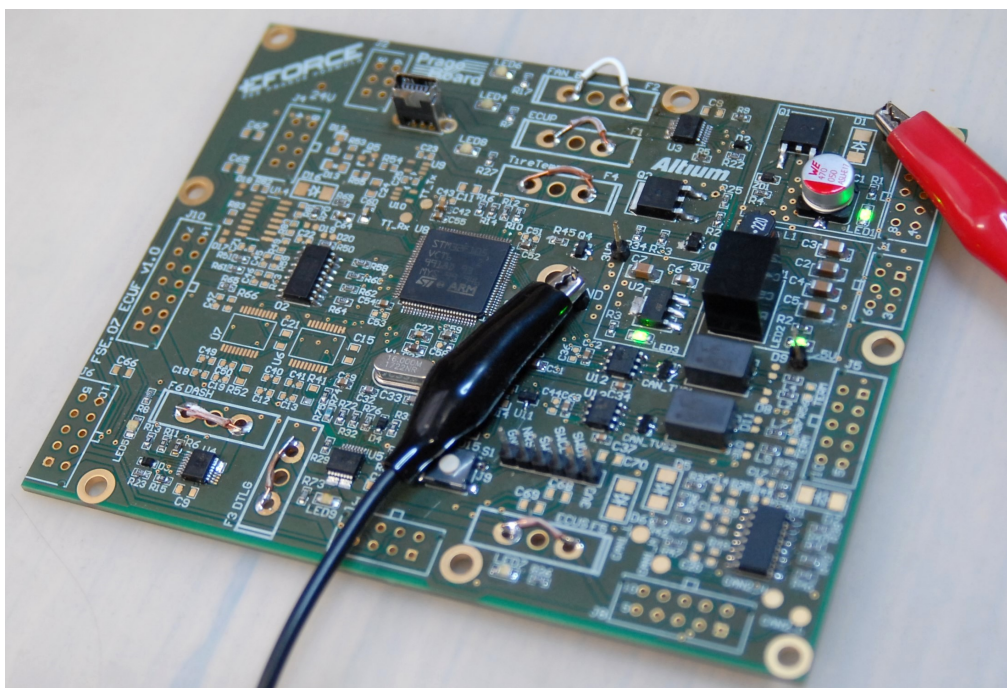
Na jednotce ECUF ve stavu osazení dle obrázku 5.1 nebyly zjištěny výrazné návrhové chyby mající vliv na funkčnost obvodu. Jako nedostatek se jeví malý počet zemních prokůvů a jejich relativně velká vzdálenost od zemnicích vývodů součástek. Z toho důvodu se v některých místech proudová cesta uzavírá po zbytečně dlouhé dráze, dalším důsledkem je vznik nepřipojených rozlitých ploch.

5.2 Osazování palubní desky

Postup osazování palubní desky je obdobný jako u jednotky ECUF, drobným zjednodušením je, že neobsahuje pájení většího počtu integrovaných obvodů, ale skládá se spíše ze součástek se dvěma vývody. Postup popisují následující body:

■ Napájecí zdroj

První krok je opět osazení snižujícího zdroje napětí U1 a součástek s ním souvisejících (R1, R2, R3, C2, C3, C4, C8, C9). Následuje měření napětí na všech napájecích ploškách desky, které musí být 5 V a test zatíženého zdroje.



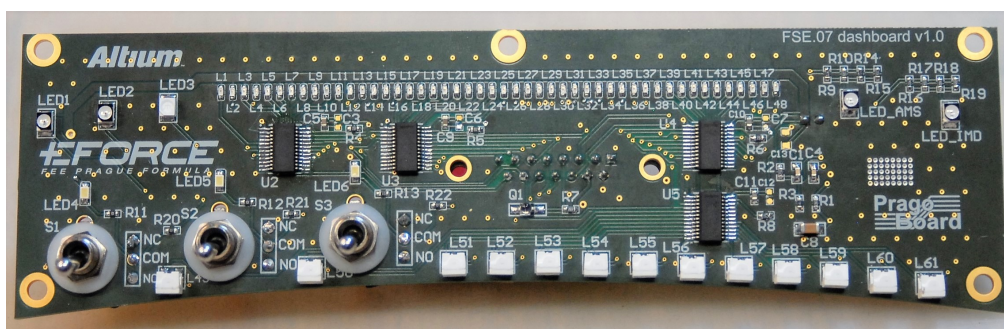
Obrázek 5.1: Částečně osazená jednotka ECUF

- **Fototranzistor, LED a jejich budiče**

V tomto kroku byl osazen fototranzistor (Q1, R7) a změřen jeho výstupní signál v závislosti na změně osvětlení. Následuje osazení všech LED (L1-L64, LED4, LED5, LED6, LED_AMS, LED_IMD, R9, R10, R14, R15, R16, R17, R18, R19) a poté LED budičů (U2, U3, U4, U5, C5, C6, C7, C12, R4, R5, R6, R8).

- **Elektromechanické součástky**

Na závěr proběhla montáž páčkových přepínačů (S1, S2, S3) k DPS a jejich připojení pomocí drátových propojů. Poslední osazená součástka je konektor na zadní straně desky.



Obrázek 5.2: Osazená palubní deska

Během osazování a postupného testování nebyla na palubní desce zjištěna žádná závažná závada, tudíž lze přistoupit k testu celku. Pro rozsvícení všech LED buzených

budiči je nutné jim prostřednictvím sběrnice SPI poslat data odpovídající číslu 2⁶⁴.

Motiv průsvitové fólie pro palubní desku byl nakreslen ve vektorovém editoru Corel Draw a následně vytisknut na laserové tiskárně. Kompletní palubní deska se všemi překryvnými vrstvami, kromě plexiskla (dle obr. 4.7) je vyobrazena na obrázku 5.3, na něm je vidět, že pro ostřejší obrysy kontrolky je třeba použít metodu tisku se sytější černou barvou (např. sítotisk).



Obrázek 5.3: Zkompletovaná plně rozsvícená palubní deska

Kapitola 6

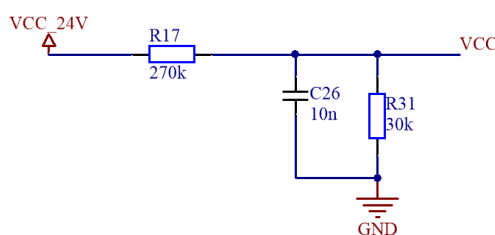
Změny provedené v druhé revizi

Během vývoje a výroby monopostu FSE.07 došlo k určitým koncepčním změnám celého vozu. Z toho plyne i několik nových požadavků týkajících se jednotky ECUF a palubní desky, na základě toho, je třeba navrhnout a vyrobit druhé revize obou zařízení tak, aby odpovídaly novému zadání. Také je zde prostor pro odstranění nedostatků prvních verzí plošných spojů.

6.1 Úpravy jednotky ECUF

Jednotka ECUF musí nově napájet napětím +24 V jednotku ECUG (inerciální měřicí jednotka), to je realizováno jednoduše – připojením volného kanálu v obdenném zapojení jako na obrázku 3.2. Na DPS to znamená přidání jednoho pojistkového držáku a LED indikátoru.

Dále je požadováno měření vlastního napájecího napětí jednotky ECUF pro indikaci případné poruchy baterie nízkého napětí. K tomu slouží jednoduché zapojení na obr. 6.1, na vstup napěťového děliče je přivedeno napájecí napětí +24 V, výstup v rozsahu 0 V až 3 V je připojen k AD převodníku mikrokontroléru. Kondenzátor C26 a rezistor R17 spolu tvoří filtr dolní propust, ten odruší případný šum indukovaný na napájecím napětí a eliminuje tak možnost výraznější chyby měření.



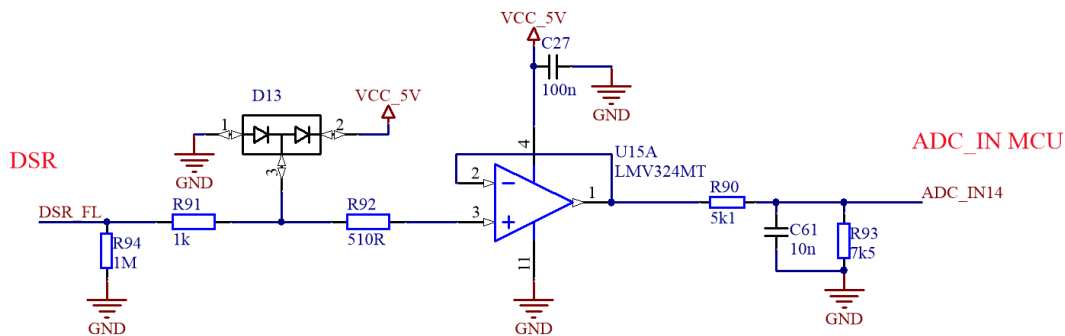
Obrázek 6.1: Zapojení pro měření napájecího napětí

Větší zásah do designu jednotky ECUF tvoří požadavek na zpracování výstupu ze senzoru DSR (damper sensor - lineární potenciometr měřící výchylku pružin náprav, obr. 6.2) pro všechna čtyři kola.



Obrázek 6.2: Lineární potenciometr DSR [22]

Potenciometr má odpor dráhy 10 k Ω a je napájen 5 V, sériově s ním jsou zapojeny dva rezistory 470 Ω (na straně napájení i země), které omezí případný zkratový proud. Napětí jezdce snímá zapojení dle obr. 6.3, signál se přivádí do napěťového sledovače (bufferu) s operačním zesilovačem (typ LMV324 - čtyři *rail-to-rail* operační zesilovače [17]), ten impedančně oddělí napěťový signál a nedochází tak k zatěžování senzoru. Následuje napěťový dělič s RC filtrem, který zmenší rozsah měřeného napětí na 0 V – 3 V pro AD převodník mikrokontroléru. Vstup bufferu je chráněn upínací diodou proti ESD pulsům, pull-down rezistor R94 umožňuje detekovat závady, jako jsou odpojený senzor, zkrat do napájení či země.

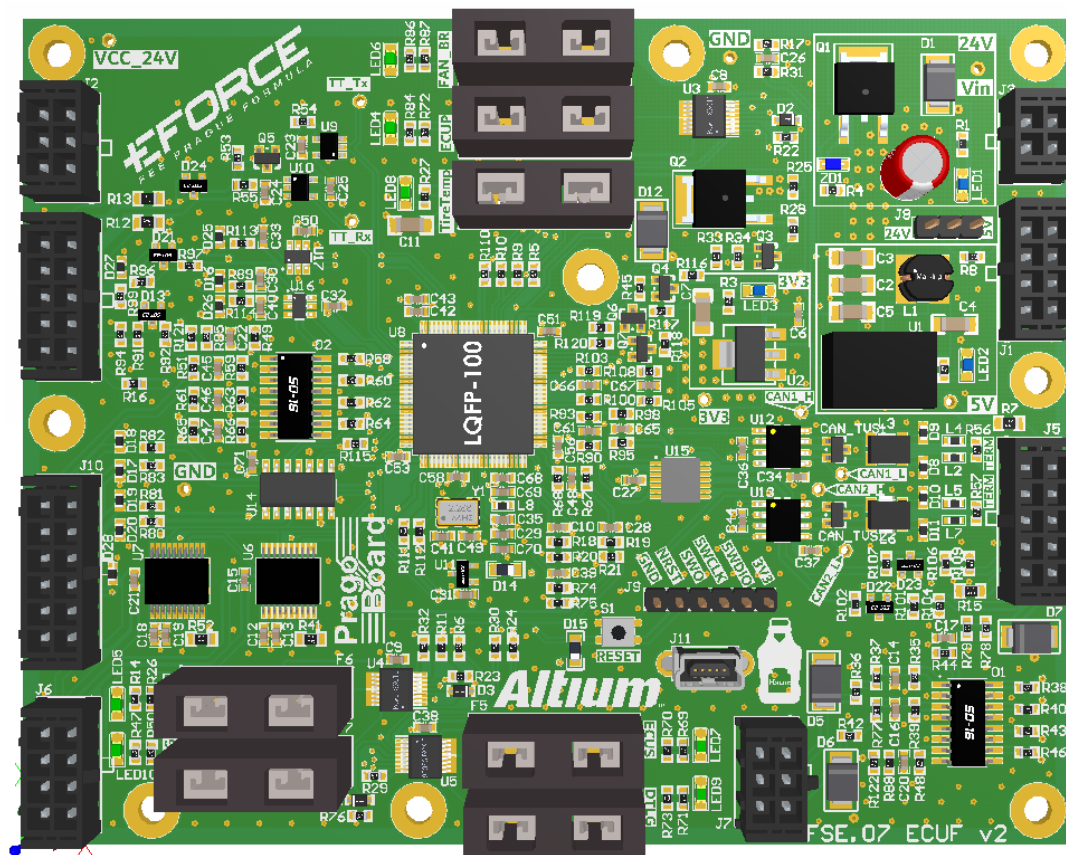


Obrázek 6.3: Zapojení pro zpracování DSR

V rámci změn v druhé revizi bylo z jednotky ECUF vyvedeno PWM řízení ventilátorů předních brzd a jeden rezervní vstupní pin mikrokontroléru, tento vstup i výstup jsou ošetřeny obdobným způsobem jako na obrázku 3.10. Dále přibyly sériově zapojené PTC (pozistory), na napájení SWS a tlačítek TSON a START, fungují zde jako vratná tepelná pojistka. V případě zkratu se oteplí protékajícím zkratovým proudem, tím zvětší svůj odpor a tento proud omezí. Pro volbu napájecího napětí tlačítek TSON a START je nově přidána propojka umožňující napájení z 5 V nebo 24 V (napětí bude zvoleno podle jasů podsvícení tlačítek).

Vzhledem k uvedeným změnám počet součástek na DPS vzrostl na 279, z toho důvodu bylo nutné značně přepracovat layout plošného spoje. Na desku přibyl další držák na pojistku a zejména z důvodu řešení rozbočení sběrnic CAN pomocí odboček v kabeláži, bylo možné odebrat jeden konektor. Z dalších úprav lze jmenovat změnu pouzdra krystalového oscilátoru na menší SMD provedení (pouzdro 5032), zmenšeno bylo též resetovací tlačítko a cívky L3 a L6 (viz obr. 3.7).

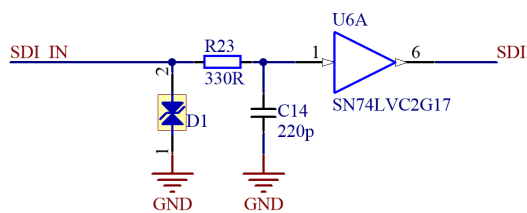
Některé pomocné signálové spoje nově vedou i napájecí vrstvou, oproti první verzi DPS se zvětšil počet zemních prokůvů (zkrácení proudových drah) a blokovací kondenzátory byly posunuty ještě blíže napájecím vývodům integrovaných obvodů. Horní 3D pohled na DPS jednotky ECUF verze 2 je na obrázku 6.4, obrázky DPS po jednotlivých vrstvách lze najít v příloze B.



Obrázek 6.4: 3D zobrazení druhé verze DPS jednotky ECUF

6.2 Úpravy palubní desky

Změny provedené v druhé verzi palubní desky nejsou příliš výrazné, ve schématu se jedná pouze o přidání několika blokovacích kondenzátorů 100 nF za každou osmou LED pro přísun energie při spínání většího počtu LED najednou. Všem řídicím vstupům LED budičů bylo předřazeno zapojení s TVS diodou, RC filtrem a bufferem se Schmitovým vstupem (viz obr. 6.5).

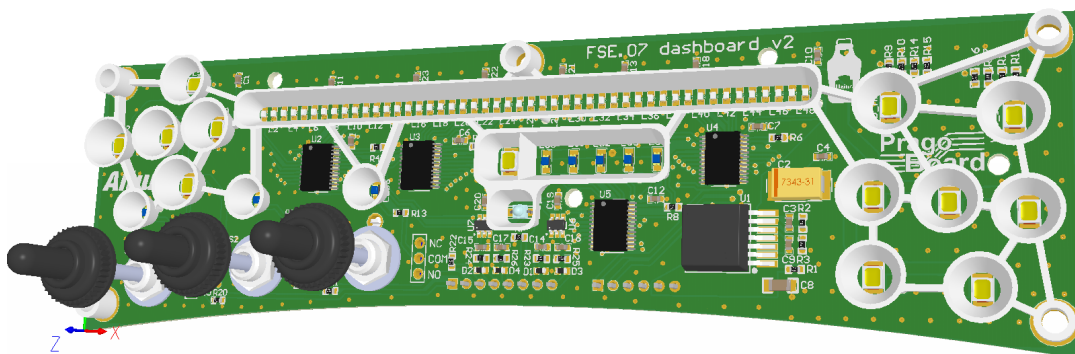


Obrázek 6.5: Ošetření vstupů palubní desky

Plošný spoj palubní desky taktéž doznal několika změn, asi nejvýraznější z nich je přesun spínaného regulátoru a jeho výstupního kondenzátoru (dříve elektrolytický, nyní tantalový) na přední stranu DPS. Původní D-Sub konektor byl, z důvodu jeho zmenšení a snížení hmotnosti, nahrazen dvěma konektory typu JST XH (obr. 6.6). Všechny devadesátistupňové LED ve druhé verzi nahradily klasické LED, ty poslouží jako další kontrolky. Pro vylepšení chlazení LED jim byly zvětšeny pájecí plošky, teplo se tudíž vyzařuje větší plochou. K upevnění 3D tisknutého reflektoru jsou v desce neprokovené otvory o průměru 1,5 mm, nově upravený reflektor do nich zapadne svými středícími čepy. Na DPS se dále nacházejí čtyři otvory s průměrem 3 mm sloužící k případnému zalití epoxidem.



Obrázek 6.6: Konektor JST XH [23]



Obrázek 6.7: 3D zobrazení druhé verze palubní desky s reflektorem

Obě desky plošných spojů byly osazeny a testovány obdobným postupem, jež popisuje pátá kapitola.

Kapitola 7

Závěr

Cíl této práce spočíval v návrhu, výrobě a otestování funkčnosti dvou elektronických zařízení – řídicí jednotky ECU-Front a palubní desky – pro novou generaci elektrické formule FSE.07 konstruované na FEL ČVUT. Dosažené výsledky shrnují následující body:

- v úvodu práce byly stanoveny požadavky na funkce obou zařízení, které vyplynuly z pravidel soutěže Formula Student a koncepce vozu, dle požadavků vzniklo blokové schéma,
- byly prostudovány principy a pravidla elektronického návrhu,
- v návrhovém programu Altium Designer byla vytvořena schémata zapojení a navrženy desky plošných spojů obou zařízení, práce obsahuje jejich popis,
- desky byly ručně osazeny součástkami a otestovány na základní funkčnost, z testování plyne, že jednotka ECUF je schopná obsluhovat napájení pro další řídicí jednotky a komunikovat s nimi, dokáže zpracovávat signály ze senzorů a obsluhovat palubní desku.

Během vývoje vozu došlo k několika koncepčním změnám, proto bylo nutné přepracovat původní návrhy a vyrobit druhé revize obou zařízení. Jednotka ECUF může být v budoucnu upravena ve smyslu snížení počtu součástek a zmenšení plošného spoje, způsob realizace palubní desky bude i nadále záviset na aktuálním designu vozu a požadavcích pilotů.

Elektronika určená pro užití v automobilech (zvláště pak v těch závodních) musí obecně podléhat vyšším nárokům na odolnost a spolehlivost, tento fakt byl zohledněn při výběru součástek a obvodovém návrhu, zařízení jsou proto opatřena značným množstvím ochranných prvků.

Prostřednictvím této práce vznikly funkční a poměrně robustní prototypy řídicí jednotky ECU-Front a palubní desky, jejichž dlouhodobou spolehlivost ukáže až reálné nasazení v monopostu během závodní sezóny.

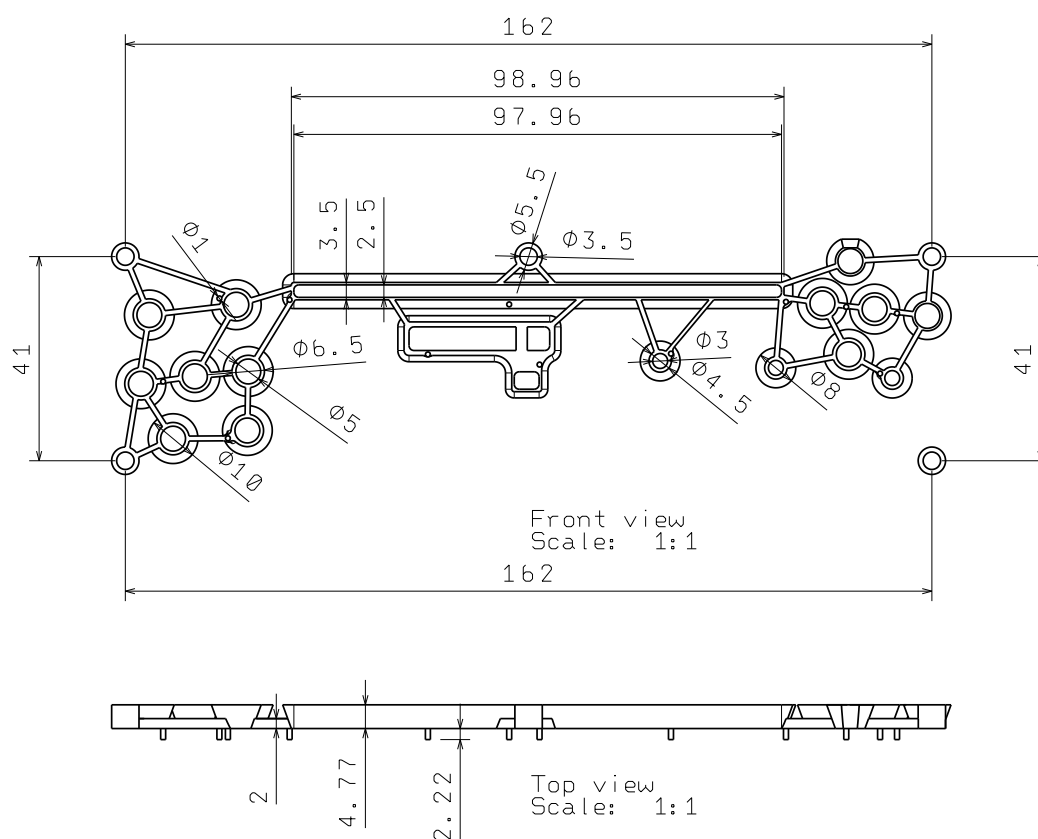
Příloha A

Literatura

- [1] Formula Student Germany Rules 2018 v1.1 [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [2] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [3] Würth Elektronik, *MagI³C Power Module*, katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <http://katalog.we-online.com/pm/datasheet/173010542.pdf>
- [4] STMicroelectronics, *VND7020AJ*, katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/53/f9/e8/69/7d/b8/4a/10/DM00157075.pdf/files/DM00157075.pdf/jcr:content/translations/en.DM00157075.pdf>
- [5] STMicroelectronics, *STM32F105VC*, katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/f3/1a/89/5a/02/46/ae/CD00220364.pdf/files/CD00220364.pdf/jcr:content/translations/en.CD00220364.pdf>
- [6] Texas Instruments, *REF3030*, katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref3030.pdf>
- [7] STMicroelectronics, *AN2867* aplikační poznámka [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/c6/eb/5e/11/e3/69/43/eb/CD00221665.pdf/files/CD00221665.pdf/jcr:content/translations/en.CD00221665.pdf
- [8] Abracon, *Ceramic SMD crystal*, katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <https://abracon.com/Resonators/abm3b.pdf>
- [9] Microchip Technology Inc., *MCP2551* katalogový list [online, cit. 2018-04-30]
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001667G.pdf>

Příloha B

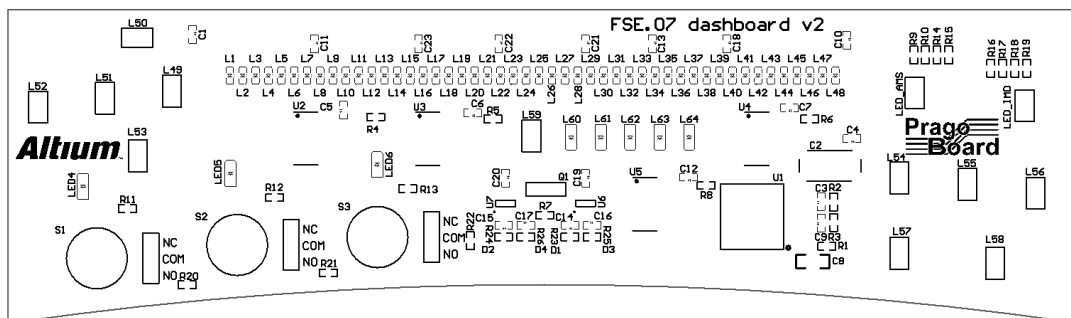
Výkresy, schémata, soupisky součástek



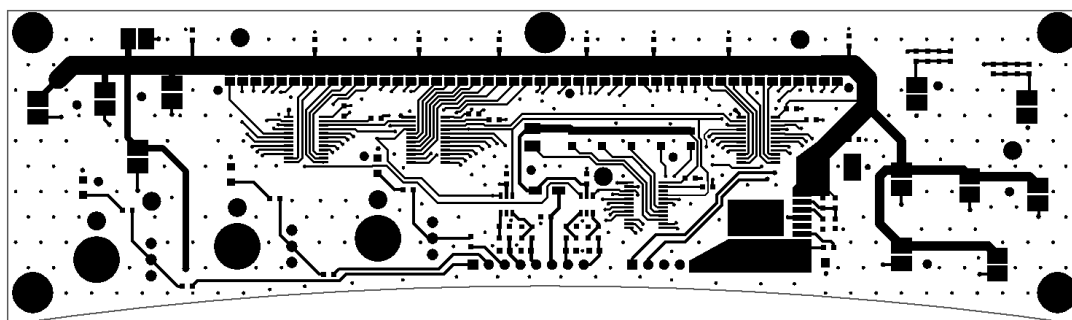
Obrázek B.1: Okótovaný výkres reflektoru na palubní desku

Součástka	Reference	Hodnota/popis	Pouzdro	Počet
kondenzátor	C1, C4, C5, C6, C7, C10, C11, C13, C18, C19, C20, C21, C22, C23	100n	0603	17
kondenzátor	C3, C9	22n	0603	2
kondenzátor	C2	100μ, tantalový	D	1
kondenzátor	C8	10μ	1206	1
kondenzátor	C14, C15, C16, C17	220p	0603	4
dioda	D1, D2, D3, D4	TVS, 5 V	0603	4
LED	L1-L48	červená/zelená	0603	48
LED	L49-L59	různé	3528	11
LED	L60-L64	bílá	0805	5
LED	LED4, LED5, LED6	bílá	0805	3
LED	LED_AMS, LED_IMD	červená	3528	2
fototranzistor	Q1	PT91-21C/TR7		1
rezistor	R1	100k	0603	1
rezistor	R2	5k6	0603	1
rezistor	R3	1k1	0603	1
rezistor	R4, R5, R6, R8	750R	0603	4
rezistor	R7	2k2	0603	1
rezistor	R9, R10, R14, R15, R16, R17, R18, R19	4k3	0603	8
rezistor	R11, R12, R13	470R	0603	3
rezistor	R20, R21, R22	100R	0603	3
rezistor	R23, R24, R25, R26	330R	0603	4
přepínač	S1, S2, S3	1MS1T1B1M1QE		3
spínaný regulátor	U1	WPMDH1300601	TO263	1
budič LED	U2, U3, U4, U5	TLC5927	SSOP-24	4
buffer	U6, U7	SN74LVC2G17	SOT23-6	2
konektor	J1	JST XH, 6 pinů		1
konektor	J2	JST XH, 8 pinů		1
celkový počet součástek				137

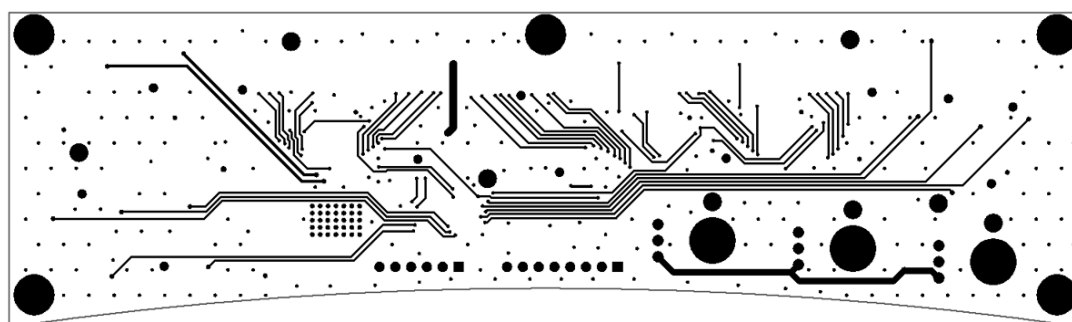
Tabulka B.1: Soupiska součástek palubní desky



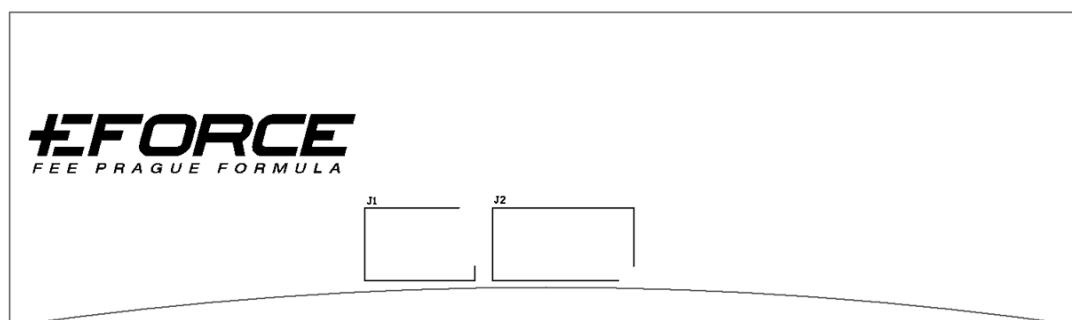
Obrázek B.2: Potisk přední strany DPS palubní desky



Obrázek B.3: Motiv spojů přední strany DPS palubní desky (bez polygonu)



Obrázek B.4: Motiv spojů zadní strany DPS palubní desky (bez polygonu, zrcadlově)



Obrázek B.5: Potisk zadní strany DPS palubní desky (zrcadlově)

Součástka	Reference	Hodnota/popis	Pouzdro	Počet
kondenzátor	C1	47 μ , elektrolytický	THT	1
kondenzátor	C2, C3, C4, C5, C7, C11	10 μ	1206	6
kondenzátor	C6, C8, C9, C10, C12, C13, C14, C16, C17, C18, C19, C20, C22, C23, C25, C27, C28, C32, C35, C36, C38, C39, C42, C44, C45, C46, C47, C50, C51, C53, C56, C58, C71	100n	0603	33
kondenzátor	C15, C21, C26, C29, C34, C37, C61, C65, C66, C67, C69	10n	0603	11
kondenzátor	C24, C40	220p	0603	2
kondenzátor	C30, C33	1n	0603	2
kondenzátor	C31, C48	470n	0603	2
kondenzátor	C41, C49	22p	0603	2
kondenzátor	C43	4 μ 7	0603	1
kondenzátor	C68, C70	1 μ	0603	2
dioda	CAN_TV1S1, CAN_TV1S2	ESDCAN01-2BLY	SOT23m	2
dioda	D1	TVS, P6SMB36CA	SMB	1
dioda	D2, D3, D4	Schottky, 40 V, 1 A	SOD323F	3
dioda	D5, D6, D7	TVS, P6SMB36CA	SMB	3
dioda	D8, D9, D10, D11, D16, D17, D18, D19, D20, D25, D26, D27, D28	TVS, 12 V, 5 V	0603	13
dioda	D12	TVS,P6SMB7.5CA	SMB	1
dioda	D13, D21, D22, D23, D24	BAV99	SOT23	5
dioda	D14, D15		0805	2
dioda	ZD1	zenerova, 10 V	SOD323F	1
pojistka	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7	držák autopojistky		7
konektor	J1, J6	WR-MPC3, 8 pinů		2
konektor	J2, J7	WR-MPC3, 6 pinů		2
konektor	J3	WR-MPC3, 4 piny		1
konektor	J4, J5	WR-MPC3, 10 pinů		2
konektor	J8	lišta 2,54 mm, 2 piny		1
konektor	J9	lišta 2,54 mm, 6 pinů		1
konektor	J10	WR-MPC3, 12 pinů		1
konektor	J11	USB B mini, vertikální		1
feritové jádro	L2, L4, L5, L7	330 Ω	0603	4
feritové jádro	L8	120 Ω	0603	1
cívka	L3, L6	250 μ H		2
cívka	L1	22 μ H		1

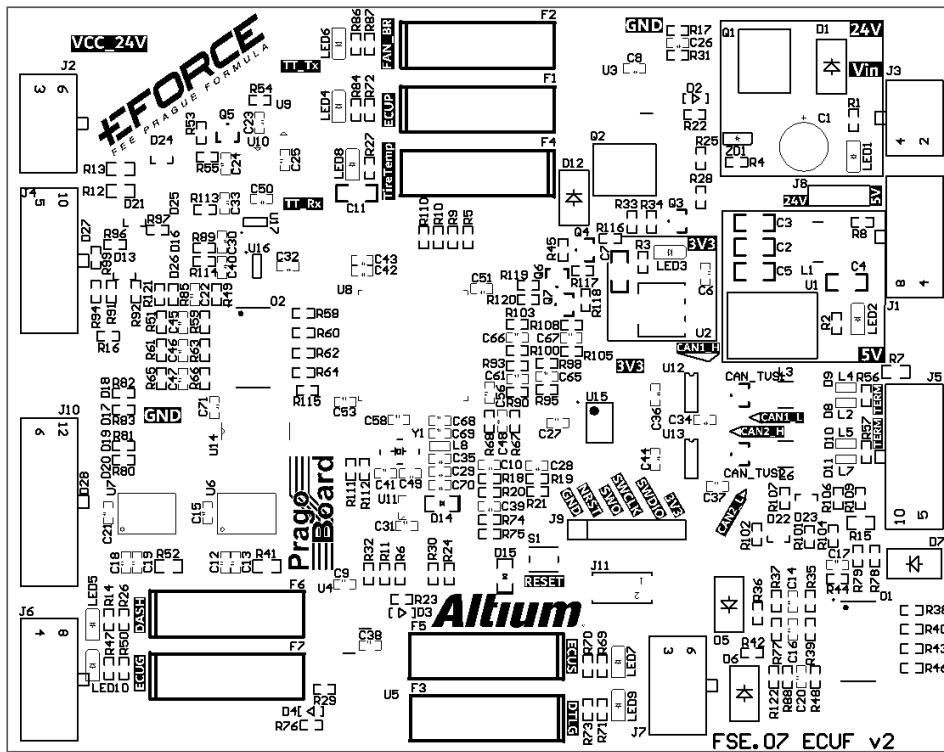
Tabulka B.2: Soupiska součástek jednotky ECUF (1. část)

Součástka	Reference	Hodnota/popis	Pouzdro	Počet
LED	LED1, LED2, LED3	zelená	0805	3
LED	LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED10	žlutá	0805	7
optočlen	O1, O2	ACPL-244	SO-16	2
tranzistor	Q1, Q2	FDD5614P	D-PAK	2
tranzistor	Q3	DMN1019USN	SOT23m	1
tranzistor	Q4, Q6, Q7	BC817	SOT23m	3
tranzistor	Q5	2N7002	SOT23m	1
rezistor	R8, R16	4R7, PTC	0603	2
rezistor	R28, R80, R81, R82, R83	47R	0603	5
rezistor	R54, R116, R117, R118	100R	0603	4
rezistor	R33, R55	330R	0603	2
rezistor	R114	360R	0603	1
rezistor	R3, R51, R53, R61, R65	470R	0603	5
rezistor	R7, R12, R13, R15	470R	0805	4
rezistor	R92, R97, R107, R102	510R	0603	4
rezistor	R27	680R	0603	1
rezistor	R45, R67, R85, R88, R91, R96, R101, R106, R119, R120, R121, R122	1k	0603	12
rezistor	R2, R20, R21, R68, R75	1k5	0603	5
rezistor	R36, R37, R42, R77, R78, R79	1k6	0603	6
rezistor	R41, R52	4k0, 0,1%	0805	2
rezistor	R22, R23, R38, R40, R43, R46, R58, R60, R62, R64, R76	4k7	0603	11
rezistor	R90, R95, R100, R105	5k1	0603	4
rezistor	R103, R98, R108, R93	7k5	0603	4
rezistor	R1, R14, R26, R47, R50, R56, R57, R69, R70, R71, R72, R73, R84, R86, R87, R115	10k	0603	16
rezistor	R5, R6, R9, R10, R11, R18, R19, R24, R29, R30, R32, R74, R110, R111, R112	15k	0603	15
rezistor	R31	30k	0603	1
rezistor	R25, R35, R39, R44, R48, R49, R59, R63, R66	47k	0603	9
rezistor	R4, R34, R89, R113	100k	0603	4
rezistor	R17	270k	0603	1
rezistor	R94, R99, R104, R109	1M	0603	4
tlačítko	S1	4×3×2 mm		1

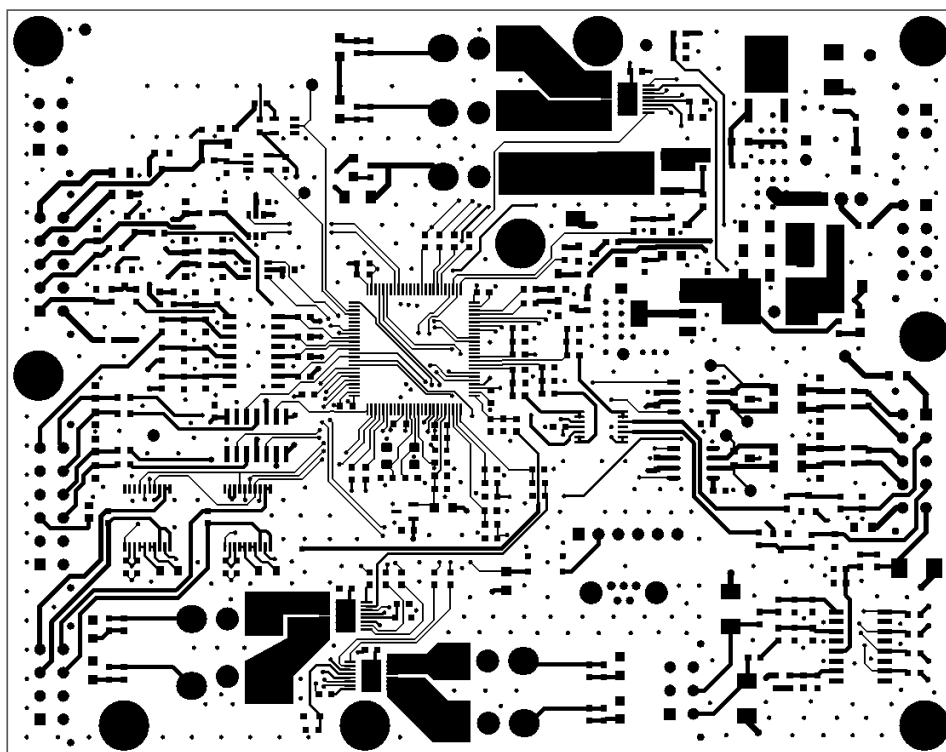
Tabulka B.3: Soupiska součástek jednotky ECUF (2. část)

Součástka	Reference	Hodnota/popis	Pouzdro	Počet
spínaný regulátor	U1	WPMDH1100xx1S	SIP-3	1
lineární regulátor	U2	LD1117	SOT-223	1
integrováný spínač	U3, U4, U5	VND7020AJ	PowerSSO-16	3
AD převodník	U6, U7	MAX31865	SSOP-20	2
MCU	U8	STM32F105VC	LQFP-100	1
buffer	U9	SN74LVC1G14	SOT-23-5	1
buffer	U10	SN74LVC1G17	SOT-23-5	1
napěťová ref.	U11	REF3030	SOT-23	1
budič CAN	U12, U13	MCP2551	SO-8	2
buffer	U14	74HC125D	SO-14	1
operační zesilovač	U15	LMV324MT	TSSOP-14	1
buffer	U16, U17	SN74LVC2G17	SOT-23-6	2
krystal	Y1	12MHz	5032	1
celkový počet součástek				279

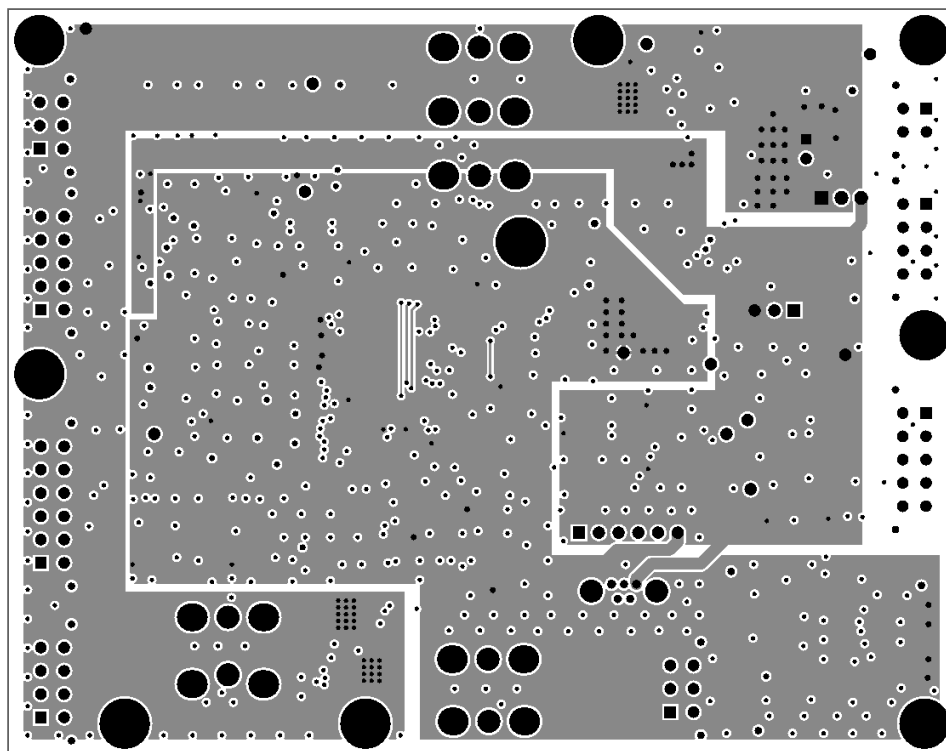
Tabulka B.4: Soupiska součástek jednotky ECUF (3. část)



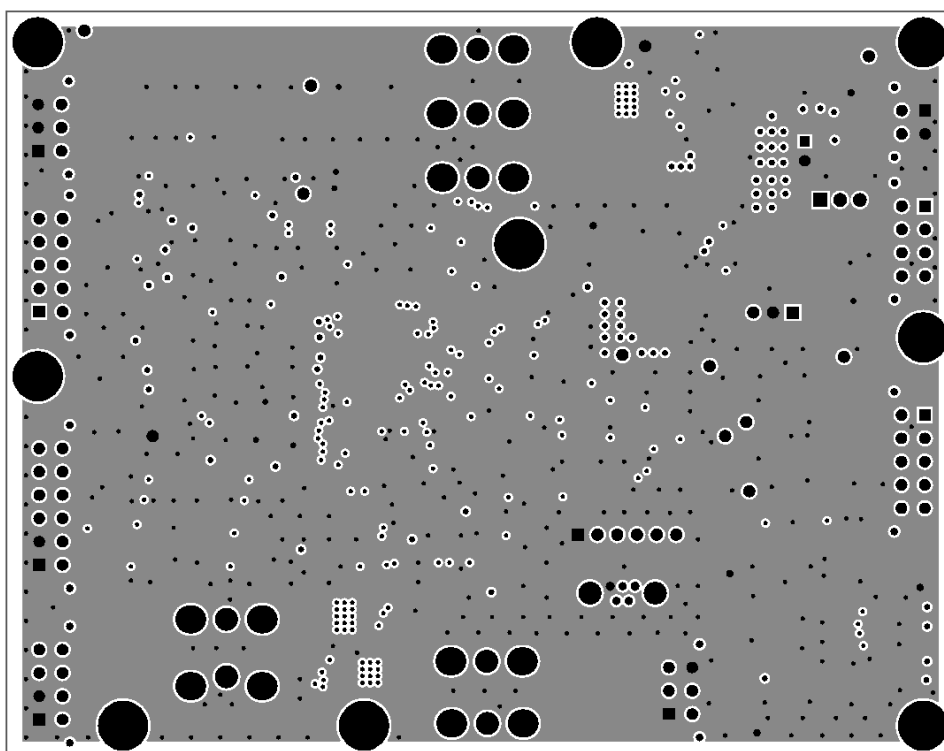
Obrázek B.6: Potisk přední vrstvy DPS jednotky ECUF



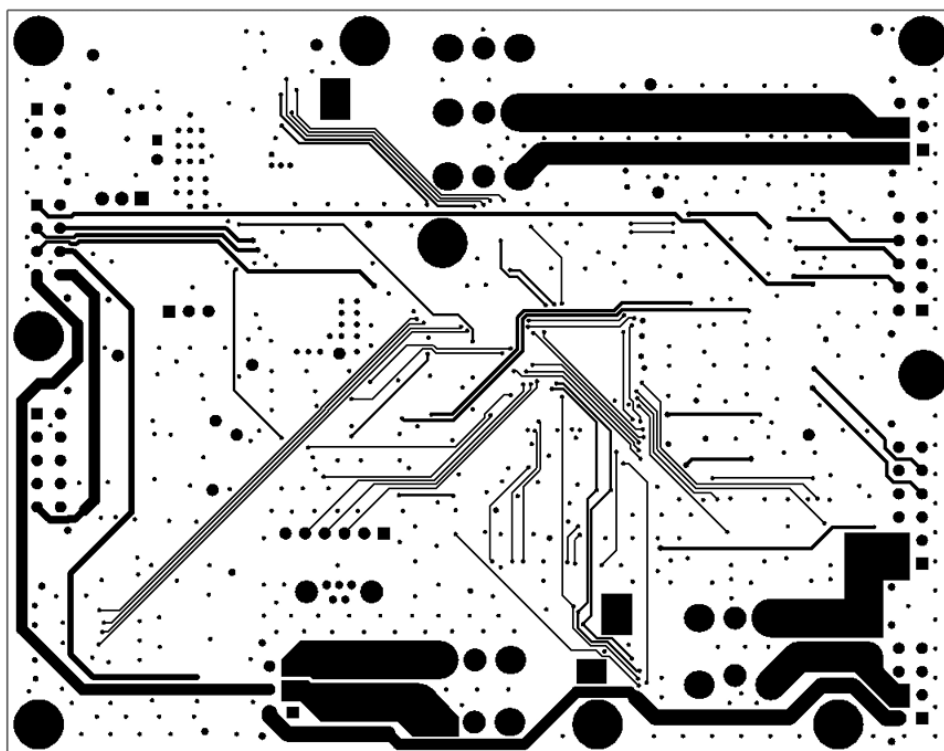
Obrázek B.7: Motiv spojů přední vrstvy DPS jednotky ECUF (bez polygonů)



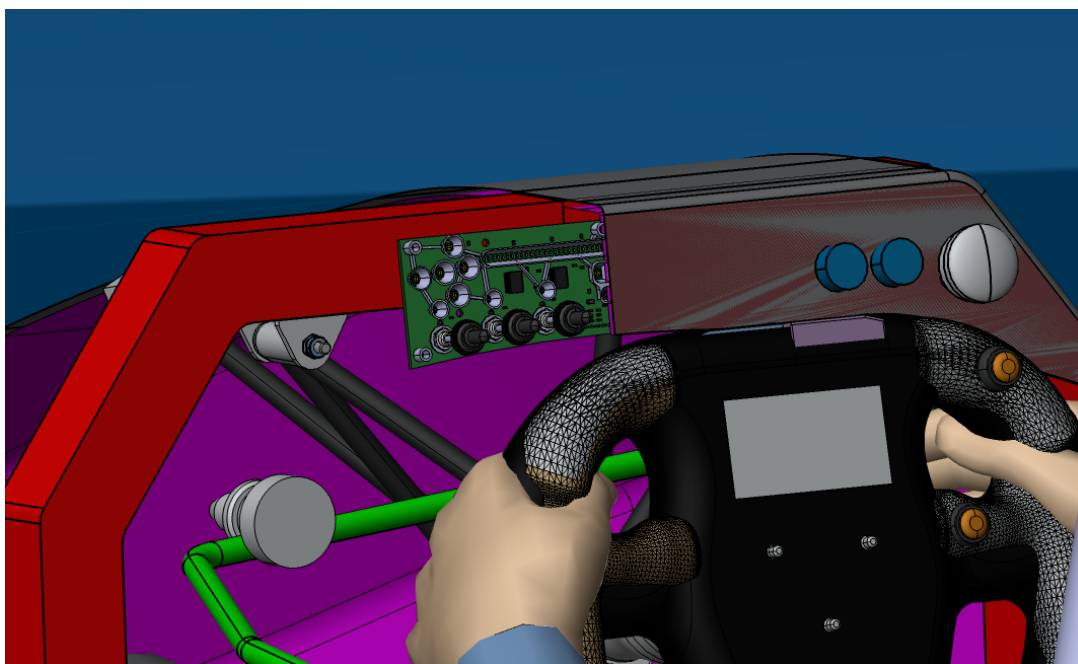
Obrázek B.8: Motiv napájecí vrstvy DPS jednotky ECUF



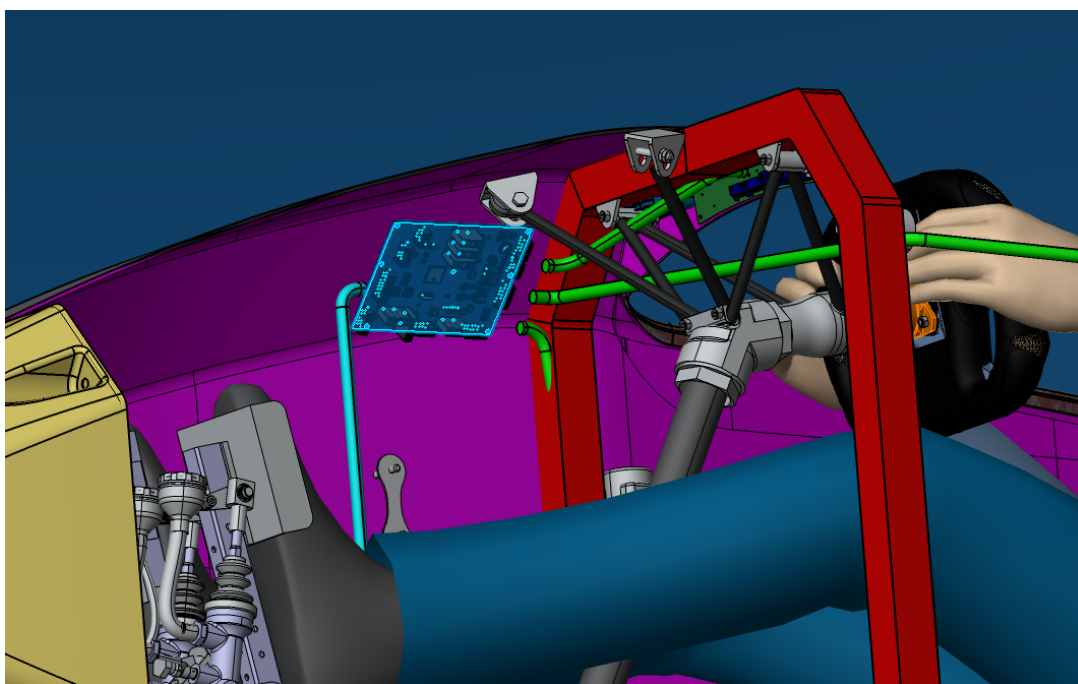
Obrázek B.9: Motiv zemní vrstvy DPS jednotky ECUF



Obrázek B.10: Motiv spojů zadní vrstvy DPS jednotky ECUF (bez polygonů, zrcadlově)



Obrázek B.11: Předpokládaná zástavba palubní desky do vozu FSE.07



Obrázek B.12: Předpokládaná zástavba jednotky ECUF do vozu FSE.07