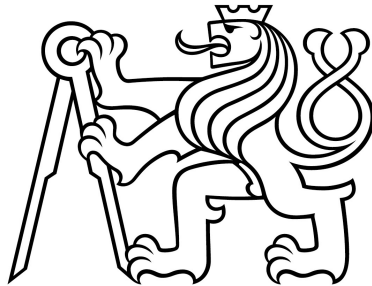


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky



**Návrh a realizace řídicí jednotky
ECU-Front**
Bakalářská práce

Autor práce: **Pavel Stoudek**
Studijní program: **Kybernetika a robotika (bakalářský)**
Obor: **Robotika**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Sobotka**
Odevzdání: **květen 2017**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Pavel S t o u d e k

Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)

Obor: Robotika

Název tématu: Návrh a realizace řídicí jednotky ECU-Front

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte v programu Altium Designer desku plošných spojů řídicí jednotky ECU-Front. ECU-Front tvoří HMI rozhraní pro pilota v podobě notificačních LED diod na palubní desce, reaguje na bezpečnostní vypínací prvky, komunikuje s ostatními jednotkami po CAN sběrnici a v neposlední řadě ovládá napájení dalších jednotkám v přední části vozu. Specifikace ECU-Front vychází z požadavků týmu eForce FEE Prague Formula a bude součástí bakalářské práce. Desku plošných spojů osadíte součástkami a „oživíte“. Naprogramujte řídicí mikroprocesor STM32F407 dle požadavků zadavatele. Funkčnost řešení demonstруйте na některém z vozů týmu eForce nebo realizací vhodné demo ukázky. Práci vypracujte v souladu s pravidly soutěže Formula Student 2017 - 2018.

Seznam odborné literatury:

- [1] SAE INTERNATIONAL. 2017 - 2018 Formula SAE Rules (Updated 9/7/16). 2016.
Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>
- [2] Vobecký, J., Záhlava, V.: "Elektronika - součástky a obvody, principy a příklady", Grada Publishing, 2001.
- [3] Záhlava, V.: "Metodika návrhu plošných spojů". Skripta ČVUT, Praha 2000.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Sobotka

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 1. 2017

Prohlášení autora práce

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 dne:

.....

podpis autora práce

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Sobotkovi za jeho cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat týmu eForce FEE Prague Formula za spolupráci při vývoji a také rodině a přátelům za jejich podporu a pomoc.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou požadavků, návrhem, výrobou, a programováním řídicí jednotky ECU Front pro vůz FSE.06 studentského týmu eForce FEE Prague formula. Jedná se o čtyřvrstvou desku plošných spojů osazenou mikrokontrolérem ARM STM32F405, která má za úkol zobrazovat informace pro pilota na palubní desce a ošetřuje funkci ovládacích tlačítek, dále sleduje stavy nouzových vypínačů ochranného obvodu a v neposlední řadě spíná napětí dalším řídicím jednotkám, umístěným v přední části vozu. Schematický a plošný návrh desky je vytvořen v programu Altium Designer. Mikrokontrolér je naprogramován v programovacím jazyce C. V závěru práce je demonstrována funkčnost řídicí jednotky.

Klíčová slova: Řídicí jednotka, Formula Student, Deska plošných spojů, STM32F405

Annotation

This bachelor thesis is dedicated to analysis of requirements and following design, manufacture and programming of the electronic control unit ECU Front. The ECUF will be used in the FSE.06 race car made by the eForce FEE Prague formula faculty team. The ECU Front is four layer printed circuit board controlled by microcontroller ARM STM32F405, and its purpose is to signalize information for the driver on the dashboard, implement the function of control buttons, check the state of emergency buttons of safety circuit and last but not least it enables power for other ECUs in the front of the car. The schematics and PCB is designed in Altium Designer. The microcontroller is programmed in C programming language. The functionality of the control unit is demonstrated in the last chapter of the thesis .

Key words: Electronic control unit, Formula Student, PCB, STM32F405

Obsah

Úvod	2
1 Analýza požadavků	4
1.1 Předchozí verze	4
1.2 Mechanické požadavky	5
1.3 Elektrické požadavky	7
1.3.1 Spouštění napětí	7
1.3.2 Signalizace na palubní desce	7
1.3.3 Natočení volantu	7
1.3.4 Spínače na palubní desce	8
1.3.5 Ochranný obvod SDC	9
1.3.6 CAN komunikace	10
1.4 Návrh programu	10
2 Schématický Návrh	11
2.1 Napájecí část	12
2.2 Logická jednotka	13
2.3 LED signalizace	15
2.4 I/O část	17
2.5 Konektory	18
3 Návrh desky plošných spojů	19
3.1 Tvar desky	19
3.2 Návrhová pravidla	20
3.3 Popis vrstev	20
3.4 Výroba a osazení	21
4 Programová část	23
4.1 Základní nastavení	24
4.2 Vstup a výstup	25
4.3 Měření napětí	25
4.4 Měření úhlu natočení volantu	26
4.5 Komunikace přes CAN protokol	27
5 Testování	29
Závěr	30
Přílohy	34

Seznam obrázků

1.1	ECUF verze 1.	5
1.2	ECUF verze 2.	5
1.3	Určení rozměru desky z modelu vozu.	6
1.4	Palubní deska vozu FSE.04x.	6
1.5	Řešení palubní desky na voze FSE.05.	6
1.6	Senzor úhlu natočení volantu.	8
1.7	Schéma bezpečnostního okruhu (sekce pravidel EV5).	9
1.8	Setrvačný vypínač Sensata[4].	9
1.9	OMRON A165E LM [5].	10
2.1	Blokové schéma zapojení ECUF.	11
2.2	Schéma napájecí soustavy.	12
2.3	Schéma spínání napětí.	13
2.4	Zvolené pouzdro mikrochipu STM32F405 [7].	13
2.5	Schéma zapojení napájecích vývodů mikrokontroléru [7].	14
2.6	Schéma zapojení CAN budiče MCP2551.	15
2.7	Schéma zapojení vývodů ULN2003A [11].	15
2.8	Použité LED Diody SMD 3528 [12].	16
2.9	Schéma zapojení palubní desky.	16
2.10	Schéma zapojení ACPL-224 [13].	17
2.11	Schéma děliče napětí a filtru pro vyhodnocení stavu přepínačů.	17
2.12	Použité konektory WR-MPC3 [15].	18
3.1	3D model rozložení desky v programu Altium Designer.	19
3.2	Zobrazení vrstvy Top Layer.	21
3.3	Zobrazení vrstvy Power Layer.	21
3.4	Vyrobená DPS, vrchní strana.	22
3.5	DPS po osazení, vrchní strana.	22
3.6	Vyrobená DPS pro palubní zobrazovací panel.	22
3.7	Zkompletované osazené DPS.	22
4.1	Blokové schéma programu.	23
4.2	Konfigurace vývodů MCU v programu CubeMX.	24
4.3	Nastavení systémových hodin MCU v CubeMX.	25
4.4	Konfigurace AD převodníku v CubeMX.	26
4.5	Příklad nastavení zprávy v CANdb.	27
5.1	Měřící stanoviště.	29

Seznam tabulek

1.1	Hlavní funkce řídicí jednotky ECUF	7
1.2	Popis signalizace na palubní desce	8
1.3	Přehled CAN komunikace	10
2.1	Schématické bloky	12
2.2	Zvolené odpory pro danou barvu	16
2.3	Přehled logických stavů přepínačů	18
3.1	Přehled návrhových pravidel	20
3.2	Přehled návrhových vrstev	21
4.1	Přehled odesílaných zpráv	28

Úvod

Již třetím rokem jsem členem fakultního týmu eForce Prague Formula, kde se seznamuji s návrhem plošných spojů a programováním mikrokontrolérů formou zajímavé praxe. Jako svoji bakalářskou práci jsem si zvolil implementaci řídicí jednotky, kterou mám v této sezóně přidělenou. Na úvod stručně představím soutěž Formula student, krátce se zmíním o našem týmu a představím cíl své práce. V první kapitole provedu rozbor požadavků potřebných k vyřešení problému a popíšu komponenty, které využiji k jeho řešení. V druhé kapitole představím schématický návrh a v následující kapitole návrh plošného spoje. Čtvrtá kapitola je věnována popisu programu mikrokontroléru a poslední kapitola ověření funkčnosti jednotky. Závěr obsahuje diskuzi výsledků.

Formula Student

Formula student je mezinárodní soutěž pro studenty z univerzit z celého světa, která vznikla v roce 1981. Soutěž byla založena v USA pod záštitou Society of Automotive Engineers a v roce 1998 se rozšířila i do Evropy. Další důležitý milník byl v roce 2010, kdy byla vytvořena kategorie Electric. Cílem soutěže je navrhnout a následně závodit s vozem formulového typu podle jednotných pravidel [1]. Tento rok platí pro většinu Evropských závodů německá pravidla vytvořená výkonnou komisí závodu FS Germany.

Tým eForce FEE Prague Formula

eForce FEE prague formula je fakultní tým, složený hlavně ze studentů fakult strojní a elektrotechnické ČVUT. Byl založen v roce 2010 a stále zůstává jediný český tým, který úspěšně staví elektrický monopost do soutěže Formula Student. Tým eForce má v současnosti přes 40 členů a od doby svého vzniku má na svém kontě 5 elektrických vozů a v aktuální sezóně 2016/2017 usilovně pracuje na šestém monopostu [2].

Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout, vyrobit, naprogramovat a otestovat funkčnost řídicí jednotky ECU Front pro vůz FSE.06 studentského týmu eForce FEE Prague formula.

Kapitola 1

Analýza požadavků

Analýza požadavků vychází zejména z pravidel soutěže [3]. Na konkrétní sekce pravidel bude v práci odkazováno vždy uvedením označení pravidla či celé sekce pravidel. Další požadavky určuje návrhová koncepce pro vůz FSE.06, kterou tým stanovil v září 2016.

Pravidlo A1.1.1 popisuje soutěž jako výzvu pro studenty navrhnout a vyrobit malé závodní auto formulového typu. Tuto skutečnost dále omezuje pravidlo A2.1.1 jako čistě studentskou soutěž, a pravidlo A2.1.2 stanovuje získání rad a dalších informací od učitelů a jiných odborníků z praxe pouze formou diskuze. Tímto se maximalizuje zisk zkušeností z celé soutěže.

Protože pravidla A2.2.1 a A2.2.2 zajišťují, že tým musí každý rok představit vůz se zásadními koncepčními změnami, je takto zajištěn rozvoj týmu a z téhož důvodu musí být řídicí jednotka také pokaždé jiná. Cílem je tedy vyrobit každé další auto lépe a s lepší specifikací než to předchozí. Dochází tak ke snižování hmotnosti, navyšování výkonu (i počtu motorů) a ke zvyšování složitosti všech týmem navržených součástí vozu.

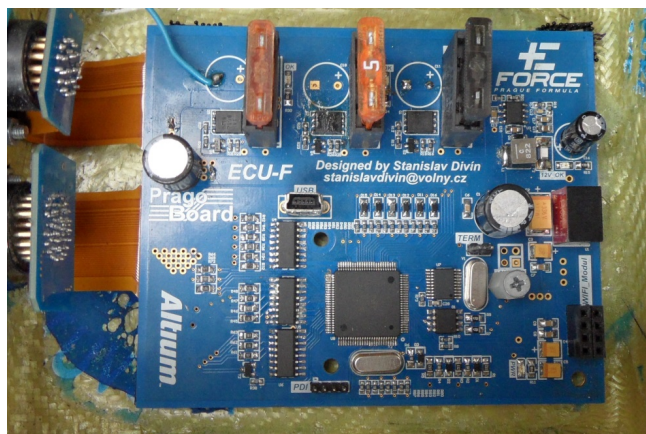
Z nároků týmu vycházejí mechanické i elektrické vlastnosti jednotky. Jelikož je koncepce řídicí jednotky oproti sezóně 2015/2016 poměrně odlišná, je třeba vytvořit jednotku novou. Následuje výpis funkcí, které musí jednotka implementovat. Tyto funkce budou dále více popsány a doplněny zněním příslušných pravidel případně jinými požadavky na konkrétní řešení.

1.1 Předchozí verze

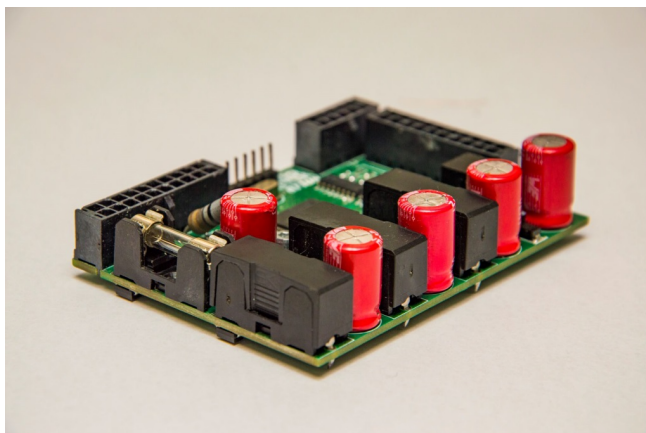
Vývoj samostatné řídicí jednotky ECU-Front začal na konci sezóny 2013/2014, a byla zvolena koncepce rozdělení palubní desky z vozu FSE.03 na dílčí řídicí jednotky a to řídicí jednotku pedálů (ECUP), řídicí jednotku Front (ECUF) a řídicí jednotku volantů (ECUS). Tímto začal návrh řídicí jednotky a její 3. generace bude momentálně použita na vozu FSE.06.

Řídicí jednotka vychází z 2 roky starého návrhu čtyřvrstvé desky plošných spojů nesoucí stejné označení ECU-F pro vůz FSE.04x viz obr. 1.1, kterou navrhl a naprogramoval člen týmu Stanislav Divín. Při návrhu bylo použito čtyřvrstvý desky plošných spojů zejména z důvodu použití technologie flex-rigid. Tato technologie se však ukázala jako velmi časově náročná na výrobu a proto bylo nutné od tohoto způsobu řešení upustit. Dalším kritériem bylo nahradit mikrokontrolér (MCU) Atmel xMEGA128A1 32bitovým mikrochipem typu STM32 technologie ARM. Tímto způsobem by se sjednotilo použití stejné řady mikroprocesorů pro všechny jednotky v autě.

V sezóně 2015/2016 byly zmenšeny rozměry a použito 2 vrstvé desky viz obr. 1.2. Byl odstraněn technologicky náročný flex rigid a byly použity tradiční konektory typu Amphenol. Jako mikrokontrolér byl zvolen STM32F405VGT6. Dále byla přidána napájecí část pro řídicí jednotku dataloggeru. Tvar desky zůstal obdélníkový, ovšem poloha umístění jednotky se přesunula pod sedadlo řidiče. Z této verze vychází návrh pro letošní sezónu, který je tak výsledkem dvouleté práce.



Obrázek 1.1: ECUF verze 1.

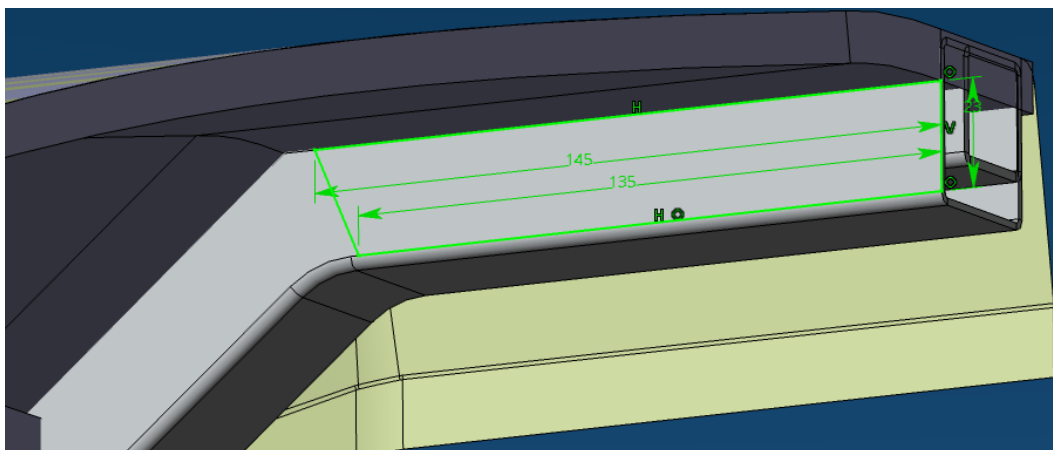


Obrázek 1.2: ECUF verze 2.

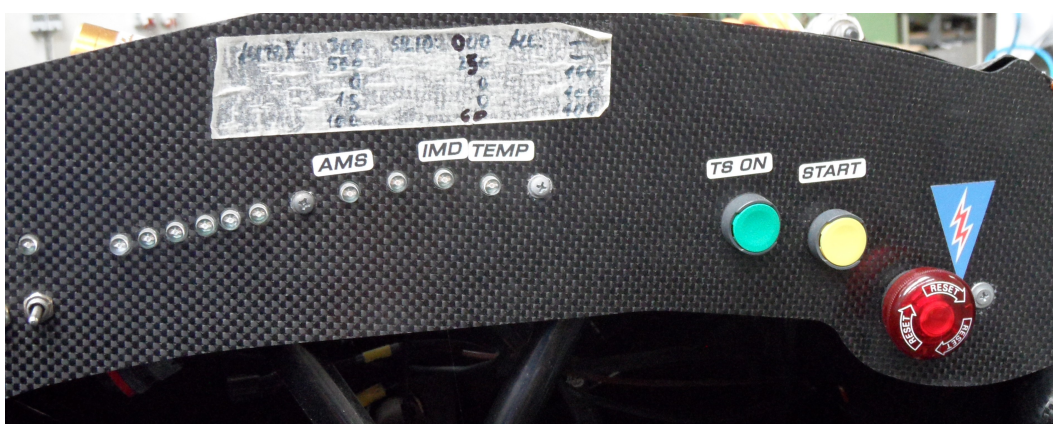
1.2 Mechanické požadavky

Z mechanických požadavků je požadováno umístění na předním oblouku (též Front Hoop) kompozitního rámu vozidla a vhodný tvar jednotky viz obr. 1.3. Je také potřebné zvolit vhodné konektory a jejich umístění na desce tak, aby správně odpovídaly jednotlivým kabelovým svazkům. Dále je nutné zvolit rozměr montážních otvorů a jejich rozmístění na desce tak, aby nedocházelo k přílišnému mechanickému namáhání desky při montáži a demontáži jednotlivých konektorů. Dalším požadavkem je, že dle pravidla EV4.3.1 musí mít všechny vodivé části v blízkosti zemněných nízkonapěťových (GLV) komponentů odpor menší než $300\text{ m}\Omega$ při průtoku proudu o velikosti 1 A . Montážní otvory musí být z tohoto důvodu zemněné. Důraz je také kladen na co nejnižší hmotnost všech komponentů. V neposlední řadě je potřeba vytvořit testovací výstupy na síť napájení $3,3\text{ V}$, síť zemnění a vodiče CAN Low a CAN High, z důvodu snadnějšího připojení testovacích vodičů.

Na obrázku 1.4 je vidět podoba palubní signalizace pro řidiče na voze FSE.04x. Signalizace řídicí jednotky akumulátoru (AMS), zařízení pro měření izolačního odporu (IMD) a měření teploty bateriových článků (TEMP) musí být podle pravidel výrazně označena. Na obrázku jsou taky velmi dobře zřetelná tlačítka pro spuštění trakčního systému (TSON) a pro aktivaci pedálu plynu (START) a stejně tak nouzový vypínač v kokpitu (SDBC), který musí být označen výstražnou značkou blesku.



Obrázek 1.3: Určení rozměru desky z modelu vozu.



Obrázek 1.4: Palubní deska vozu FSE.04x.

Pro vůz FSE.05 je palubní signalizace řešena poněkud odlišně, jelikož byla vyvedena pomocí plochého kabelu do popředí a bylo použito jiné provedení LED diod (SMD), což výrazně urychlilo instalaci viz obr. 1.5 .



Obrázek 1.5: Řešení palubní desky na voze FSE.05.

Pro vůz FSE.06 bude použit stejný koncept jako v předchozí sezóně, ovšem rozměry se značně zmenší.

Obě desky musí být navíc ošetřeny ochrannou vrstvou laku, aby se zabránilo přístupu vlhkosti ke spojům, protože jednou z kontrolních zkoušek, kterou musí elektrický vůz splnit je tzv. raintest, při kterém je vozidlo kropeno vodou po dobu 120 sekund a IMD nesmí vyhlásit chybu (pravidlo IN9).

1.3 Elektrické požadavky

V tabulce 1.1 je přehled funkcí, které bude jednotka implementovat.

Tabulka 1.1: Hlavní funkce řídicí jednotky ECUF

Funkce	Popis
Spínání napětí	Pro ECUP, ECUS, Motor Controller, Datalogger
Signalizace na palubní desce	Stav baterie, chybové diody AMS, IMD, TEMP
Natočení volantu	Vyhodnocení výstupního signálu senzoru
Spínače na palubní desce	Vyhodnocení daného logického stavu
Shutdown Circuit	Vyhodnocení přerušení SDC
CAN komunikace	Přijímání a odesílání potřebných dat

1.3.1 Spouštění napětí

Jednotka má za úkol aktivovat napětí 24V pro další čtyři jednotky uložené v přední části vozu. Toto napětí je pravidly definováno jako nízké, protože je nižší jak 60V (pravidlo EV1.1.2). Podle pravidla EV1.2.2 je každá jednotka, která není součástí trakčního systému, součástí uzemněné nízkonapěťové části auta. Tato část splňuje podmínku nízkého napětí a zároveň je zemněna kontaktem na kostru vozu. Každá napěťová větev bude chráněna vhodnou pojistkou a opatřena filtračním kondenzátorem.

1.3.2 Signalizace na palubní desce

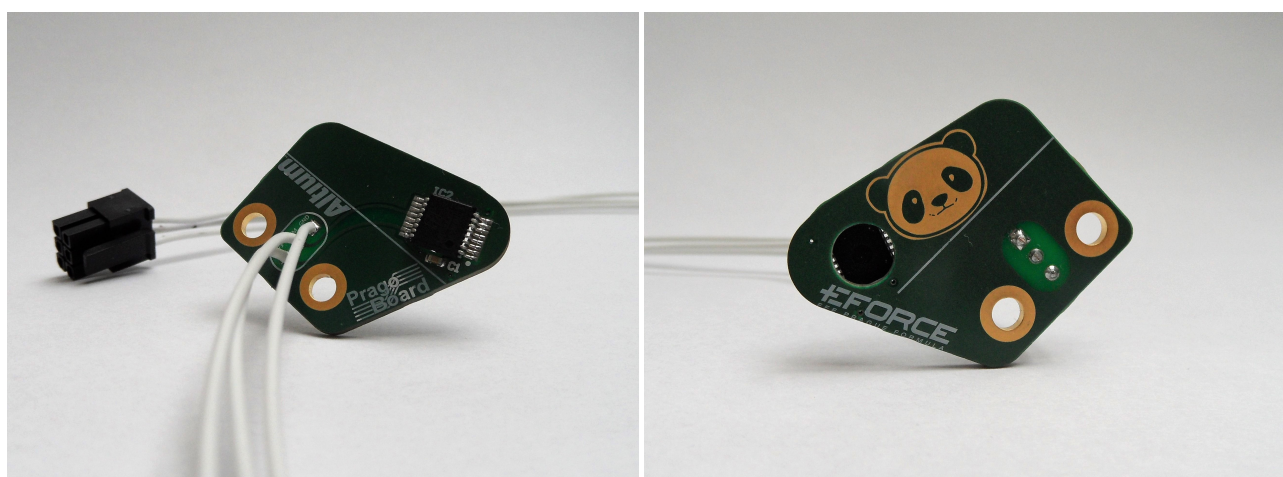
Je potřeba vytvořit další samostatnou desku plošných spojů, která bude sloužit jako palubní zobrazovací panel a bude se skládat z celkem 14 LED diod, které budou signalizovat stav baterie, a důležité informace o stavu vozu. Jedna z nich je signalizace kritického napětí či teploty baterii vždy, když AMS vyhlásí chybu. Toto světlo musí být podle pravidla EV3.7.6 červené a dobře viditelné i za přímého světla a musí svítit, dokud problém není vyřešen. Další taková signalizace se musí rozsvítit, když vyhlásí chybu systém IMD (pravidla v sekci EV5.4). Popis barev použitých LED diod je v tabulce 1.2.

1.3.3 Natočení volantu

Pro správnou funkci elektronického diferenciálu měří řídicí jednotka úhel natočení volantu a následně odesílá tato data řídicí jednotce kontroly trakce. Využívá se stejný modul jako pro měření sešlápnutí pedálu viz obrázky 1.6. Jednotka ECUF musí přijmout a vyhodnotit příchozí signál a zajistit napájení modulu. Tento modul využívá funkce magnetického enkodéru AS5045, jehož výstupem je PWM napěťový signál.

Tabulka 1.2: Popis signalizace na palubní desce

Signalizace	Barva LED diody
Přepínače	3× oranžová
Stav baterie	4× zelená
	2× oranžová
	1× červená
Rezerva	1× červená
AMS IMD TEMP	3× červená



(a) Horní strana

(b) Dolní strana

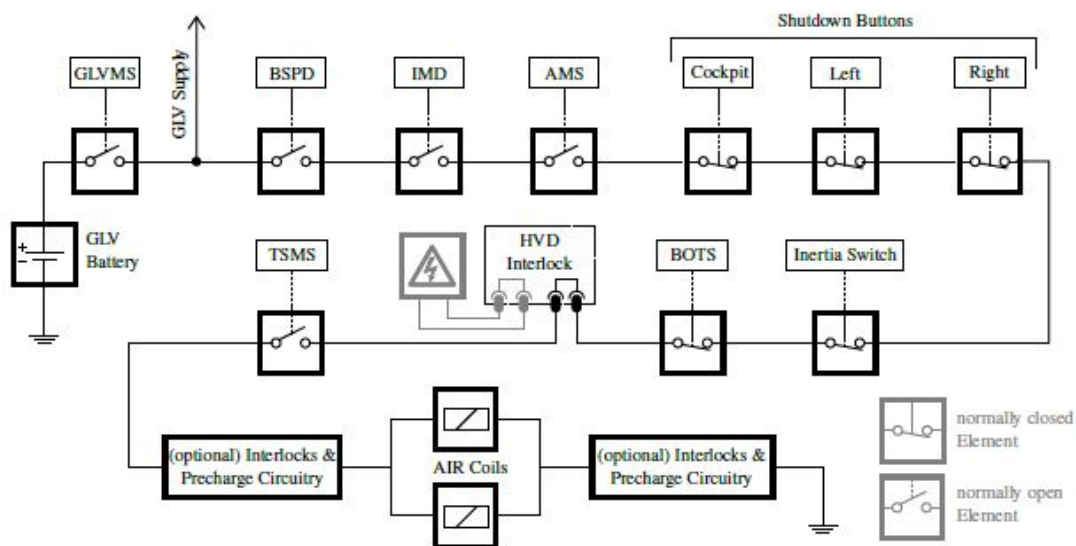
Obrázek 1.6: Senzor úhlu natočení volantu.

1.3.4 Spínače na palubní desce

Důležité je tlačítko zapnutí trakčního systému (TSON) a tlačítko aktivace plynového pedálu (START). Dle pravidel musí být řidič schopen aktivovat a deaktivovat trakční systém vozidla přímo z kokpitu bez cizí pomoci (pravidlo EV4.10.1). K tomu je potřeba právě tlačítka TSON. Po stlačení TSON musí začít blikat světlo signalizace aktivního trakčního systému (TSAL). Pouze stisknutí tohoto tlačítka ale nestačí k rozjetí vozu. Auto začne reagovat na plynový pedál pouze po současném zmáčknutí tlačítka START a stlačení pedálu brzdy. Současně se stlačením START zazní zvuk oznamující vstup vozu do závodního režimu (sekce pravidel EV4.11). Celá tato procedura vyžaduje komunikaci několika jednotek viz podkapitola 1.3.6. Dále řídicí jednotka vyhodnocuje logický stav tří přepínačů umístěných vedle signalizačního panelu. Tento stav se následně odešle dalším řídicím jednotkám, například frekvenčním měničům pro umožnění zpětného chodu vozu, či řídicí jednotce aktivní aerodynamiky DRS a podobně.

1.3.5 Ochranný obvod SDC

Shutdown Circuit (SDC) je ochranný obvod, který vede po obvodu celého auta a obsahuje řadu ochranných vypínacích prvků takových, že při jeho přerušení musí auto okamžitě zastavit. Schéma obvodu je na obrázku 1.7. Řídící jednotka ECUF vyhodnocuje stavy dvou nouzových vypínačů tohoto obvodu.



Obrázek 1.7: Schéma bezpečnostního okruhu (sekce pravidel EV5).

Je to setrvačný vypínač Inertia Switch a nouzový vypínač Shutdown Button Cockpit (SDBC). Při zmáčknutí musí SDBC blikat, což zajišťuje právě ECUF.

Inertia Switch musí být podle pravidla T10.4.1 Sensata Resettable Crash Sensor viz obrázek 1.8.



Obrázek 1.8: Setrvačný vypínač Sensata[4].

Jako SDBC byl zvolen vypínač pro nouzové zastavení OMRON A165E-LM viz obr. 1.9, který je po stisknutí v poloze “rozpojeno” a po následném otočení se dostane zpět do výchozí polohy “sepnuto”.



Obrázek 1.9: OMRON A165E LM [5].

1.3.6 CAN komunikace

Všechny jednotky v autě komunikují přes průmyslový protokol CAN. Jednotka periodicky posílá příjemcům data o měření, a dále v pravidelných intervalech přijímá data k vyhodnocení situace, viz tabulka 1.3.

Tabulka 1.3: Přehled CAN komunikace

Odesílané zprávy			Přijímané zprávy		
ID zprávy	Řídící jednotka	Název	ID zprávy	Řídící jednotka	Název
0x0C4	ECUF	SDC	0x094	ECUA	SDC
0x3C5	ECUF	Dashboard	0x344	ECUP	PedalStatus
0x3C6	ECUF	STW	0x39A	ECUA	BMSTempStatus
			0x3A4	ECUB	State
			0x3CA	ECUF	CalibrationRequest

ECUF odesílá zprávu SDC, ve které informuje ostatní jednotky o stavu nouzového vypínače SDBC a setrvačného vypínače Inertia, kterou přijímá ECUA a v případě chyby okamžitě odpojí akumulátor. Další odesílanou zprávou je Dashboard, která nese informaci o stavu palubních tlačítek a přepínačů a je důležitá hlavně pro řídicí jednotku ECUB, které přepne vůz do závodního režimu. Poslední zprávou je STW která obsahuje data o natočení volantu.

Jednotka dále přijímá zprávy od řídicí jednotky ECUA, aby mohla v případě nutnosti vyhlásit chybu AMS, IMD, nebo vysokou teplotu článků. Od řídicí jednotky ECUS přijímá žádost o uložení úhlu volantu ve středové poloze, který se používá jako reference pro výpočet úhlu natočení volantu pro řídicí jednotku trakční kontroly.

1.4 Návrh programu

Všechny funkce jednotky jsou řízeny mikroprocesorem, který musí vyhodnotit podmínky pro správnou činnost řídicí jednotky. Každá z funkcí popsaných v tabulce 1.1 vhodným způsobem využívá logiku MCU. Pro spínání LED diod se využívá analogového výstupu vývodů, pro ošetření tlačítek a SDC vypínačů naopak analogový vstup, pro funkci přepínačů je potřeba analogově digitální převodník a pro komunikaci po CAN sběrnici příslušné rozhraní. Je vhodné vytvořit srozumitelný a přehledný kód, který bude nahrán na verzovací systém GIT a bude tak k dispozici pro ostatní členy týmu v případě potřeby.

Program zůstává od minulé sezóny obdobný, protože nedošlo k žádným změnám koncepce řídicí jednotky. Program je psán v programovacím jazyce C. Očekává se využití týmového nástroje CANdb pro nastavení CAN protokolu.

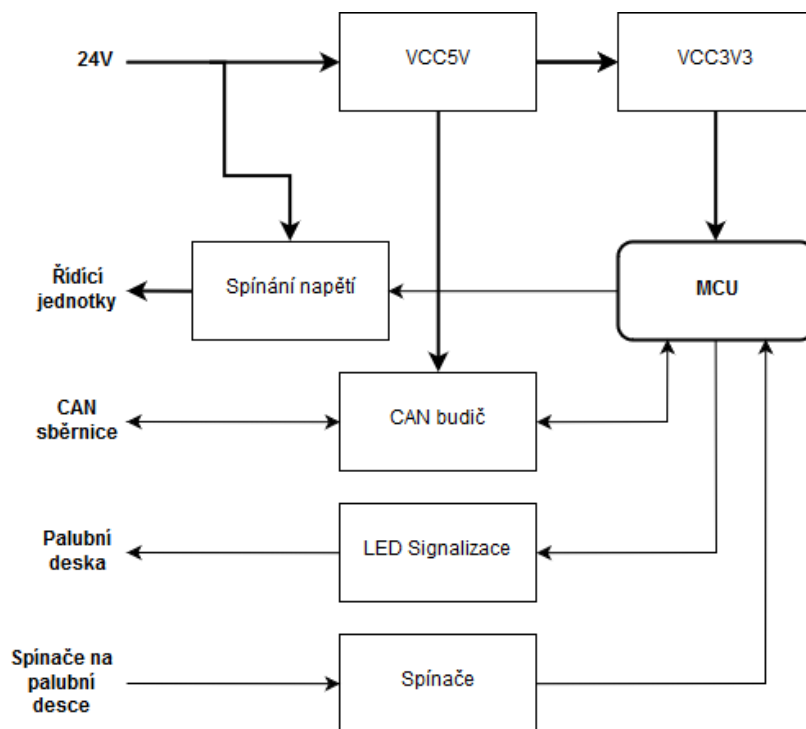
Kapitola 2

Schématický Návrh

Pro návrh plošného spoje je použit program Altium Designer 16, který je poloprofesionálním nástrojem pro tvorbu desek plošných spojů.

Během návrhu schémat se podle [6] musí řešit volba potřebných součástí a správný návrh z hlediska teorie elektrických obvodů. Je vhodné správně zvolit všechny součástky dle potřebné funkce a už ve schématu definovat typ pouzdra a další vlastnosti, jako například číslování součástí a servisní popisky. Elektrické schéma pro návrh plošného spoje musí navíc obsahovat ochranné prvky proti rušení, blokovací kondenzátory u napájecích vývodů integrovaných obvodů, ochranné součástky na vstupech a výstupech a další.

Zapojení celé řídicí jednotky znázorňuje blokové schéma na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Blokové schéma zapojení ECUF.

Schéma celé desky plošných spojů je rozděleno do pěti částí, každá obsahující danou skupinu komponentů zastávající jednu z hlavních funkcí viz tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Schématické bloky

Název části	Funkce
pwr.sch	Napájecí část
up_unit.sch	Logická jednotka
led.sch	LED signalizace
ion.sch	I/O část
connectors.sch	Zapojení konektorů

Dle [6] jsou základním pilířem návrhu schémat knihovny schématických značek součástek, obsahující vlastnosti potřebné pro výrobu desky plošných spojů (DPS). Během tvorby schémat byly značně využity týmové knihovny součástek a v některých případech také knihovny poskytnuté výrobcí dané součástky. Veškeré pasivní součástky jsou určeny pro povrchovou montáž (SMD) nejčastěji v pouzdru 0603 a všechny konektory jsou z důvodu mechanické odolnosti s drátovými vývody (tzv. THT verze).

Dle [6] je důležité vyvarovat se těmto nejčastějším problémům:

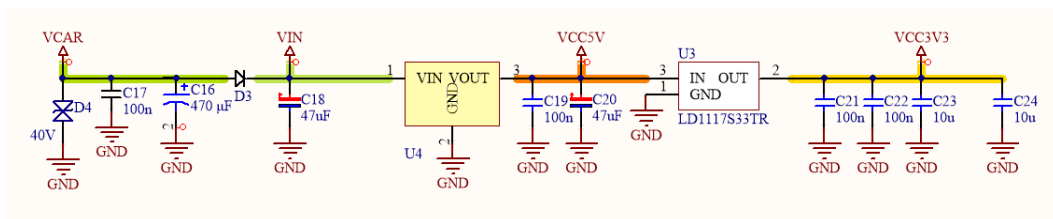
- *Konfigurace zapojení konektorů, systém sběrnic a propojovacích kabelů*
- *Systém blokování napájení pomocí kondenzátorů a filtrace vůbec*
- *Ochrany vstupů a výstupů, případně jejich galvanická oddělení*
- *Volba součástek s ohledem na rušivé vyzařování a odolnost*
- *Impedanční přizpůsobení kritických spojů*

2.1 Napájecí část

Prvním blokem je napájecí část, která upravuje vstupní stejnosměrné napájení vozu 24 V na napětí 5 V a 3,3 V, se kterými jednotka dále pracuje.

Na vstupu je TVS dioda 40 V a filtrační kondenzátor 470 μF , dále dioda proti přepólování následovaná step down regulátorem a lineárním stabilizátorem.

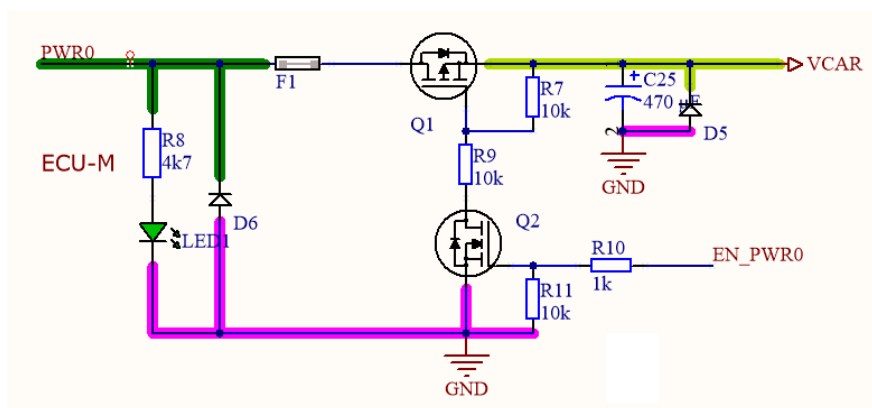
Správná funkce je detekována indikačními LED diodami. Schéma napájecí soustavy je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma napájecí soustavy.

Dále obsahuje čtyři obdobné bloky ovládající spouštění napětí pro další řídicí jednotky. Využitím zapojení dvou tranzistorů typu MOSFET s kanálem P a kanálem N. Pokud je výstupní vývod v „logické 1“, která odpovídá napájecímu napětí mikrokontroléru (v tomto případě 3,3 V), je NMOS otevřený a gate PMOS je tak spojen se zemí a proud teče kanálem

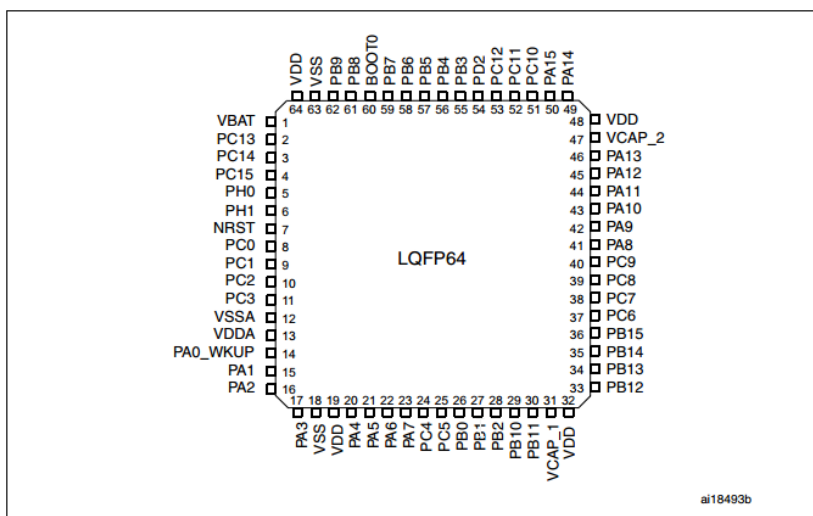
N. Případnému poškození blokovacího elektrolytického kondenzátoru při přepólování je zabráněno zapojením ochranné diody. Jako pojistky budou používány standardní automobilové nožové pojistky, na které byl vybrán držák s montáží THT. Toto zachycuje obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Schéma spínání napětí.

2.2 Logická jednotka

Jako výpočetní jednotka byl zvolen mikročip STM32F405VGT6 v pouzdře LQFP64 o rozměrech 10×10 mm. Tento mikrokontrolér může pracovat na frekvenci až 168 MHz, obsahuje 1 MB flash paměti, disponuje třemi 12 bitovými A/D převodníky a má dva řadiče pro CAN protokol [7]. Pouzdro mikrokontroléru je znázorněno na obrázku 2.4

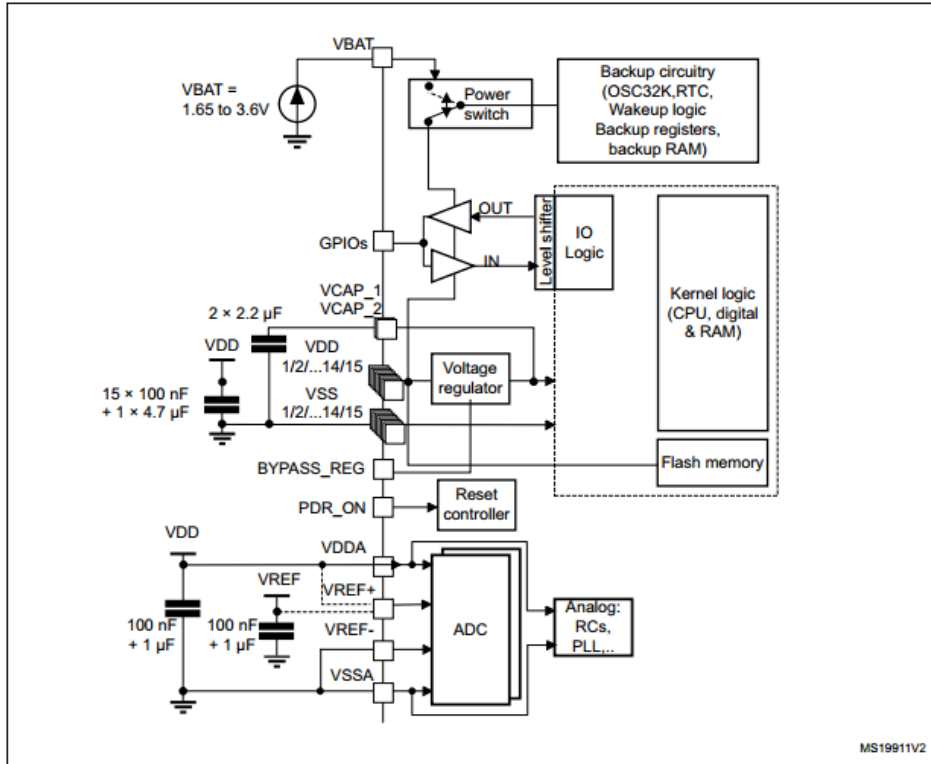


Obrázek 2.4: Zvolené pouzdro mikročipu STM32F405 [7].

Katalogový list popisuje správné zapojení všech napájecích a zemních vývodů, viz obrázek 2.5. Je třeba přidat pět blokovacích keramických kondenzátorů, vždy jeden pro každý napájecí vývod, a další pro VDDA a pro VBAT vývody, které jsou také připojeny k napájení.

Dle schématu zapojení napájení byl přidán paralelně zapojený kondenzátor o velikosti $1 \mu\text{F}$ k VDDA vývodu a další paralelně zapojený kondenzátor $4,7 \mu\text{F}$ k napájecím vývodům.

Mikrokontrolér bude využíván v zapojení s externím krystalovým rezonátorem o frekvenci 16 MHz, pro který je potřeba vypočítat hodnoty paralelních kondenzátorů. Dle katalogového



Obrázek 2.5: Schéma zapojení napájecích vývodů mikrokontroléru [7].

listu [8] je kapacita krystalu c_0 , která odpovídá kapacitě mezi elektrodami na výbrusu, rovna 7 pF a kapacita c_L je rovna 18 pF. Dle [9] vycházíme z rovnice:

$$c_L = \frac{c_{x_1} c_{x_2}}{c_{x_1} + c_{x_2}} + c_0. \quad (2.1)$$

Předpokládáme, že

$$c_{x_1} \approx c_{x_2} = c_x, \quad (2.2)$$

čímž získáme

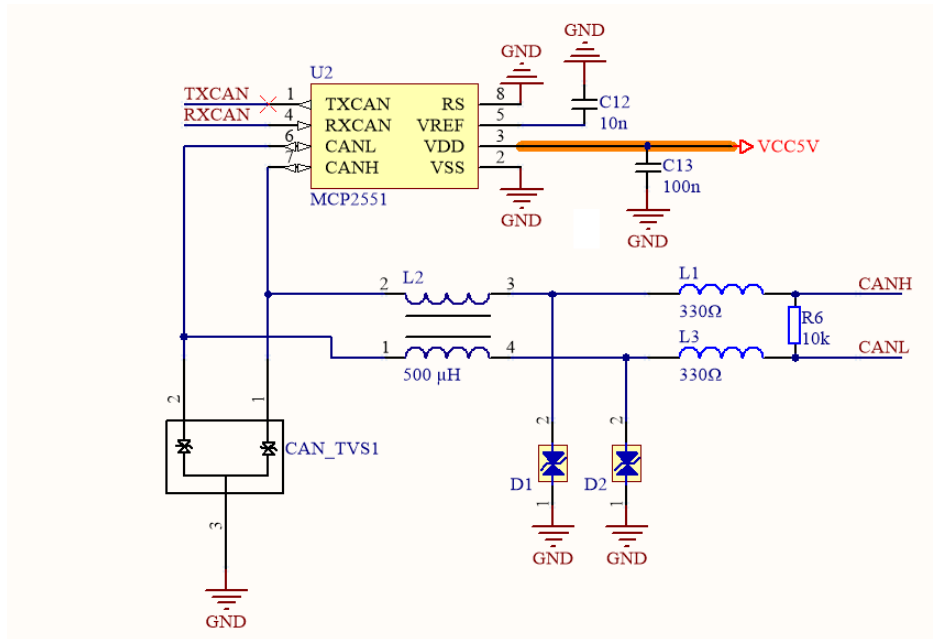
$$c_L = \frac{c_x}{2} + c_0, \quad (2.3)$$

což po dosazení dává

$$c_{x_1} \approx c_{x_2} = 2 \cdot (18 - 7) \text{ pF} = 22 \text{ pF}. \quad (2.4)$$

Kde c_{x_1} a c_{x_2} jsou vypočítané hodnoty paralelních kondenzátorů.

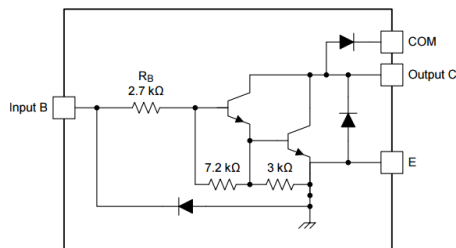
Dále byl připojen CAN budič MCP2551, který implementuje fyzickou vrstvu podle standardu ISO11899 a podporuje rychlost až 1 Mb/s. K základnímu zapojení je ještě na napájecí vývod připojen blokovací kondenzátor 100 nF dle doporučení výrobce. Součástka umožňuje připojení referenčního napětí, které je připojeno přes kondenzátor 10 nF k zemi. Dále je možné připojit na vývod Rs odpor který ovlivňuje dobu trvání náběžné a sestupné hrany. Odpor ovšem zůstane nepřipojen, a budič je tak ve vysokorychlostním tzv. HIGH-SPEED módu [10], který všechny řídicí jednotky ve voze využívají. Dále byly přidány ochranné prvky pro samotnou sběrnici. Pro každou větev byla přidána TVS dioda jako ESD ochrana, feritové jádro, a cívka 500 µH, která filtruje soufázové rušení. Schéma zapojení je na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Schéma zapojení CAN budiče MCP2551.

2.3 LED signalizace

Signalizace na palubní desce se stává ze 14 LED diod různých barev, které jsou napájeny napětím 5 V. Pro spínání jednotlivých diod jsou použita dvě Darlingtonová pole ULN2003A. Každé obsahuje 7 párů NPN transistorů v Darlingtonově zapojení [11], viz obrázek 2.7. Jelikož ochranné diody pro indukované špičky nebudou využity, zůstává vývod COM nezapojený.



Obrázek 2.7: Schéma zapojení vývodů ULN2003A [11].

Na palubní desku jsou pro signalizaci zvoleny LED diody firmy Würth Elektronik, v pouzdru 3528 viz obrázek 2.8.

Velikosti odporů záleží na úbytku napětí LED diody a svítivosti odpovídající procházejícímu proudu.

Svítivost všech diod je zvolena $I_v \leq 100$ mcd, čemuž pro různé barvy LED diod odpovídá jiný proud. Vycházíme ze vzorce pro sériově zapojenou diodu

$$I_F = \frac{V_{cc} - V_F}{R}. \quad (2.5)$$

Pro oranžovou LED diodu je $I_F = 7$ mA a $V_F = 2$ V. Odpor tedy bude

$$R = \frac{V_{cc} - V_F}{I_F} = \frac{5 - 3}{7 \cdot 10^{-3}} \Omega = 285,7 \Omega. \quad (2.6)$$

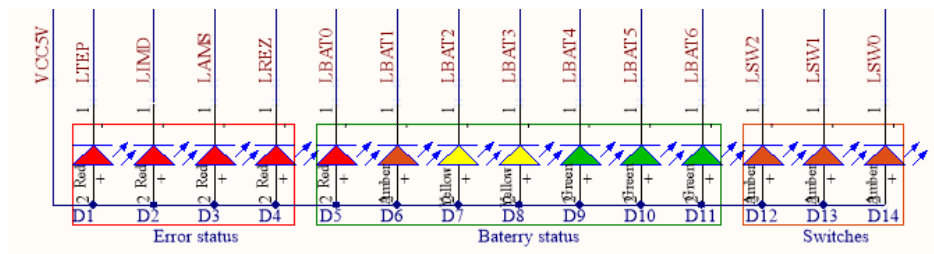


Obrázek 2.8: Použité LED Diody SMD 3528 [12].

Proto byl zvolen odpor $300\ \Omega$. Další hodnoty odporů jsou v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Zvolené odpory pro danou barvu

Barva	Označení	V_F	I_F	R
Zelená	LBAT6	3,1	3	620
	LBAT5			
	LBAT3			
Oranžová	LBAT2	2	7	300
	LBAT1			
	LSW2			
	LSW1			
	LSW0			
Červená	LBAT0	2	7	300
	LREZ			
	LAMS			
	LIMD			
	LTEP			

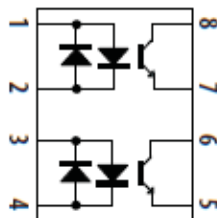


Obrázek 2.9: Schéma zapojení palubní desky.

Palubní zobrazovací panel je navrhnut jako samostatná deska plošných spojů s rozměry $130 \times 6\text{ mm}$ dle schématu na obrázku 2.9.

2.4 I/O část

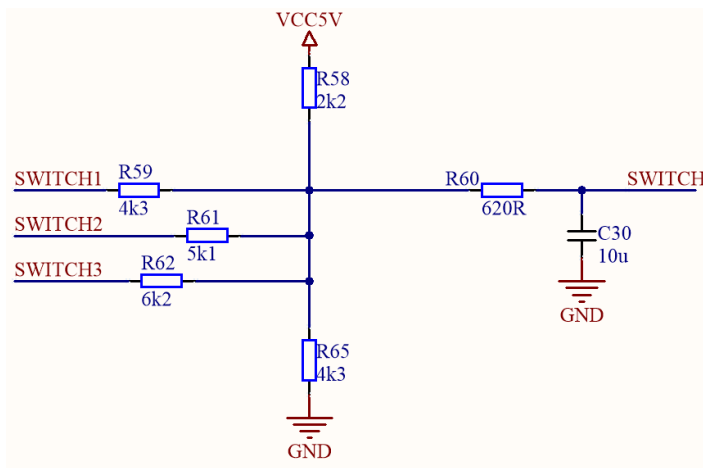
Tato část obsahuje komponenty pro vyhodnocení tlačítek, vypínačů SDC a přepínačů na palubní desce. Pro správné vyhodnocení stisknutí tlačítek a přerušení SDC byly použity dva optočleny ACPL-224, každý dle [13] obsahující dvě diody a fototranzistor viz obrázek 2.10.



Obrázek 2.10: Schéma zapojení ACPL-224 [13].

Na vstupních vývodech 1 a 3 jsou připojeny děliče napětí z 24 V na 7,65 V a vývody 2 a 4 jsou připojeny na společnou zem. Pokud je na SDC napětí, tak diody svítí a tím je fototranzistor otevřený a napětí 3,3 V je ve zkratu se zemí a tedy je na vstupním vývodu mikrokontroléru „logická 0“. V opačném případě, pokud dojde k přerušení SDC, je fototranzistor zavřený a vstupní vývod je v „logické 1“, a mikrokontrolér hlásí chybu. Obdobně pro vyhodnocení stisknutí tlačítek.

Pro vyhodnocení stavů přepínačů je využit A/D převodník, který bude určovat stav dle napěťové úrovně na vstupním vývodu. Každý přepínač spíná na zem a vytvoří tak pomocí odporových děličů jinou napěťovou úroveň dle obrázku 2.11. A/D převodník má referenční hodnotu napětí 3,3 V, je tedy použit dělič i na nulovou úroveň.



Obrázek 2.11: Schéma děliče napětí a filtru pro vyhodnocení stavu přepínačů.

Příklad výpočtu určení napěťové úrovně pro přepínač č. 1:

$$V_U = \frac{R_{59} || R_{65}}{(R_{59} || R_{65}) + R_{58}} \cdot 5V = \frac{\frac{R_{59} R_{65}}{R_{59} + R_{65}}}{\frac{R_{59} R_{65}}{R_{59} + R_{65}} + R_{58}} \cdot 5V. \quad (2.7)$$

Napěťové úrovně pro logické stavy přepínačů jsou v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Přehled logických stavů přepínačů

Switch 1	Switch 2	Switch 3	Napětí
0	0	0	3,31 V
0	0	1	2,68 V
0	1	0	2,57 V
0	1	1	2,18 V
1	0	0	2,47 V
1	0	1	2,10 V
1	1	0	2,04 V
1	1	1	1,77 V

Dále je na výstupu děliče připojen low-pass filtr, pro filtraci případných překmitů. K návrhu filtru je použit vzorec dle [14]

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (2.8)$$

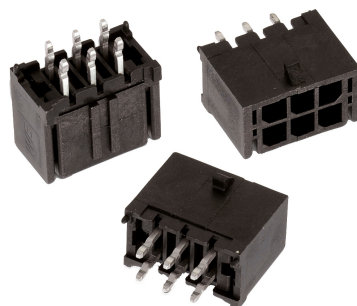
kde je zvolena cut-off frekvence $f_c = 25 \text{ Hz}$ a kondenzátor C jako $10 \mu\text{F}$:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi \cdot 25 \cdot 10^{-5}} \Omega. \quad (2.9)$$

Z řady E24 byl použit odpor 620Ω .

2.5 Konektory

Do jednotky ECUF přichází dva kabelové svazky: svazek B a svazek C, které jsou pomocí konektorů vhodně oddělené, aby bylo v případě potřeby možné odpojit pouze daný svazek. Dále jsou přidány konektory pro periferie, které takto nebudou součástí hlavních svazků a oproti ložskému roku tak bude jejich instalace mnohem jednodušší. Jako periferie jsou označeny palubní zobrazovací panel, části SDC, tedy SDBC a Inertia vypínače a přepínače na palubní desce. Z důvodu snahy o použití pouze jednoho typu konektoru jsou zvoleny dvojřadé konektory WR-MPC3 o rozteči 3mm od firmy Würth viz obrázek 2.12.



Obrázek 2.12: Použité konektory WR-MPC3 [15].

Palubní zobrazovací panel bude spojen s hlavní jednotkou plochým 16 žilovým kabelem přes k tomu určený konektor WR-FPC. Dva vývody budou sloužit k napájení a zbylých 14 vývodů bude použito na spínání jednotlivých LED diod.

Kapitola 3

Návrh desky plošných spojů

Při návrhu desky plošných spojů je podle [6] potřeba vytvořit pro každou součástku její pozdro (tzv. footprint), které tuto součástku reprezentuje na dané vrstvě plošného spoje, následující krok je nastavení technologických podmínek dle zvoleného výrobce. Potom se zvolí obrys desky, rozmístění součástek, a následně probíhá vedení spojů. Je důležité brát důraz na finální kontrolu splnění návrhových pravidel. V každé fázi návrhu je dle [6] třeba vzít v úvahu tři hlediska:

- *Vyrobiteľnosť*
- *Osazování a pájení*
- *Elektrická funkce*

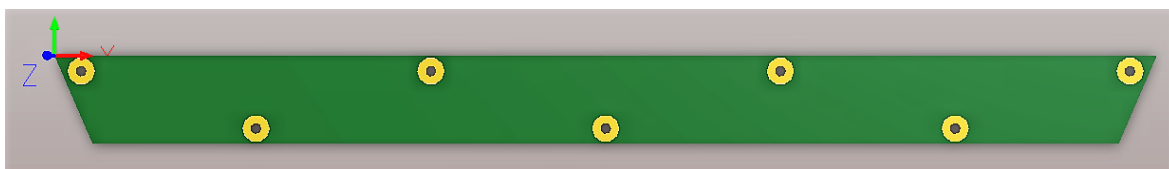
Deska musí být navržena tak aby se dala vyrobit. Je potřeba určit počet vrstev DPS, respektovat třídy přesnosti a znát technologické možnosti výrobců. Třídy přesnosti určují minimální šířky spojů, izolační vzdálenosti, průměry vrtáků pro tvorbu prokůvů a montážních otvorů, a další podmínky. Při tvorbě DPS budou použita návrhová pravidla splňující výrobní možnosti firmy Pragoboard a.s. [16].

Všechny zvolené součástky jsou způsobilé pro ruční osazování a pájení s využitím ruční pájky, případně pájecí stanice vybavené horkovzdušnou pistolí, která se využije například pro pájení mikrokontroléru.

Na základě znalosti funkce obvodu navrhovaného plošného spoje musí být provedeno správné rozmístění součástek, při návrhu vedení spojů musí být respektována pravidla maximálního proudového a napětového zatížení spojů, otázky přeslechů, impedancí, zpoždění při šíření signálu, způsobu zemnění, odvodu tepla, elektromagnetické kompatibility, a dalších [6]. Nejdříve je potřeba zvolit tvar desky, umístění montážních otvorů, počet vrstev a třídu přesnosti. Následně vhodně rozmístit jednotlivé komponenty na horní či dolní vrstvu desky, tak aby cesty z mědi šly definovat co nejjednodušeji.

3.1 Tvar desky

Deska je ve tvaru obráceného rovnoramenného lichoběžníku s vrchní stranou délky 290 mm, spodní stranou délky 270 mm a výškou 23 mm. Na desce je v pravidelných intervalech rozmístěno 7 uzemněných montážních otvorů o průměru 3,1 mm pro šrouby typu M3. Tyto otvory jsou rozmístěny proti sobě, střídavě blízko horního a dolního okraje, aby nedocházelo k přílišnému namáhání desky při vyjmutí kabelového svazku, viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: 3D model rozložení desky v programu Altium Designer.

3.2 Návrhová pravidla

Program Altium Designer má rozsáhlé možnosti návrhových pravidel, které ovlivňují výsledný návrh desky. Tyto pravidla je nutné nastavit hned po založení nového projektu dle technologických možností výrobce a zvolené třídy přesnosti. Další velmi užitečnou funkcí je kontrola splnění návrhových pravidel, kterou je vhodné použít před generováním výrobních dat, kdy program vypíše seznam zjištěných chyb, které porušují dané pravidlo. Návrhář potom může identifikovaný problém snadno opravit. Program také obsahuje editor vlastních pravidel a velmi užitečnou tvorbu výjimek pro jednu i více součástí i celých částí desky, takže výsledný návrh může být velmi komplexní. Program také umožňuje barevně zvýraznit jednotlivé dráhy či plochy pro lepší orientaci v návrhu. Přehled vybraných návrhových pravidel je v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Přehled návrhových pravidel

Minimální vzdálenost		0,3 mm
Šířka spoje	Minimální	0,2 mm
	Preferovaná	0,5 mm
	Maximální	3,0 mm
Průměr prokoku	Minimální	0,5 mm
	Preferovaná	0,8 mm
	Maximální	7,0 mm
Průměr vrtání prokoku	Minimální	0,3 mm
	Preferovaná	0,6 mm
	Maximální	3,1 mm
Odsazení nepájivé masky		0,1 mm
Odsazení od kraje DPS		0,2 mm

3.3 Popis vrstev

Z důvodu nedostatku prostoru pro spoje byla zvolena čtyřvrstvá deska plošných spojů, která má rozložení dle tabulky 3.2. Vrstvy Top Layer, Power Layer, Ground Layer a Bottom Layer jsou vždy odděleny vrstvou dielektrika.

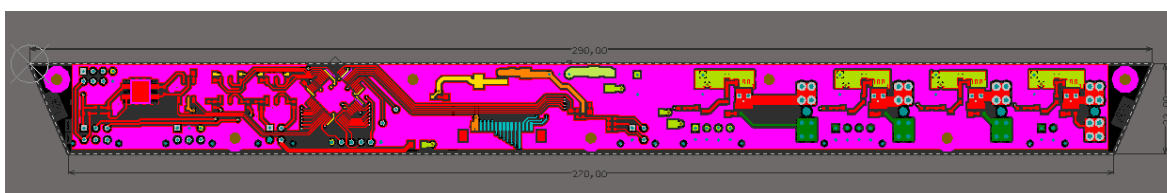
Na horní vrstvu je umístěna většina součástek a co nejvíce spojů. Na spodní vrstvu jsou umístěny zbývající součástky a pomocné spoje. Při rozmístění je dodržováno rozmístění obdobné jako ve schématu. Veškeré analogové součástky jsou umístěny na pravou stranu desky plošných spojů do čtyř souměrných součástkových bloků, uspořádaných vždy kolem držáku pojistky, zatímco logická část je umístěna na straně levé. Konektory jsou vždy situovány pod odpovídající obvodovou část, blízko dolnímu okraji desky. Na obrázku 3.2 je znázorněna vrstva Top Layer, fialová barva značí uzemnění, světle zelená odpovídá síti 24 V a žlutá síti 3,3 V.

Power layer, znázorněna na obrázku 3.3, obsahuje hlavně napájecí polygony 24 V pro analogovou část a 3,3 V pro logickou část, dále pomocné dráhy vedoucí napětí 5 V a dráha vedoucí napájení SDC. Tímto rozložením se ušetřilo důležité místo v horní vrstvě.

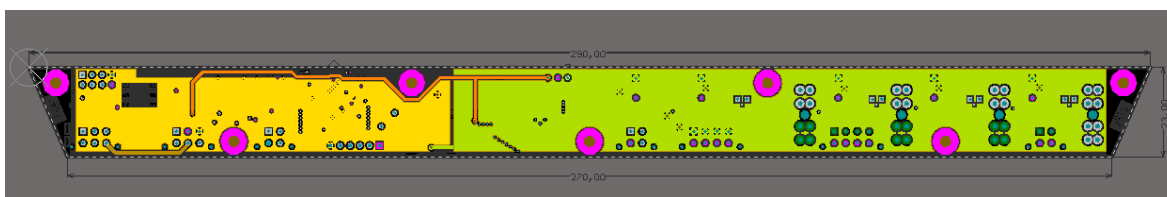
Obdobně Ground layer obsahuje zemnicí plochu po celé šířce vrstvy. Zem je vhodně spojená prokovy s vrstvami Top Layer a Bottom Layer. Pro vhodné impedanční přizpůsobení

Tabulka 3.2: Přehled návrhových vrstev

Název vrstvy	Funkce
Top Overlay	Servisní potisk na horní vrstvě
Top Solder	Nepájivá maska pro horní vrstvu
Top Layer	Rozmístění součástek, dráhy spojů,
Power Layer	Napájecí vrstva pro 24 V a 3.3 V
Ground Layer	Zemnicí vrstva
Bottom Layer	Dodatečné umístění, součástek, pomocné cesty
Bottom Solder	Nepájivá maska pro dolní vrstvu
Bottom Overlay	Servisní potisk na dolní vrstvě



Obrázek 3.2: Zobrazení vrstvy Top Layer.



Obrázek 3.3: Zobrazení vrstvy Power Layer.

obsahuje horní i dolní vrstva polygon na celé ploše desky, který je připojen na zem.

Na dolní vrstvě jsou rozmístěny blokovací kondenzátory pro mikrokontrolér, dva integrované obvody ULN2003A, které se svými rozměry nevešly na horní vrstvu a dále už jen ochranné diody.

Top a Bottom Overlay obsahují technické potisky pro identifikaci a osazování součástek a velmi důležité popisky konektorů pro jejich rychlou identifikaci při testování a případném hledání chyby.

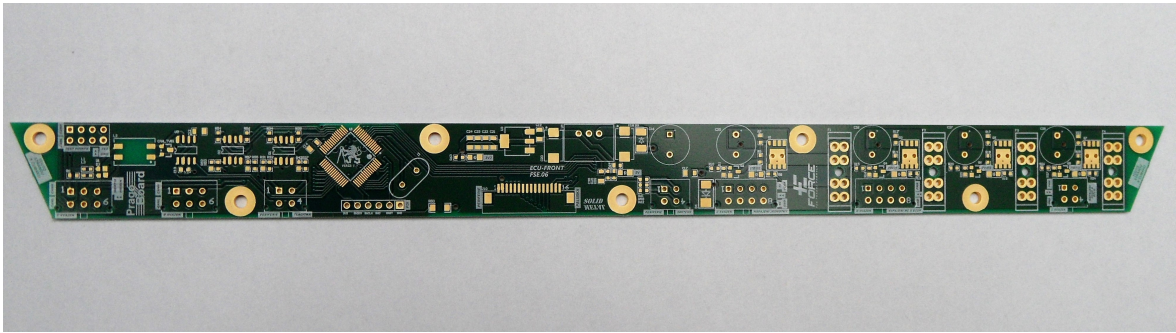
3.4 Výroba a osazení

Deska plošných spojů sponzorsky vyrobená firmou Pragoboard s.r.o. je na obrázku 3.4.

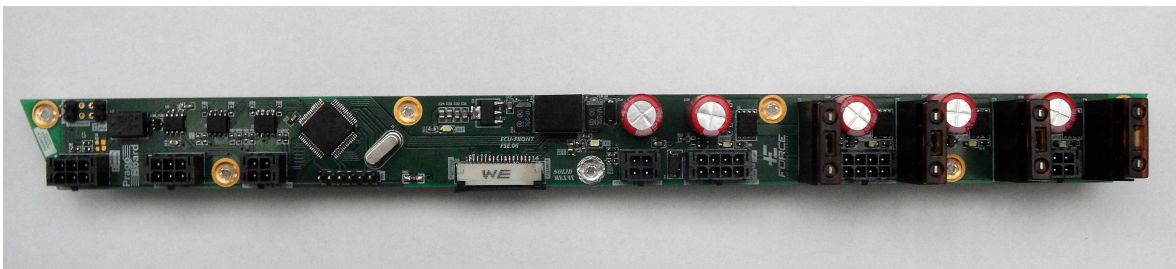
Osazení desky plošných spojů bylo provedeno ručně s pomocí pájecí stanice vybavené horkovzdušnou pistolí. Při pájení bylo použito gelové tavidlo Future Rework Jelly. Nejprve byla osazena napájecí část a vyzkoušeno, zda je všude odpovídající napětí, aby se předešlo případnému poškození logické části. Příklad osazené desky plošných spojů je na obrázku 3.5.

Deska plošných spojů pro palubní zobrazovací panel je navrhována obdobným způsobem. Vyrobená deska plošných spojů je na obrázku 3.6.

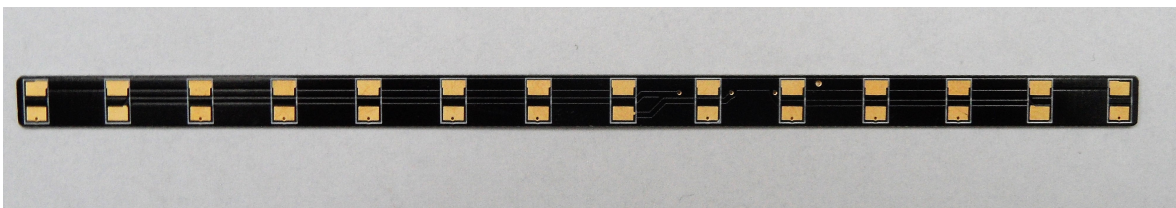
Zkompletované osazení je na obrázku 3.7.



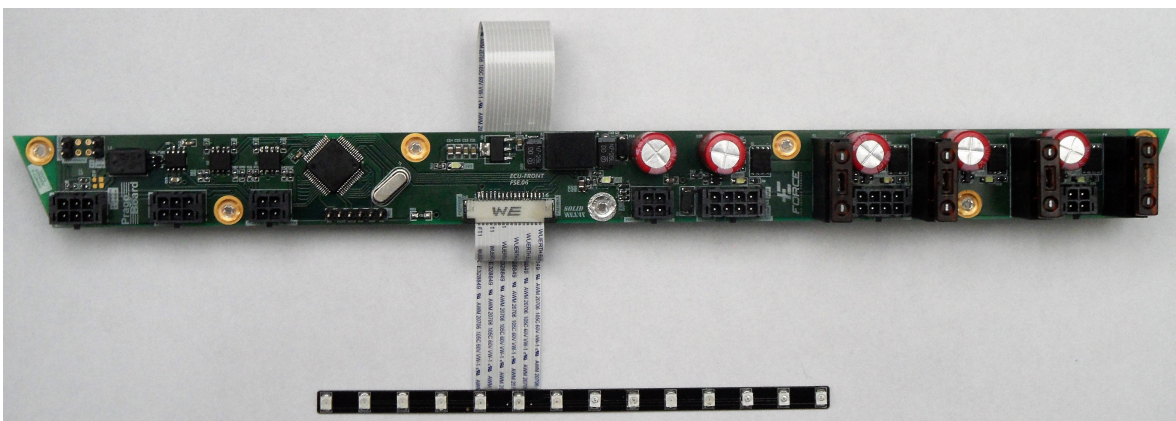
Obrázek 3.4: Vyrobená DPS, vrchní strana.



Obrázek 3.5: DPS po osazení, vrchní strana.



Obrázek 3.6: Vyrobená DPS pro palubní zobrazovací panel.



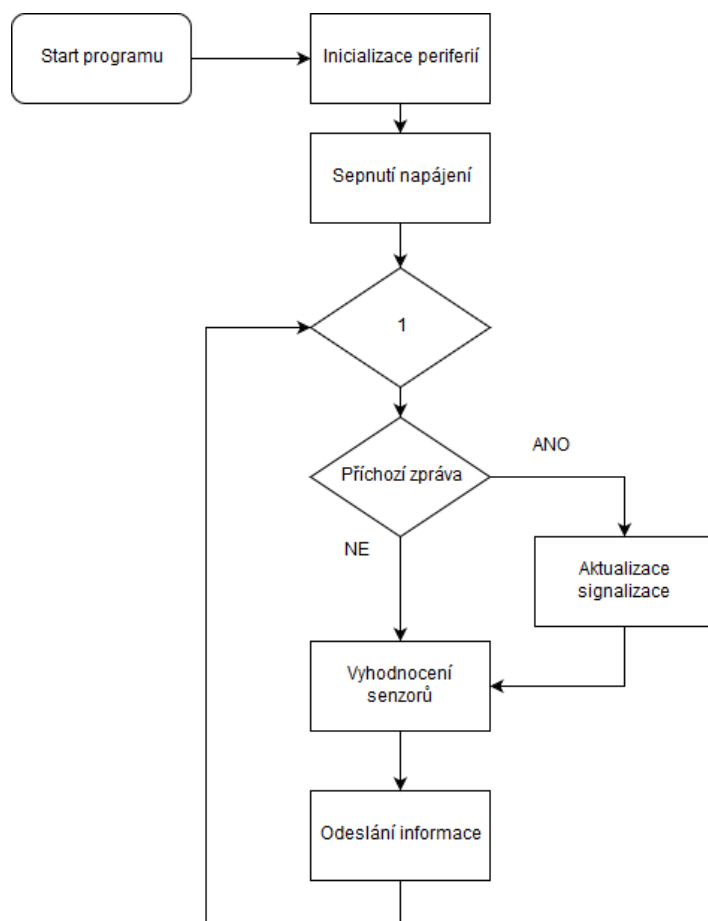
Obrázek 3.7: Zkompletované osazené DPS.

Kapitola 4

Programová část

Při psaní programu je využito nástroje STM32CubeMX a vývojového prostředí Keil μ Vision. Pro nastavení přijímání, odesílání a celkové struktury zpráv je použit týmový nástroj CANdb, který kombinuje funkce přehledné databáze zpráv s intuitivním uživatelským rozhraním a generátoru kódu. Veškerý kód je psán v programovacím jazyce C.

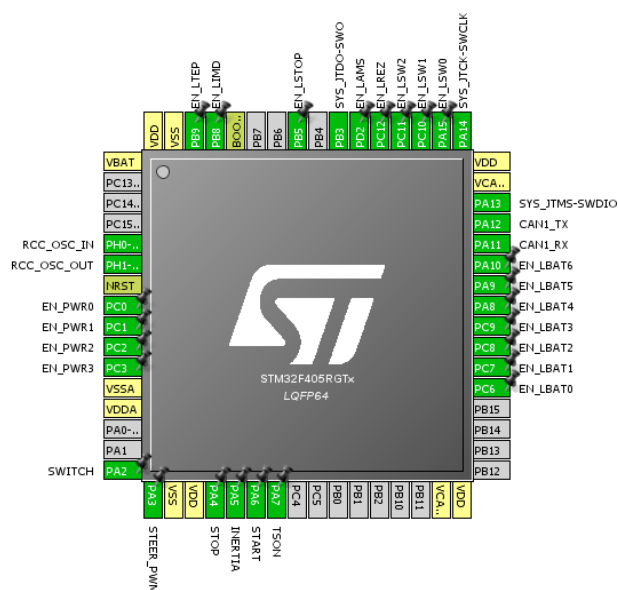
Vývojové prostředí STM32CubeMX je nástroj pro vývojáře, který usnadňuje základní konfiguraci všech periférií MCU a výrazně tak ulehčuje tvorbu programu. Toto prostředí umožňuje přesný výběr mikroprocesoru, přiřazení jednotlivých vývodů, konfiguraci periférií a následné vygenerování kódu, který vývojář upraví podle svých dalších požadavků [17]. CubeMX spolupracuje s prostředím Keil μ Vision a vytvoří nový projekt pro tvorbu programu a nainportuje všechny potřebné knihovny pro správnou činnost MCU. Keil μ Vision dále umožňuje kompilaci projektu, nahrání do flash paměti mikrokontroléru využitím programátoru ST-LINK/V2, pomocí kterého je možné následné ladění programu. Na obrázku 4.1 je blokové schéma programu.



Obrázek 4.1: Blokové schéma programu.

4.1 Základní nastavení

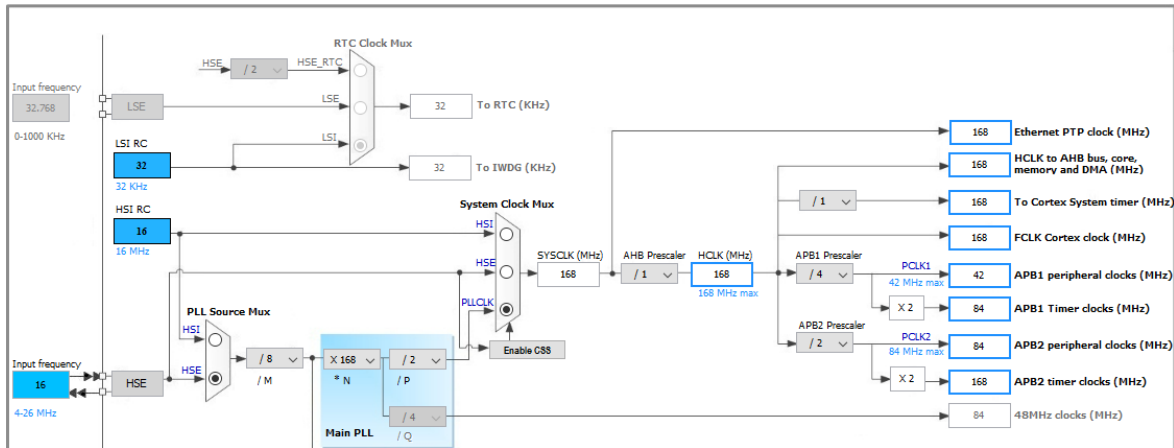
Nejprve zvolíme typ mikrokontroléru a přiřadíme jednotlivým vývodům jejich funkci a označení viz obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Konfigurace vývodů MCU v programu CubeMX.

CubeMX vygeneruje kód, který otevřeme jako projekt v μ Vision a můžeme dopsat vlastní funkce.

Následuje konfigurace systémových hodin příkazem `SystemClock_Config()`. V těle této funkce se nejdříve nastaví zdroj signálu na externí (HSE), zvolí spuštění fázového závěsu, na jehož vstup se přivede přes multiplexor HSE signál, následuje vstupní dělič (PLL M) a výstupní násobič (PLL N), následovaný děličem pro systémový hodinový signál (PLL P). Výstup PLL obvodu je veden do vstupu systémových hodin nastavením příslušného multiplexoru na PLLCLK. Signál se dále nedělí a výsledná frekvence signálu je požadovaných 168 MHz. Tento signál se potom distribuuje pro periferie APB1 a APB2 a jejich příslušné časovače [18]. Příklad tohoto nastavení v programu CubeMX je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Nastavení systémových hodin MCU v CubeMX.

4.2 Vstup a výstup

Výstupní vývody ovládají LED signalizaci a spouštění napětí, vstupní vývody jsou potřebné pro určení logického stavu tlačítek TSON a START a kontrolu SDC.

Pro inicializaci I/O použijeme funkci `MX_GPIO_Init()`, která nastaví systémové hodiny PCLK1 pro periférii dané skupiny vývodů a každému z nich přiřadí funkční mód. Mód určuje, zda je vývod vstupní nebo výstupní. Pro vstupní vývody je dále nastaven režim pro pull-up rezistor na vstupu a MCU tak správně rozezná změnu logické úrovně. Pro výstupní vývody se nastaví napěťová úroveň výstupu a také rychlost změny.

Pro spínání napětí je využito funkce `HAL_GPIO_TogglePin()`, která má jako první argument označení portu a druhý argument číslo vývodu. Tato funkce přepne vývod z jedné logické úrovně do úrovně druhé, v našem případě z „logické 0“ do „logické 1“. Tato funkce je použita čtyřikrát ve vlastní funkci `Units_Power_Init()`, která postupně spustí všechny čtyři jednotky. Signalizaci LED diod je řešena obdobně ovšem za použití funkce `HAL_GPIO_WritePin()`, která má tři parametry, první dva obdobně jako funkce `TogglePin()` a třetím se nastavuje logický stav. Příkladem použití je funkce pro rozsvícení jedné LED diody pro určení nabití akumulátoru

`HAL_GPIO_WritePin(EN_LBATO_GPIO_Port, EN_LBATO_Pin, GPIO_PIN_SET)`, kde `GPIO_PIN_SET` odpovídá „logické 1“ na výstupu.

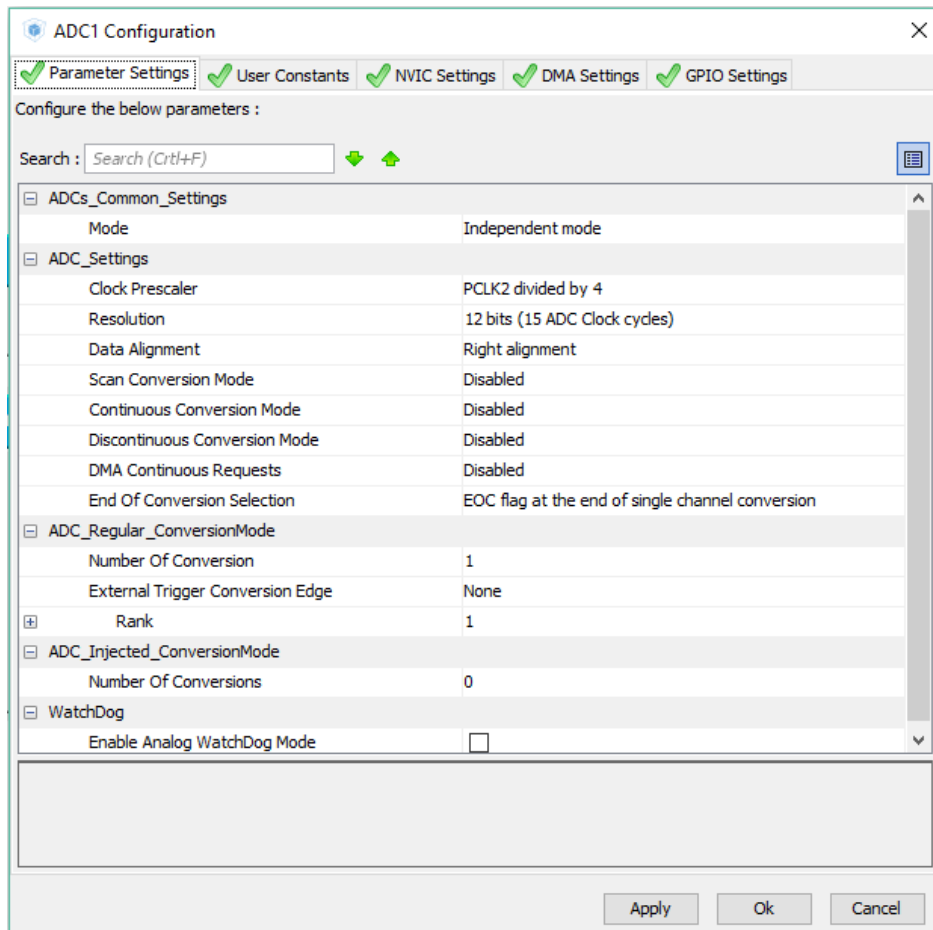
Pro určení vstupu je použito funkce `HAL_GPIO_ReadPin()` opět s argumenty označení portu a čísla vývodu. Výstupem této funkce je „logická 1“ či „logická 0“. Takto se kontroluje například stav stisknutí nouzového tlačítka `HAL_GPIO_ReadPin(STOP_GPIO_Port, STOP_Pin)`, který je následně odeslán v příslušné zprávě dalším řídicím jednotkám.

4.3 Měření napětí

Příkazem `MX_ADC1_Init()` provedeme inicializaci analogově digitálního převodníku. Funkce nastaví vstup hodinového signálu jako PCLK2 s dělením čtyřmi. Rozlišení na 12 bitů a zarovnání doprava, viz obrázek 4.4.

Výstupem převodníku je číslo mezi 0 a $2^N - 1$ kde N je rozlišení v bitech. V tomto případě bude tedy výstup převodníku pro 0 V odpovídat nule a pro referenční napětí 3,3 V bude výstup 4095.

Je třeba použít funkci `HAL_ADC_Start(&hadc1)` a dále funkci



Obrázek 4.4: Konfigurace AD převodníku v CubeMX.

`HAL_ADC_GetValue(&hadc1)`. Kde `hadc1` je struktura obsahující data převodníku. Podle výstupu převodníku je určen logický stav přepínačů a odeslán danou zprávou.

4.4 Měření úhlu natočení volantu

Pro určení úhlu natočení volantu je třeba vyhodnotit střihu vstupního PWM signálu s frekvencí 244 Hz viz [19]. Natočení $359,91^\circ$ odpovídá $4096 \mu\text{s}$ a naopak natočení 0° odpovídá $1 \mu\text{s}$. Úhel natočení volantu vypočítáme ze vztahu

$$Deg = \frac{t_{on} \times 360}{t_{on} + t_{off}}. \quad (4.1)$$

Kde t_{on} je doba po kterou se signál nachází v „logické 1” a obdobně t_{off} je doba po kterou se signál nachází v „logické 0”.

K tomu je použit časovač TIM2 v režimu Input capture. Přerušování nastane při každé vzestupné a sestupné hraně, při vzestupné hraně se aktualizuje počet taktů na jednu periodu signálu, při sestupné hraně se získá počet taktů pro dolní úroveň a může se jednoduše vypočítat střída, která je násobena 360 pro získání úhlu. Úhel odpovídající středové poloze volantu je uložen ve flash paměti MCU jako reference. Během jízdy se poté kontroluje změna úhlu v závislosti na referenci, a tím se získá polarita natočení volantu. Pilot může referenci kalibrovat stisknutím tlačítka na volantu, tím se odešle požadavek na kalibraci a dojde k novému uložení

úhlu středové polohy volantu. Pokud nedojde k přerušení po dobu delší než 50 ms předpokládá se, že byl senzor natočení volantu odpojen či poškozen a řídicí jednotce trakční kontroly je oznámena chybová situace.

4.5 Komunikace přes CAN protokol

Pro odesílání a přijímání zpráv je potřeba nastavit CAN řadič. CAN periferie využívá systémových hodin PCLK1 o frekvenci 42 MHz. Pro nastavení přenosové rychlosti 500 Kb/s je dle [20] použit předdělič o hodnotě 6, první bitový segment je nastaven na 11 časových kvant a druhý bitový segment na 2 časová kvanta.

Pro vytvoření přijímaných a odesílaných zpráv je využit kód vygenerovaný z týmové CAN databáze. Tento nástroj obsahuje databázi všech zpráv, pomocí kterých spolu řídicí jednotky komunikují, a implementuje snadný způsob vytvoření nové zprávy podle zadaných specifikací a následně vygeneruje kód, který stačí zahrnout do vlastního kódu programu řídicí jednotky. Tento nástroj vytvořil člen týmu Martin Cejp a výrazně usnadňuje práci s CAN protokolem. Prostředí umožňuje vytvořit vlastní zprávu, nastavit, jaká data bude obsahovat, s jakou periodou se bude posílat a také jaká bude její maximální doba pro doručení zprávy v milisekundách viz obrázek 4.5.

Basic information								
Name	Dashboard			Message ID	0x3C5 (p3_dev12_msg5)			
Description	Dashboard buttons & switches							
Sending period	113 ms			Timeout	0 ms			
Message fields								
Type	Size in bits	Name	Description	Unit	Factor	Offset	Array	
uint	1	tson	1-pressed / 0-not pressed	on/off	-	-	-	
uint	1	start	1-pressed / 0-not pressed	on/off	-	-	-	
uint	1	SW1	1-pressed / 0-not pressed	on/off	-	-	-	
uint	1	SW2	1-pressed / 0-not pressed	on/off	-	-	-	
uint	1	SW3	1-pressed / 0-not pressed	on/off	-	-	-	
Message layout								
	0	1	2	3	4	5	6	7
byte 0	tson	start	SW1	SW2	SW3	reserved	reserved	reserved

Obrázek 4.5: Příklad nastavení zprávy v CANdb.

V kódu je pak jednoduše použita funkce pro odesílání, kde jsou jako argument zadané hodnoty odesílaných dat. Pro přijetí je potřeba vytvořit strukturu odpovídající formátu dané zprávy a tato struktura se s přijetím zprávy aktualizuje a následně vyhodnotí. Přehled odesílaných zpráv a jejich obsah je v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Přehled odesílaných zpráv

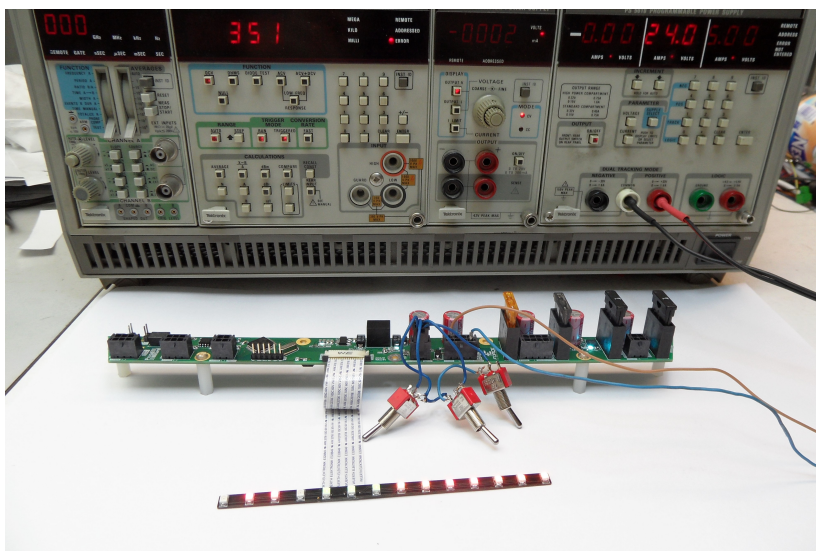
ID	Název zprávy	Perioda	Timeout	Zpráva		
				Veličina	Velikost	Popis stavů
0x0C4	ECUF / SDC	97 ms	2000 ms	SDBC	1 b	1 – OK 0 – NOT OK
				INERTIA	1 b	1 – OK 0 – NOT OK
0x3C5	ECUF / Dashboard	113 ms	0 ms	TSON	1 b	1 – ON 0 – OFF
				START	1 b	1 – ON 0 – OFF
				SW1	1 b	1 – ON 0 – OFF
				SW2	1 b	1 – ON 0 – OFF
0x3C6	ECUF / STW	11 ms	1000 ms	SW3	1 b	1 – ON 0 – OFF
				Angle	8 b	127 – left -127 – right
				Error	1 b	1 – OK 0 – NOT OK

Všechny řídicí jednotky posílají na sběrnici zprávy v pravidelných intervalech. Většinou probíhá komunikace pouze mezi dvěma jednotkami, ale některé zprávy, jako například zprávu o stavu bezpečnostního obvodu SDC, zpracovává vícero jednotek. Volba periody závisí na urgentnosti zprávy. Řídicí jednotky také kontrolují, zda nenastává výpadek v odesílání. Pokud je doba od posledního přijetí zprávy delší, než maximální doba za kterou musí být zpráva bezpodmínečně doručena, vyhlásí se chyba.

Kapitola 5

Testování

Pro testování bylo použito měřící stanoviště (viz obrázek 5.1) v prostorách týmové laboratoře a pro měření využito laboratorní zdroj a osciloskop Tektronix THS720P.



Obrázek 5.1: Měřící stanoviště.

Tímto způsobem byly ověřeny všechny základní funkce jednotky, byla proměřena správná činnost analogové sekce a zkontrolovány hodnoty napětí v logické sekci. Dále byla vyzkoušena funkce přepínačů, což je signalizováno rozsvícením příslušné LED diody na palubním zobrazovacím panelu. Pro testování tlačítek bylo využito pomocné zapojení tlačítek. Osciloskopem byla ověřena funkčnost CAN komunikace a ověřeny správné napěťové úrovně. Správný obsah zpráv se ovšem ověřil až po propojení všech ostatních řídicích jednotek kabeláží.

Při testování v laboratoři byly řídicí jednotky úspěšně propojeny kabelovými svazky a byl proveden test ochranného obvodu SDC, tedy postupná zkouška všech jeho bezpečnostních prvků a tomu odpovídající CAN komunikace. Nouzový vypínač na palubní desce i setrvačný vypínač Inertia fungují správně a zpráva o jejich stavu je přijata a následně zobrazena řídicí jednotkou volantu ECUS. Díky funkčnosti SDC mohla být také vyzkoušena startovací sekvence, která si vyžádala komunikaci jednotek ECUP, ECUF a ECUB a proběhla taktéž úspěšně.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout, vyrobit, naprogramovat a otestovat funkčnost řídicí jednotky ECU Front pro vůz FSE.06 studentského týmu eForce FEE Prague formula. V souladu s pravidly a na základě požadavků týmu byla navržena čtyřvrstvá deska plošných spojů v programu Altium Designer.

V úvodu této práce byly zmíněny předchozí verze této jednotky, na základě zkušeností z minulých let a potřeb týmu pro aktuální sezónu byla provedena analýza požadavků na řešení návrhu řídicí jednotky z hlediska mechanických a elektrických vlastností, po zvolení koncepce byly vybrány potřebné komponenty a v schématickém návrhu realizováno jejich zapojení. Při návrhu desky plošných spojů byl zvolen vhodný tvar desky pro umístění na rám vozu FSE.06. Většina součástí byla umístěna na horní vrstvu, pomocné součástky na vrstvu dolní, do bloků dle schémat a následně byly vedeny dráhy spojů. Deska plošných spojů byla vyrobená firmou Pragoboard s.r.o. a následně ručně osazena. Byla vyzkoušena základní funkčnost analogové větve a následně byl naprogramován mikrokontrolér STM32F405.

Řídicí jednotka ECUF odesílá zprávy o stavu tlačítek a přepínačů dalším řídicím jednotkám, spíná napětí pro další řídicí jednotky, implementuje kontrolu nouzových vypínačů v bezpečnostním okruhu SDC a zobrazuje přijaté informace na palubním zobrazovacím panelu. V testovacím zapojení s ostatními řídicími jednotkami byla ověřena její funkčnost. Jednotka ECUF je umístěna na voze FSE.06.

Pro další verzi řídicí jednotky bude kladen důraz na zmenšení rozměrů a na nalezení řešení pro použití menšího počtu součástí. Také bude zváženo použití menšího mikroprocesoru s menším počtem vývodů a s nižší frekvencí.

Literatura

- [1] Formula student | eForce FEE Prague Formula. *EForce FEE Prague Formula* [online]. Praha: eForce FEE Prague Formula, 2010. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/cs/info/formulastudent#content>.
- [2] Tým | eForce FEE Prague Formula. *EForce FEE Prague Formula* [online]. Praha: eForce FEE Prague Formula, 2010. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/cs/info/team#content>.
- [3] *Formula Student Rules 2017* [online]. In: V1.1. Sassenburg: The Executive Committee of FSG, 2016, s. 1 - 128. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/uploads/media/FS-Rules_2017_V1.1.pdf.
- [4] 99902.057.jpg (1700x1700). In: *99902.057 Fuel cut-off inertia switch - Eurocarb* [online]. Eurocarb, 2017. Dostupné z: <http://www.dellorto.co.uk/wp-content/uploads/2016/09/99902.057.jpg>.
- [5] 5A165e_dm_213103940.jpg. In: *A165E Emergency Stop Switch (16-dia.)/Features | OMRON Industrial Automation* [online]. OMRON Industrial Automation, 2014. Dostupné z: https://www.ia.omron.com/Images/a165e_dm_213-103940.jpg.
- [6] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 8001033511.
- [7] STM32F405xx STM32F407xx. In: *Home | Microcontrollers | STM32 32-bit ARM Cortex MCUs | STM32F4 Series | STM32F405/415 | STM32F405RG* [online]. Rev 8 anglicky. STMicroelectronics, 2017, s. 1-202. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>.
- [8] HC49/U CRYSTAL. In: *Technical Documents* [online]. Spicewood: Abracon LLC., 2017, s. 1-4. Dostupné z: <http://www.abracon.com/Resonators/ab.pdf>.
- [9] How to calculate the value of crystal load capacitors? In: *LPC FAQs | NXP Community* [online]. 2016. Dostupné z: <https://community.nxp.com/thread/388856>.
- [10] MCP2551: High-Speed CAN Transceiver. In: *Data Sheets* [online]. Rev. F. Microchip Technology, 2010, s. 1-24. ISBN ISO/TS-16949:2002. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667f.pdf>.
- [11] ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays. In: *Technical Documents* [online]. Rev. O anglicky. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 1976, s. 1-33. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slrs027o/slrs027o.pdf>.
- [12] Family_WLSMTW_1411.jpg (1217x1004). In: *WL-SMTW SMD Mono-color TOP LED Waterclear | TOP LED | Würth Electronics Standard Parts* [online]. Würth Elektronik, 2017. Dostupné z: http://katalog.we-online.com/media/images/v2/Family_WL-SMTW_1411.jpg.
- [13] ACPL-224/ACPL-244. In: *Products | Optocouplers and Opto-Isolators | Industrial Plastic | Other Products | Phototransistors | ACPL-224-500E* [online]. Broadcom, 2017, s. 1-11. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-0753EN>.

- [14] RC Low-pass Filter Design Tool. *OKAWA Electric Design* [online]. OKAWA Electric Design, 2017. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRlowkeisan.htm>.
- [15] Family_WRMPC3_6620xx21122.jpg. In: *3.00mm Male Dual Row Vertical Header WR-MPC3 / Male Headers WR-MPC3 / Würth Electronics Standard Parts* [online]. Würth Elektronik, 2017. Dostupné z: http://katalog.we-online.com/media/images/v2/Family_WR-MPC3_6620xx21122.jpg.
- [16] Výrobní a technologické možnosti. *PragoBoard s.r.o. - vícevrstvé, dvou a jednovrstvé plošné spoje* [online]. PragoBoard, 2012. Dostupné z: https://www.pragoboard.cz/tech_moznosti.
- [17] STM32CubeMX: STM32 configuration and initialization C code generation. *User manual* [online]. Rev. 20. STMicroelectronics, 2017, s. 1-271. Dostupné z: www.st.com/resource/en/user_manual/dm00104712.pdf.
- [18] RM0090. *Reference manual* [online]. Rev. 14 anglicky. STMicroelectronics, 2017, s. 1-1745. Dostupné z: www.st.com/resource/en/reference_manual/DM00031020.pdf.
- [19] AS5045: 12 Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder. *Data Sheet* [online]. Rev. 1.7 anglicky. austriamicrosystems, 2010, s. 1-33. Dostupné z: <http://ams.com/eng/content/download/1288/7223/496>.
- [20] *CAN Bit Time Calculation* [online]. Dostupné z: <http://www.bittiming.can-wiki.info>.
- [21] Family_WRFPC_6861xx14422.jpg. In: *1.00mm SMT ZIF Horizontal Bottom Contact WR-FPC / ZIF Connectors WR-FPC / Würth Electronics Standard Parts* [online]. Würth Elektronik, 2017. Dostupné z: http://katalog.we-online.com/media/images/v2/Family_WR-FPC_6861xx14422.jpg.
- [22] UM1725: Description of STM32F4 HAL and LL drivers. *User manual* [online]. Rev 5 anglicky. STMicroelectronics, 2017, s. 1-1838. Dostupné z: www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105879.pdf.

Přílohy

Obsah CD

```
/.
├── BP_Stoudek.pdf
├── DPS
│   ├── FSE06_ECUF
│   │   ├── connectors.SchDoc
│   │   ├── ECUF_1.0.PcbDoc
│   │   ├── ECUF_main.SchDoc
│   │   ├── FSE06_ECUF.IntLib
│   │   ├── FSE06_ECUF.PrjPcb
│   │   ├── ion.SchDoc
│   │   ├── leds.SchDoc
│   │   ├── power.SchDoc
│   │   └── up_unit.SchDoc
│   └── FSE06_Palubka
│       ├── FSE06_PalubniD.IntLib
│       ├── FSE06_PalubniD.PrjPcb
│       ├── PalubniD_1.0.PcbDoc
│       └── PalubniD_main.SchDoc
├── Program
│   ├── ECUF.ioc
│   ├── CANdb_ECUF
│   │   └── CANdb_ECUF
│   ├── Drivers
│   ├── Inc
│   │   ├── calibration.h
│   │   ├── ECUF_CAN.h
│   │   ├── ECUF_Functions.h
│   │   ├── ECUF_main.h
│   │   ├── flash.h
│   │   ├── mxconstants.h
│   │   ├── stm32f4xx_hal_conf.h
│   │   ├── stm32f4xx_hal_conf.h~RF137035f9.TMP
│   │   └── stm32f4xx_it.h
│   ├── libs-tx
│   │   ├── include
│   │   │   └── eforce
│   │   │       ├── can.h
│   │   │       ├── ringbuf.h
│   │   │       └── tx.h
│   │   └── src
│   │       ├── can.c
│   │       └── ringbuf.c
│   ├── MDK-ARM
│   │   └── ECUF.uvprojx
│   └── Src
│       ├── calibration.c
│       ├── ECUF_CAN.c
│       ├── ECUF_Functions.c
│       ├── ECUF_main.c
│       ├── flash.c
│       ├── main.c
│       ├── stm32f4xx_hal_msp.c
│       └── stm32f4xx_it.c
```