

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Návrh jednotky palubní desky elektrické formule

Kryštof Pavlů

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlů**

Jméno: **Kryštof**

Osobní číslo: **507286**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh jednotky palubní desky elektrické formule

Název bakalářské práce anglicky:

Electric Formula Dashboard Unit Design

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte funkce a požadavky na jednotku palubní desky elektrické formule.
2. Navrhněte schématické zapojení jednotky palubní desky s využitím mikrokontroléru řady STM32H7. Palubní deska bude splňovat pravidla soutěže Formula Student a bude obsahovat dotykový displej. Se zbytkem vozu bude jednotka komunikovat pomocí sběrnice CAN FD.
3. Navrhněte desku plošných spojů.
4. Otestujte funkčnost zařízení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

1. ZÁHLAVA, Vít: Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-266-4.
2. STMicroelectronics. AN4861, Application note, LCD-TFT display controller (LTDC) on STM32 MCUs [Online]. 4. vydání. 2023.
3. STMicroelectronics. AN5307, Application note, Getting started with STM32H7A3/7B3 line and STM32H7B0 Value line microcontroller hardware development [Online]. 6. vydání. 2022.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Záhlava, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Vít Záhlava, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

Rád bych poděkoval Ing. Vítu Záhlavovi, CSc. za poskytnuté konzultace a cenné rady, které mi pomohly k vypracování této práce. Dále děkuji týmu eForce Prague Formula, díky kterému jsem měl příležitost získat hodnotné zkušenosti. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu při celém studiu.

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, 23. května 2024

Abstrakt

Tato práce popisuje proces návrhu jednotky palubní desky elektrické formule CTU.24 týmu eForce Prague Formula. Díky ní může pilot během jízdy sledovat stav vozu. Hlavními prvky jednotky jsou sedmipalcový dotykový LCD displej a mikrokontrolér STM32H7A3ZIT6. Návrh desky plošných spojů byl realizován v programu Altium Designer. V závěru práce jsou otestovány jednotlivé funkční bloky. Tato jednotka palubní desky bude následně použita na voze CTU.24 týmu eForce Prague Formula v závodní sezóně 2024.

Klíčová slova: Jednotka palubní desky, eForce, Formula Student, Deska plošných spojů

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.

Abstract

This thesis describes the design process of the dashboard unit of the eForce Prague Formula team's electric formula CTU.24. It allows the pilot to monitor the car's status while driving. The main elements of the unit are a seven-inch LCD touchscreen and an STM32H7A3ZIT6 microcontroller. The circuit board design was done in Altium Designer. At the end of the thesis, the individual functional blocks are tested. This dashboard unit will be subsequently used on the CTU.24 car of the eForce Prague Formula team in the 2024 racing season.

Keywords: Dashboard unit, eForce, Formula Student, Printed Circuit Board

Title translation: Electric Formula Dashboard Unit Design

Obsah

1 Úvod	1	7 Mechanická zástavba	39
2 Jednotka palubní desky	3	8 Osazení a ověření funkčnosti	41
2.1 Řešení na voze FSE.12	3	9 Závěr	43
2.2 Požadované řešení pro vůz CTU.24	4	A Bibliografie	45
3 Výběr displeje	7	B Schémata zapojení	49
3.1 Kritéria výběru	7		
3.1.1 Komunikační rozhraní	7		
3.1.2 Dotyková vrstva	8		
3.1.3 Jas	10		
3.1.4 Velikost	10		
3.1.5 Rozlišení	10		
3.2 Zvolený displej	11		
4 Výběr mikrokontroléru	13		
4.1 Kritéria výběru	13		
4.1.1 Pouzdro	13		
4.1.2 Počet signálových vstupů/výstupů	14		
4.1.3 CAN sběrnice	14		
4.1.4 Komunikace s displejem	14		
4.1.5 Externí RAM	14		
4.1.6 Flash paměť	15		
4.2 Zvolený mikrokontrolér	15		
5 Schematický návrh	17		
5.1 Hlavní deska	17		
5.1.1 Mikrokontrolér	18		
5.1.2 Externí flash paměť	20		
5.1.3 Externí RAM	21		
5.1.4 CAN sběrnice	22		
5.1.5 Napájení	23		
5.1.6 Připojení displeje	25		
5.1.7 Řízení indikátorů	26		
5.1.8 Tlačítko	29		
5.1.9 Bzučák	30		
5.1.10 Konektory	30		
5.2 Indikátorová deska	31		
5.2.1 Senzor okolního osvětlení	32		
5.2.2 Indikátory	32		
6 Návrh desek plošných spojů	33		
6.1 Hlavní deska	33		
6.2 Indikátorová deska	37		

Obrázky

2.1 Pohled do kokpitu elektrické formule eForce FSE.12.	4	5.12 Schematické zapojení zdroje 5 V.	24
2.2 Jednotka palubní desky AiM MXS Strada. Převzato z [9].	5	5.13 Schematické zapojení zdroje 3,3 V.	24
2.3 Blokové schéma jednotky palubní desky pro vůz CTU.24.	6	5.14 Schematické zapojení zdroje pro podsvícení displeje spolu s proudovým sledovačem.	25
3.1 Rezistivní dotykové vrstvy. Převzato z [4].	9	5.15 Schematické zapojení konektoru pro připojení dotykové vrstvy s ESD ochranou.	25
3.2 Dotyková vrstva založena na vzájemné kapacitě. Převzato z [4]. .	9	5.16 Schematické zapojení konektoru pro připojení displeje s ESD ochranami.	26
3.3 Vybraný displej KD070WVFP A043-C049A. Převzato z [5].	11	5.17 Funkční schéma SCS vícestavové logiky.	27
4.1 Typy pouzder mikrokontrolérů STM32. Převzato z [12].	13	5.18 Schematické zapojení zpracování SCS signálu TS OFF.	28
4.2 Vybraný mikrokontrolér STM32H7A3ZIT6.	15	5.19 Napájení komparátoru a zapojení jeho nevyužitého kanálu.	28
5.1 Schéma zobrazující schematické bloky hlavní desky a jejich provázanost.	17	5.20 Zapojení proudového zdroje pro indikátory.	29
5.2 Schematické zapojení napájení mikrokontroléru.	18	5.21 Tlačítko PB6B2FM5M1CAL05.	29
5.3 Propojení mikrokontroléru na základě STM32CubeMX.	19	5.22 Schéma zpracování signálů pro tlačítko.	30
5.4 Schematické zapojení signálů mikrokontroléru.	20	5.23 Schéma zapojení bzučáku.	30
5.5 Doplňkové komponenty mikrokontroléru - kontrolní LED indikátory a programovací konektor s ESD ochranou.	20	5.24 Konektor AS210-35SN.	31
5.6 Schematické zapojení flash paměti.	21	5.25 Schéma zapojení konektorů.	31
5.7 Schematické zapojení SDRAM paměti.	21	5.26 Schematické zapojení senzoru okolního osvětlení.	32
5.8 Izolovaný zdroj a digitální převodník.	22	5.27 Schéma zapojení konektoru a LED indikátorů na indikátorové desce.	32
5.9 Schematické zapojení CAN transceiverů.	22	6.1 Skladba hlavní desky.	33
5.10 Konektor pro připojení CAN převodníku a indikační LED.	23	6.2 Jednotlivé vrstvy plošného spoje hlavní desky.	35
5.11 Filtr vstupního napětí, dělič pro monitorování napětí, dioda jako ochrana proti opačné polaritě a LED indikace.	23	6.3 Rendery plošného spoje hlavní desky.	36
		6.4 Horní a dolní vrstva plošného spoje indikátorové desky.	37
		6.5 Rendery plošného spoje indikátorové desky.	37
		7.1 Render rozpadu mechanické zástavby.	39
		7.2 Rendery mechanické zástavby. . .	40

8.1 Termografický snímek desky plošných spojů.	42
8.2 Funkční jednotka palubní desky.	42

Tabulky

3.1 Základní parametry referenčních displejů.	7
5.1 Tabulka stavů SCS signálu.	27

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
LCD	Liquid Crystal Display
TFT	Thin Film Transistor
LTDC	Liquid Crystal Display Thin Film Transistor Display Controller
DSH	Dashboard
FSG	Formula Student Germany
AMS	Accumulator Management System
IMD	Insulation Monitoring Device
TS OFF	Tractive System Off
SDC	Shutdown Circuit
TSAL	Tractive System Active Light
AMI	Autonomous Mission Indicator
MCU	Microcontroller Unit
CAN	Controller Area Network
LED	Light-Emitting Diode
CTP	Capacitive Touch Panel
RTP	Resistive Touch Panel
DPI	Display Pixel Interface
DSI	Display Serial Interface
DBI	Display Bus Interface
RGB	Red Green Blue
LQFP	Low-profile Quad Flat Package
BGA	Ball Grid Array
GPIO	General Purpose Input/Output
RAM	Random Access Memory
FMC	Flexible Memory Controller
USB	Universal Serial Bus
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
ESD	Electrostatic Discharge
PWM	Pulse Width Modulation
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
SCS	System Critical Signal
FPC	Flexible Printed Circuits



Kapitola 1

Úvod

Studentský tým eForce Prague Formula vyvíjí a konstruuje elektrické monoposty, se kterými se následně účastní celosvětové soutěže Formula Student. Do roku 2023 existovaly pod záštitou ČVUT v Praze dva separátní týmy - eForce FEE Prague Formula zaměřený na vozy s elektrickým pohonem a CTU Cartech s pohonem spalovacího motoru. Letos byly týmy spojeny a vznikl zcela nový tým eForce Prague Formula. Spojení týmů představuje výzvu k postavení vozu CTU.24 s naprosto novým konceptem. Tento monopost bude, stejně jako jeho loňský předchůdce FSE.12 týmu eForce FEE Prague Formula, závodit ve dvou kategoriích. Jedná se o pilotovanou kategorii Formula Student Electric a bezpilotní kategorii Driverless Cup, kde budou využity autonomní systémy monopostu. Změny na voze se budou týkat i informačního rozhraní pilota, tedy i jednotky palubní desky.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat funkční jednotku palubní desky.

V úvodní kapitole budou shrnuta řešení na předchozích vozech obou týmů. Dále zde budou definovány požadavky, které má jednotka palubní desky pro vůz CTU.24 splňovat. Ve druhé kapitole bude uveden postup výběru dvou hlavních komponentů - displeje a mikrokontroléru, jejichž výběr zásadně ovlivňuje další návrh jednotky. V následujících kapitolách bude popsán návrh schematických funkčních bloků a samostatných desek plošných spojů. Na závěr bude vysvětlen proces osazování a testování jednotky.

Kapitola 2

Jednotka palubní desky

Jednotka palubní desky (anglicky označována jako dashboard unit, zkratkou DSH) je jednou z mnoha součástí elektrické formule. Na rozdíl od jednotky trakčního akumulátoru nebo například frekvenčních měničů není pro pohyb formule nezbytně nutná. Co se ale komfortu pilota týče, je jednotka palubní desky téměř nepostradatelnou věcí. Spolu s volantem, na kterém může být umístěný dotykový displej, umožňuje pilotovi sledovat při jízdě stav vozu a na základě toho upravovat styl jízdy.

Jednotka palubní desky musí splňovat body EV5.8.9, EV4.10 a EV6.3.7 dle pravidel soutěže Formula Student Germany (dále také FSG) [2]. V kokpitu vozu musí být umístěny tři indikátory stavu formule: AMS (Accumulator Management System), IMD (Insulation Monitoring Device) a TS OFF (Tractive System Off). Tyto indikátory slouží k vizuální kontrole bezpečnosti vozu. Indikátor AMS se musí rozsvítit ve chvíli, kdy jednotka trakčního akumulátoru rozpojí bezpečnostní obvod Shutdown Circuit (SDC), IMD při rozpojení SDC jednotkou detekující zkrat mezi trakčním napětím a zemním potenciálem vozu. TS OFF indikátor funguje jako aktivní indikace nepřítomnosti chyby a jeho stav určuje jednotka Tractive System Active Light (TSAL).

Pro splnění pravidel autonomní kategorie FSG je potřeba na palubní desce nebo u klíčků zapínajících autonomní systémy zobrazovat aktuální vybranou nebo probíhající autonomní disciplínu. Tato indikace se nazývá Autonomous Mission Indicator (AMI) a v pravidlech FSG je blíže specifikovaná v sekcích T14.11.4 a T14.11.5.

2.1 Řešení na voze FSE.12

Tým eForce FEE Prague Formula postavil v roce 2023 autonomní elektrickou formuli FSE.12. Vizuální informační systém tohoto vozu je rozdělen mezi dva klíčové komponenty - jednotku palubní desky a volant. Jednotka palubní desky disponuje indikátory rozdělenými do několika sekcí: asistenti, teploty, elektrický stav auta, autonomní mise (AMI) a indikace nabití. Tyto indikátory jsou RGB LED napájené přes proudové zdroje připojené k mikrokontroléru (MCU) pomocí sériové komunikace.

Palubní deska je koncipována pro jednoduchou a rychlou signalizaci o stavu auta během jízdy za pomoci změny barvy, jasů nebo blikání indikátorů. Na

druhou stranu jednotka volantu obsahuje dotykový LCD displej. Díky tomu se pilotovi mohou při jízdě zobrazovat daleko komplexnější informace o vozu. Strukturu zobrazovaných dat lze jednoduše měnit změnou grafického uživatelského rozhraní. Je zde také možnost důkladnějšího nastavování různých parametrů vozu díky dotykové vrstvě displeje. Ukázkou pohledu do kokpitu lze vidět na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Pohled do kokpitu elektrické formule eForce FSE.12.

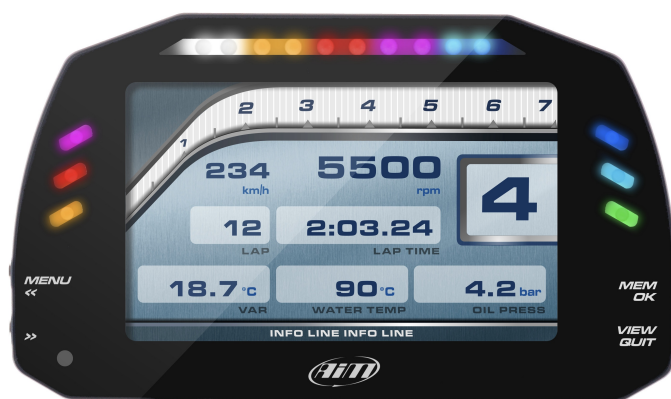
Kromě již zmíněných indikátorů lze na jednotce palubní desky FSE.12 nalézt také například 2 izolované sběrnice CAN 2.0 sloužící jako rozhraní pro komunikaci se zbytkem vozu. Dále je zde fotodioda, která snímá okolní osvětlení a podle jeho intenzity upravuje jas LED. Další funkcí je správa mechanických tlačítek na palubní desce. Jejich stavy jsou vyhodnocovány a následně odesílány pomocí CAN sběrnice do dalších jednotek. Některá tlačítka v sobě mají integrovanou LED indikaci, která opět slouží pro získání zpětné informace o stavu vozu. Jednotka je napájena z 24V nízkonapěťové větve.

2.2 Požadované řešení pro vůz CTU.24

Pro sezónu 2024 došlo v týmu eForce k velkým změnám. Kvůli sloučení s týmem CTU Cartech, spadajícím pod Fakultu strojní ČVUT v Praze, vzniká celkově nový koncept závodního auta pro rok 2024 pod názvem CTU.24. Ten ovlivňuje také jednotku palubní desky. Zásadní změnou je přesunutí barevného dotykového displeje z jednotky volantu na palubní desku. Tento krok vznikl na základě zpětné vazby od pilotů, kteří si stěžovali na horší viditelnost na displej umístěný na volantu.

Tým CTU Cartech dlouhodobě používal pro své formule se spalovacím motorem komerčně vyráběnou jednotku palubní desky AiM MXS Strada, která již displejem disponuje. Jednotku lze vidět na obrázku 2.2. Piloti byli s touto jednotkou spokojeni, avšak pro použití na vozu CTU.24 nebyla optimální. Jedním z důvodů byla například nevhodnost použití na elektrickém

voze. Jednotka byla navržena pro práci se spalovacími motory a většina předem nastavených šablon tak počítala se zobrazováním parametrů právě u spalovacích motorů. Z elektrického hlediska jednotka také nevyhovovala požadavkům a to například v komunikačním protokolu a napájení. Celkově vývojem vlastní palubní jednotky dojde k daleko větší flexibilitě.



Obrázek 2.2: Jednotka palubní desky AiM MXS Strada. Převzato z [9].

Z hlediska elektroniky mění integrace displeje na palubní desku prakticky celý koncept jednotky. Proto nebylo možné použít elektroniku z předchozího vozu FSE.12. V první řadě je potřeba ošetřit připojení a správnou komunikaci displeje s mikrokontrolérem a dále pak připojení jeho dotykového panelu. Pro obsluhu displeje je také potřeba integrovat externí paměť, která slouží ke zpracování obrazu a k jeho následnému přenosu na displej.

Mimo mechanické změny došlo v novém konceptu vozu i ke změnám v elektrice. První z nich je přechod na novější standard sběrnice propojující elektrické jednotky. Izolovaná sběrnice CAN 2.0 byla nahrazena novějším standardem CAN FD. Pro návrh izolovaného obvodu CAN tak bude potřeba implementovat součástky podporující CAN FD.

Další změnou je přechod na novou napěťovou napájecí úroveň. Doposud bylo trakční napětí regulováno na nízkonapěťové napětí 24 V. Letošní vůz bude disponovat neregulovaným napětím v poměru $\frac{1}{16}$ z trakčního napětí. To znamená, že se nízkonapěťová větev bude pohybovat od 32 V do 37,5 V v závislosti na nabití trakčního akumulátoru.

Pro splnění pravidel musí jednotka stále obsahovat indikátory AMS, IMD a TS OFF. Indikátory autonomní mise zůstanou součástí palubní desky. Nebudou však implementované v podobě řady LED indikátorů, ale budou se zobrazovat a vybírat na displeji.

Preference nastavení parametrů vozu (například tuhost podvozku nebo distribuce výkonu) se mezi piloty liší. Před jízdou bylo proto vždy potřeba, aby si pilot nastavil vůz podle svého uvážení. Pro pohodlnost a rychlejší nastavení vozu je tak pro jednotku palubní desky vozu CTU.24 dalším potřebným komponentem paměť, ve které se budou ukládat profily jednotlivých pilotů. Po spuštění vozu si tak pilot pouze vybere svůj profil a auto se samo uvede

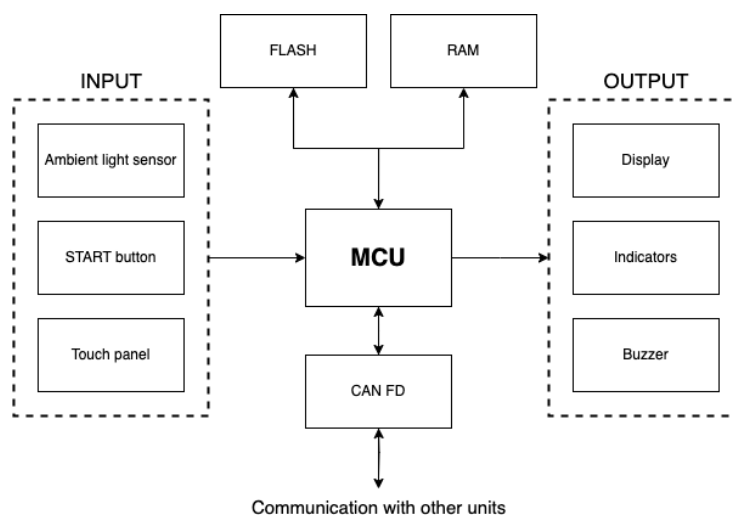
do jeho preferovaného nastavení, které si dále může měnit. Dalším využitím této nevolatilní paměti bude případné uchování grafických prvků pro displej.

Jednotka palubní desky bude nadále obsluhovat tlačítka umístěná na palubní desce. Pro vůz CTU.24 se však počítá pouze s jedním tlačítkem s integrovanou LED indikací. Toto tlačítko bude sloužit pro aktivaci vysokého napětí a pro spuštění spínání frekvenčních měničů.

Informace o okolním osvětlení byla na jednotce palubní desky vozu FSE.12 vyhodnocována pomocí fotodiody. I pro vůz CTU.24 se s touto funkcí počítá. Na voze FSE.12 byly s fotodiódou problémy. Z tohoto důvodu bude nutné najít jiné řešení.

Posledním požadavkem na jednotku palubní desky vozu CTU.24 je implementace zvukové zpětné vazby. Například pro testovací účely je výhodné mít kromě vizuální kontroly stavu vozu i zvukovou odezvu v podobě bzučáku.

Celkové blokové schéma jednotky lze vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Blokové schéma jednotky palubní desky pro vůz CTU.24.

Kapitola 3

Výběr displeje

Prvním krokem pro návrh jednotky palubní desky pro vůz CTU.24 byl podle požadavků výběr adekvátního dotykového barevného displeje. Ten bude následně ovlivňovat výběr dalších komponentů jako například mikrokontroléru. Jako referenční displeje byly zvoleny: displej z palubní jednotky AiM MXS Strada [8], displej TST043WVBS-139 [10] od výrobce Team Source Displaytech Co. z volantové jednotky vozu FSE.12 a displej KD043WVFPD080-C010A od výrobce Shenzhen Startek Electronic Technology Co., který byl použit na volantové jednotce na vozech FSE.07 - FSE.11. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Základní parametry referenčních displejů.

Název	Úhlopříčka [in]	Jas [cd/m^2]	Rozlišení [px]
AiM MXS Strada	5	700	800 × 480
TST043WVBS-139	4,3	800	800 × 480
KD043WVFPD080-C010A	4,3	430	800 × 480

3.1 Kritéria výběru

Kritéria byla stanovena na základě předchozích zkušeností s displeji na vozech týmů eForce a Cartech. Mimo níže zmíněné klíčové parametry displej popisuje i mnoho dalších, jako například kontrast, pozorovací úhly nebo obnovovací frekvence. Takové parametry je potřeba zohlednit a zkontrolovat, že aplikaci vyhovují, ale primárně výběr neovlivňují. Záměrně také nebyla jasně definována technologie displeje. Pokud bude displej splňovat klíčová kritéria, na jeho technologii nezáleží.

3.1.1 Komunikační rozhraní

Výběr komunikačního rozhraní úzce souvisí s výběrem mikrokontroléru. Tým eForce je dlouhodobě sponzorovaný firmou STMicroelectronics a jako mikrokontroléry výhradně používá jejich řadu STM32. Dokument [1] mimo jiné popisuje podporovaná komunikační rozhraní konkrétních produktů řady STM32. Podporované protokoly lze rozdělit do tří kategorií.

První kategorie je rozhraní DPI neboli Display pixel interface, někdy také označované jako RGB rozhraní. Informace o barvě jsou mezi mikrokontrolérem a displejem přenášeny 16, 18 nebo 24 paralelními signály. Kromě nich jsou zde i další kontrolní signály jako například vertikální a horizontální synchronizace, hodinový signál a další. Výhodou tohoto rozhraní je velká šířka pásma, dokáže tedy během jednoho hodinového cyklu přenést oproti ostatním rozhraním více dat. Nemusí tedy pracovat na tak vysokém hodinovém taktu, řádově se většinou pohybuje v desítkách MHz. Nevýhodou je však velký počet signálových vodičů, se kterými se následně musí pracovat na plošném spoji.

Dalším typem rozhraní je DBI neboli Display bus interface, někdy označovaný jako MCU interface. Tento protokol přenáší data po běžně užívaných sběrnicích, jako je například SPI, Motorola 6800 nebo Intel 8080. Tyto sběrnice slouží většinou pro pomalejší přenos menšího množství dat, tedy pro pomalejší displeje s menším rozlišením. Výhodou těchto rozhraní je jejich jednoduchost.

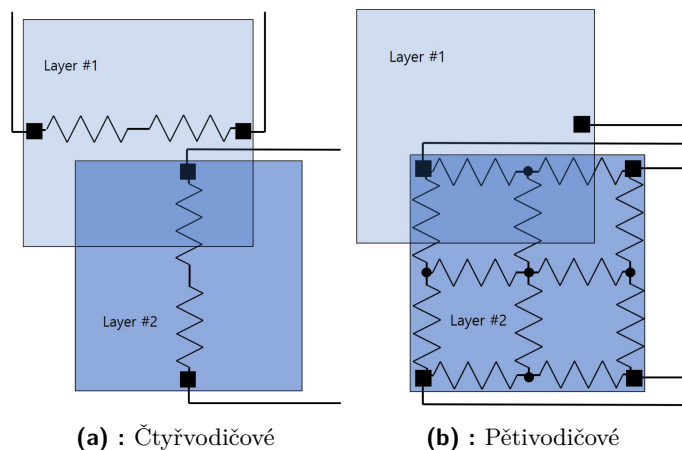
Poslední kategorií je DSI, neboli Display serial interface. Toto rozhraní využívá pro přenos dat diferenciální páry. DSI se vyznačuje použitím vyšších frekvencí hodinového signálu, proto je třeba dbát na správné rozložení a návrh desky plošných spojů.

Pro jednotku palubní desky bylo zvoleno komunikační rozhraní DPI. Hlavním důvodem byla rychlost hodinového signálu, protože při použití DSI by mohlo docházet k problémům u takto vysokých frekvencí. U rozhraní DBI by mohl být problém s nízkou obnovovací frekvencí. Určité mikrokontroléry STM32 obsahují periférii LTDC blíže zdokumentovanou v listu [3].

■ 3.1.2 Dotyková vrstva

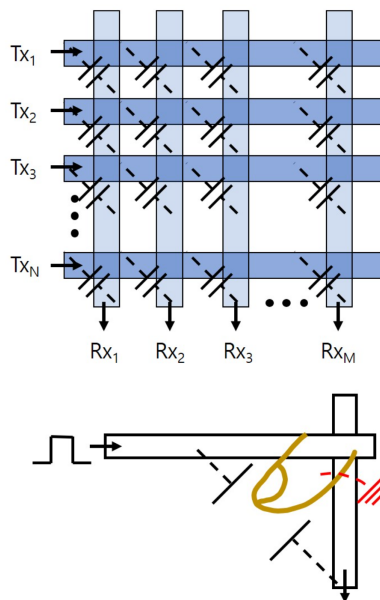
Pro pohodlné ovládání jednotky byl jeden z požadavků použití displeje s dotykovou vrstvou. Existuje několik technologií snímání místa dotyku na zobrazovací ploše [4]. Mezi nejběžnější z nich patří rezistivní (RTP) a kapacitní (CTP) dotykový panel. Obě technologie mají různé způsoby realizace, kde každá z nich má určité výhody a nevýhody. Existují i další technologie využívající například akustické vlny a optické detektory. Tyto technologie se však běžně nepoužívají. Displej s touto vyhodnocovací vrstvou by bylo složitější získat a proto se dále práce věnuje pouze RTP a CTP technologiím.

Rezistivní panel obecně funguje na principu dvou vodivých vrstev oddělených izolační mezerou. Při stlačení panelu se vrstvy dotknou a v místě dotyku tak vzniknou dva napěťové děliče, z jejichž hodnot napětí následně můžeme určit pozici dotyku v obou osách. Výhodou této technologie je reakce na dotyk jakéhokoliv přemetu a to i nevodivého. Na druhou stranu jeho nevýhodami jsou menší přesnost, větší náchylnost na mechanické poškození a větší tlumení jasu displeje. Základní realizace je pomocí 4 a 5 vodičového zapojení. Tato zapojení lze vidět na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Rezistivní dotykové vrstvy. Převzato z [4].

Druhá běžně používaná technologie dotykové vrstvy je kapacitní. Vnější izolační průhledná dotyková vrstva je zespodu pokryta vodivou vrstvou. Při přiložení vodivého objektu k panelu dojde ke změně kapacity a ta je následně lokalizována a vyhodnocena jako bod dotyku. Nejvíce se používá technologie využívající vzájemnou kapacitu, kde na spodku průhledné nevodivé vrstvy je vytvořena matice elektrod ve vertikálním a horizontálním směru. Nákres této technologie je zobrazen na obrázku 3.2. Oproti rezistivnímu panelu lze jednodušeji a přesněji lokalizovat dotyk. Průsvitnost panelu a mechanická odolnost je větší. Panel však dokáže reagovat pouze na vodivé předměty.



Obrázek 3.2: Dotyková vrstva založena na vzájemné kapacitě. Převzato z [4].

Pro jednotku palubní desky byla vybrána kapacitní technologie CTP a to především díky menšímu poklesu jasu a lepším mechanickým vlastnostem.

■ 3.1.3 Jas

Jas je dalším kritickým parametrem při výběru displeje pro jednotku palubní desky. Jízda vozu ve většině případů probíhá ve venkovních prostorech. Může tedy nastat situace, kdy bude ozařován displej přímým slunečním svitem, tudíž je nutné, aby byl displej v těchto podmínkách stále dobře čitelný. Pokud by tomu tak nebylo, pilot by neměl aktuální informace o vozu a hlavně o jeho bezpečnosti, což by mohlo být potenciálně nebezpečné jak pro pilota, tak i pro okolí vozu.

Požadavek na jas byl stanoven z referenčních displejů dříve používaných na jednotkách vozů týmů eForce a CTU Cartech uvedených v tabulce 3.1. Z předchozích zkušeností je známo, že displej z volantové jednotky vozů eForce FSE.07 - FSE.11 neměl dostatečný jas a při vyšší intenzitě okolního světla byl displej špatně čitelný. Jednotka AiM MXS Strada tento problém neměla, proto byl stanoven požadavek na minimální hodnotu jejího jasu ve výši 700 cd/m^2 .

■ 3.1.4 Velikost

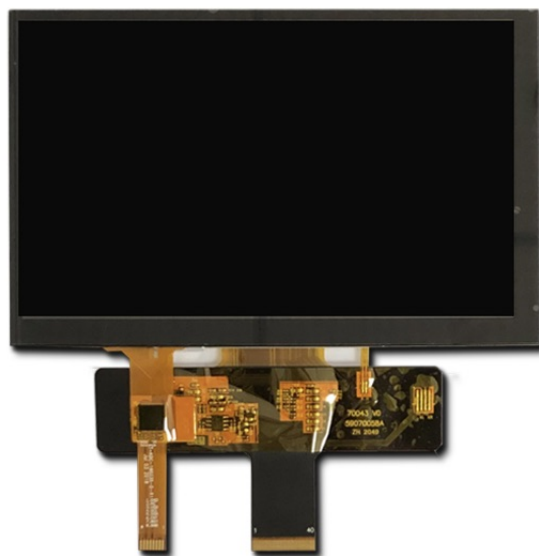
Dalším parametrem ovlivňujícím výběr displeje je jeho samotná velikost. Ta by měla být dostatečná na to, aby bylo možné na displeji zobrazit všechny potřebné informace. Na druhou stranu by však neměla pilotovi překážet ve výhledu z monopostu. Z mechanického modelu vozu byla stanovena velikost prostoru pro celou jednotku palubní desky a to $180 \times 120 \times 20 \text{ mm}$. Po odečtení předpokládané velikosti mechanické zástavby jednotky byla známa maximální velikost samotného displeje a to přibližně $170 \times 110 \times 10 \text{ mm}$. Tato hodnota však udává jeho celkovou velikost a bude se lišit od velikosti aktivní oblasti displeje, která by měla být co největší.

■ 3.1.5 Rozlišení

Posledním důležitým parametrem displeje je jeho rozlišení. Pro náročné grafické aplikace je vhodné mít rozlišení co největší, ale u jednotky palubní desky tomu tak být nemusí. Její účel slouží k tomu, aby pilota upozorňovala na stav vozu. Pokud bude rozlišovací schopnost dostatečná, aby se v ní pilot orientoval, není nutné mít tak velké rozlišení. Větší rozlišení displeje rovněž znamená i výkonnostně náročnější operace. Rozlišení tedy bude ovlivňovat například i rychlost hodinového signálu a velikost externí RAM paměti.

3.2 Zvolený displej

Spektrum nabízených displejů bylo široké. Po zvážení všech kritérií byl vybrán displej KD070WVFPA043-C049A [6] s kapacitní dotykovou vrstvou od výrobce Shenzhen Startek Electronic Technology Co.,Ltd. Jedná se o sedmipalcový LCD TFT displej s 24bitovým DPI (RGB) rozhraním. Rozlišení tohoto displeje je 800×480 pixelů, udávaný typický jas je 1150 cd/m^2 . Displej má rozměry $165,4 \times 104,59 \times 7,73$ mm s aktivní oblastí $152,4 \times 91,44$ mm, které splňují požadavky. Displej lze vidět na obrázku 3.3. Validace výběru proběhla také podle článku [7], kde byl vybrán podobný displej pro podobnou aplikaci.



Obrázek 3.3: Vybraný displej KD070WVFPA043-C049A. Převzato z [5].

Kapitola 4

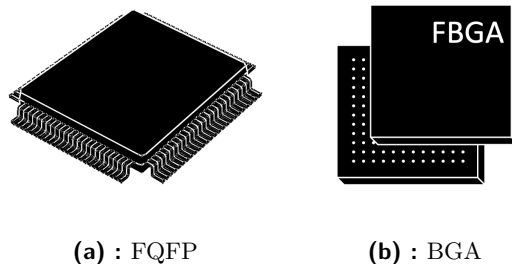
Výběr mikrokontroléru

Jak již bylo v kapitole 3.1.1 zmíněno, tým eForce Prague Formula již dlouhá léta spolupracuje s firmou STmicroelectronics, která týmu partnersky dodává mimo jiné i mikrokontroléry. Všechny jednotky na voze používají 32bitové mikrokontroléry řady STM32. K výběru konkrétního mikrokontroléru a k jeho konfiguraci slouží nástroj STM32CubeMX. Díky němu byl vybrán i mikrokontrolér pro jednotku palubní desky. V následujících podkapitolách jsou zmíněna nejdůležitější kritéria jeho výběru. Mikrokontrolér bude řídit mnoho dalších funkcí, ty ale nejsou pro výběr zásadní.

4.1 Kritéria výběru

4.1.1 Pouzdro

Prvním požadavkem je fyzické pouzdro. To určuje velikost a styl připájení součástky k desce plošných spojů. Mikrokontroléry STM32 jsou vyráběny převážně ve dvou typech pouzder a to LQFP (Low-Profile Quad Flat Package) a BGA (Ball grid array). Tato pouzdra lze vidět na obrázku 4.1. Pro MCU na vozech eForce je standardním typem LQFP (Low-Profile Quad Flat Package). Jelikož je většina jednotek formule osazována a pájena ručně, je nutné brát zřetel i na styl montáže na desky plošných spojů. Pouzdra LQFP mají výstupy vyvedené do stran, což umožňuje snadné připájení. Další výhodou tohoto pouzdra je jednoduchost testování. Kvůli jeho vývodům do stran lze na výstupy jednoduše připojit měřící sondy.



Obrázek 4.1: Typy pouzder mikrokontrolérů STM32. Převzato z [12].

Z dokumentu [3] dále můžeme zjistit informaci o požadované šířce pásma externí RAM paměti. Ta závisí na frekvenci hodinového signálu displeje. V případě zvoleného displeje pro palubní desku katalogový list udává maximální hodnotu hodinového signálu 30,5 MHz.

Z tabulek maximálních hodnot frekvence hodinového signálu displeje daných pro různé šířky pásma RAM paměti a pro konkrétní řadu mikrokontroléru lze odvodit, že pro naši aplikaci bude dostatečná 16bitová šířka pásma.

■ 4.1.6 Flash paměť

Posledním požadavkem je velikost flash paměti, která slouží mimo jiné k ukládání programového kódu do mikrokontroléru. Jelikož nejde o sériovou výrobu, nejlepším přístupem je vybrat MCU s co největší flash pamětí. Předchází se tak potenciálnímu problému s nedostatkem paměti a v souvislosti s tím k nutné redukci funkcionalit.

■ 4.2 Zvolený mikrokontrolér

Po vložení požadavků z kapitoly 4.1 do programu STM32CubeMX kritériím odpovídalo několik velmi podobných mikrokontrolérů. Po zvážení všech jejich rozdílů byl vybrán model STM32H7A3ZIT6.

Jedná se o mikrokontrolér v pouzdře LQFP 144, což indikuje 144 fyzických výstupů, z kterých je 114 signálových. Disponuje 2,048MB pamětí flash a 1,184MB RAM. Mikrokontrolér lze vidět na obrázku 4.2



Obrázek 4.2: Vybraný mikrokontrolér STM32H7A3ZIT6.

Kapitola 5

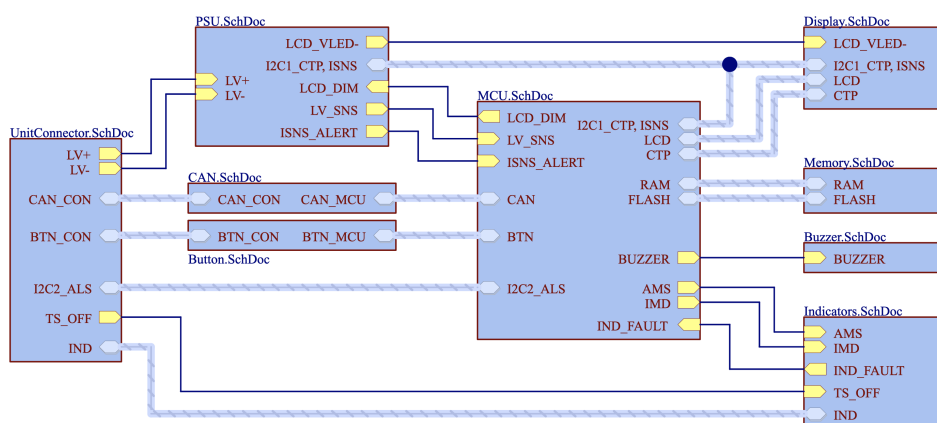
Schematický návrh

S vybraným displejem mohla začít další část návrhu palubní jednotky a to konkrétně schematický návrh. Celý návrh plošného spoje probíhal v prostředí Altium Designer.

Již na začátku vytváření schématu bylo jasné, že jednotka bude muset být rozdělena na dvě desky plošných spojů a to konkrétně na hlavní a indikátorovou desku. Hlavní deska bude obsahovat celou řídicí část a napájecí část. Na indikátorové desce budou integrovány samotné LED indikátory a senzor okolního osvětlení.

5.1 Hlavní deska

Schéma hlavní desky bylo rozděleno do ucelených funkčních bloků, které jsou mezi sebou propojené. Toto schéma lze vidět na obrázku 5.1. V následujících kapitolách bude popsán postup návrhu schémat pro jednotlivé bloky.

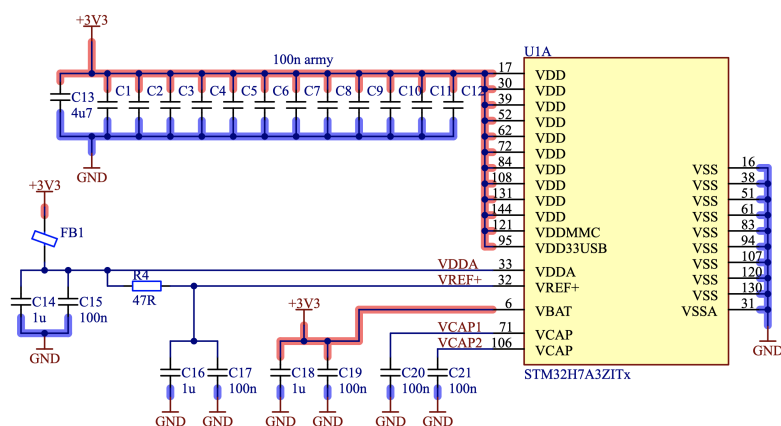


Obrázek 5.1: Schéma zobrazující schematické bloky hlavní desky a jejich provázanost.

5.1.1 Mikrokontrolér

Prvním navrhovaným schematickým blokem je blok mikrokontroléru. Ten lze dále rozdělit na dvě části - napájecí a signálovou.

Všechny napájecí vstupy jsou vyvedeny na napájecím bloku komponentu. Návrh napájení byl realizován podle informací z dokumentu [11]. Obecně je MCU napájeno ze standardní napěťové úrovně 3,3 V. Ke každému z napájecích vstupů byl přiřazen blokovací 100nF keramický kondenzátor. Pro zvýšení kapacity byl také integrován filtrační 4,7uF keramický kondenzátor. Mikrokontrolér nevyužívá periférií SDMMC, USB, ani možnosti připojení externí baterie. Napájení těchto periférií tedy bylo také přivedeno na standardní 3,3V větev s blokovacími kondenzátory. Výstupům VCAP byly rovněž přiřazeny blokovací kondenzátory podle specifikací dokumentu. Napájení analogových částí mikrokontroléru jsou k 3,3 V připojena přes feritovou perlu. Podle [11] je přidán odpor s hodnotou 47 Ω mezi VREF+ a VDDA. Opět jsou vloženy blokovací kondenzátory. Všechny negativní póly mikrokontroléru jsou svedeny do jednoho zemního potenciálu. Schéma napájení mikrokontroléru lze vidět na obrázku 5.2.



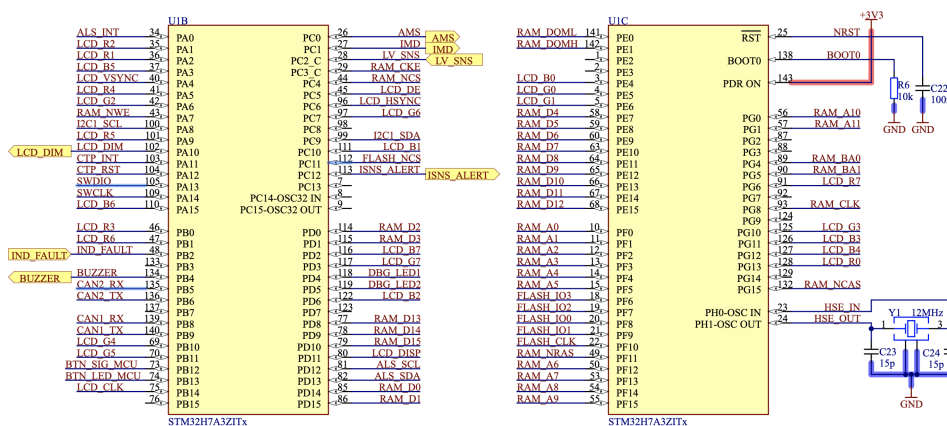
Obrázek 5.2: Schematické zapojení napájení mikrokontroléru.

Druhou částí komponentu jsou bloky obsahující signálové vstupy a výstupy. Jejich připojení k ostatním komponentům bylo navrženo za pomoci programu STM32CubeMX. Každá periferie má určité GPIO, na které může být vnitřně připojena. V CubeMX tedy byly zvoleny využité periferie a následně optimálně vybrané fyzické GPIO. Výsledné zapojení lze vidět na obrázku 5.3.

Obrázek znázorňuje 5.4 připojení jednotlivých signálů k mikrokontroléru. Mimo standardní GPIO jsou zde vyvedeny signály jako NRST, BOOT0, PDR ON a výstupy k externímu oscilátoru. Funkcionality těchto signálů je možné zjistit z katalogového listu mikrokontroléru [12].

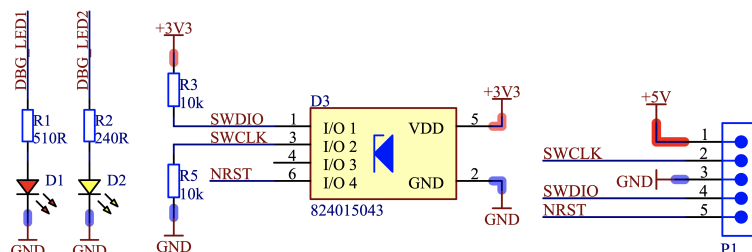
Signál NRST slouží k hardwarovému resetu mikrokontroléru a je připojený na zemní potenciál přes 100nF blokovací kondenzátor. Kromě toho je rovněž přiveden na programovací konektor. Pomocí nastavení napěťové úrovně na vstup BOOT0 je vybíráno, kde je program v mikrokontroléru uložen. V tomto případě se nachází v interní flash paměti, to znamená, že BOOT0 je připojený

na 4pF. Výsledná kapacita externích load kondenzátorů by měla dosahovat 16pF. Nejbližší hodnota běžně dostupné řady kondenzátů E24 je 15pF.



Obrázek 5.4: Schematické zapojení signálů mikrokontroléru.

Schéma mikrokontroléru navíc obsahuje doplňkové komponenty. Jde o dva LED indikátory, které jsou připojené na digitální výstupy mikrokontroléru. Slouží k vizuální kontrole jeho stavu. Dále se zde nachází programovací konektor pro připojení externího programátoru. Programovací signály SWCLK a NRST mají jasně danou úroveň definovanou pull-up a pull-down rezistory. Navíc byla ke konektoru přidána ochrana proti elektrostatickému výboji (ESD). Tyto komponenty a jejich zapojení lze vidět na obrázku 5.5.

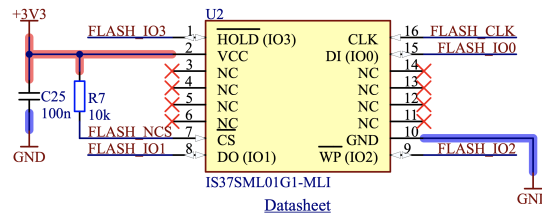


Obrázek 5.5: Doplňkové komponenty mikrokontroléru - kontrolní LED indikátory a programovací konektor s ESD ochranou.

5.1.2 Externí flash paměť

Jako externí nevolatilní paměť pro ukládání dat nastavení vozu byla použita flash paměť typu NAND. Konkrétní velikost byla odhadnuta na základě objemu dat pilotských nastavení a jejich počtu. Tato hodnota byla dále navýšena o potenciální velikost grafických komponentů. Konečným požadavkem tedy byla paměť o velikosti 1 Gb. Ta rovněž musí komunikovat na 3,3V úrovni, stejně jako mikrokontrolér. Kvůli jednoduchosti pájení bylo nutné brát zřetel na velikost a typ pouzdra a na počet výstupů. Pro komunikaci s MCU bylo využito sběrnice QuadSPI, která je kompromisem mezi rychlostí a počtem využitých výstupů mikrokontroléru.

Z nabídky byl finálně vybrán integrovaný obvod IS37SML01G1. Připojení k MCU bylo realizované podle zapojení z programu CubeMX a na základě katalogového listu [15]. Kromě blokovacího kondenzátoru byl přidán pull-up rezistor na vývod NCS pro jasné definování jeho stavu. Toto zapojení lze vidět na obrázku 5.6.

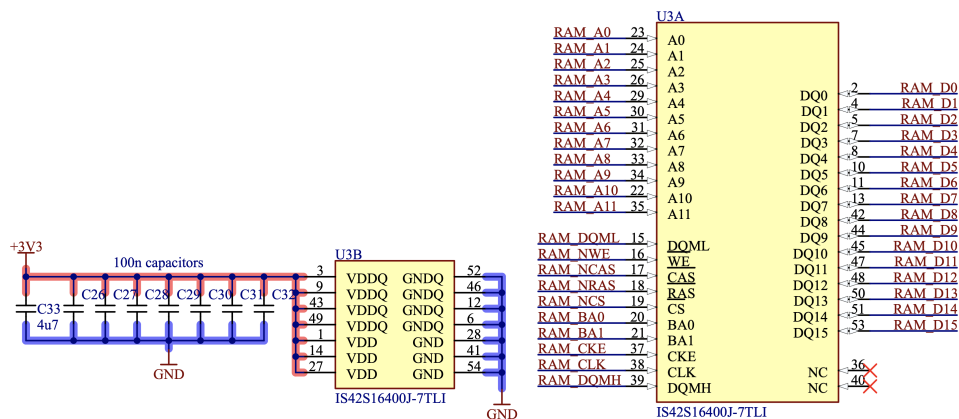


Obrázek 5.6: Schematické zapojení flash paměti.

5.1.3 Externí RAM

Z dokumentu [3] a z kapitoly 4.1.5 jsou již definované základní požadavky na externí RAM. Pro hladký chod displeje je potřeba 16bitová šířka sběrnice a velikost přibližně 10 Mb pro uložení jednoho snímku displeje. Požadovaná frekvence hodinového signálu paměti byla podle dokumentu [3] zvolena na minimum 110 MHz. Pro připojení paměti k mikrokontroléru je využita periferie FMC, ta také definuje typ paměti a to konkrétně na Synchronous Dynamic Access Memory (SDRAM).

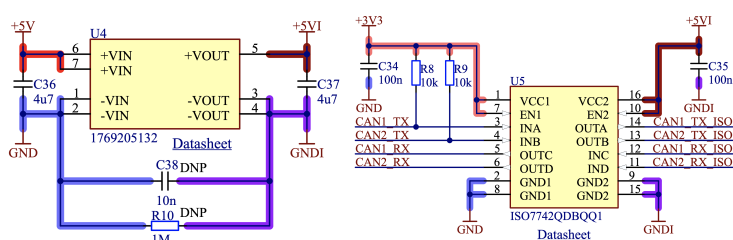
Po zvážení různých produktů byla finálně zvolena SDRAM IS42S16400J. Paměť je rozdělena do 4 bank. Každá má velikost 16 Mb, tedy odhadem jde o jednu banku na snímek. Velikost je výrazně větší než požadovaná pro případné testování funkcí displeje. Z katalogového listu [16] lze dále získat maximální hodnotu frekvence hodin, která odpovídá 143 MHz. Paměť pracuje na napěťové úrovni 3,3 V. Ve schématu byly k paměti přidány blokovací kondenzátory. Připojení k mikrokontroléru bylo realizováno podle projektu v programu CubeMX. Toto zapojení lze vidět na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Schematické zapojení SDRAM paměti.

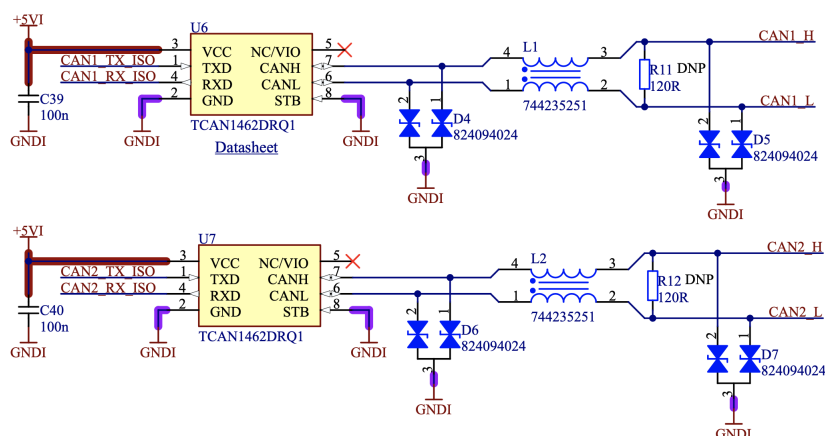
5.1.4 CAN sběrnice

Pro komunikaci s ostatními jednotkami je nutné implementovat dvě izolované CAN FD sběrnice. Pro napájení této části byl využit izolovaný zdroj 5V/5V od firmy Würth Elektronik. Pro izolaci signálů byl zvolen digitální převodník ISO7742QDBQQ1 od výrobce Texas Instruments. K oběma komponentům byly přidány blokovací kondenzátory. Signálům CAN TX byla definována úroveň pomocí pull-up rezistorů. Mezi neizolované a izolované napájení byl přidán kondenzátor a rezistor s dostatečně velkým pouzdrům, aby vyhovovaly izolační bariéře. Tyto součástky nebudou osazené, jsou zde pouze pro testovací účely. Zapojení digitálního izolátoru a zdroje lze vidět na obrázku 5.8.



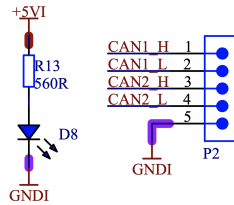
Obrázek 5.8: Izolovaný zdroj a digitální převodník.

Pro převod digitálního signálu z mikrokontroléru na komunikaci CAN je zapotřebí transcieverů (přijímač-vysílač). Konkrétně byly implementovány CAN FD transcievery TCAN1462-Q1 [17] od firmy Texas Instruments. Signály CAN High a CAN Low jsou chráněny proti elektrostatickému vybití pomocí transilů. Jsou také filtrovány pomocí choke filtrů. Rovněž jsou zde implementovány terminační rezistory, které však budou osazené pouze na nejvzdálenějších jednotkách na sběrnici. Kompletní zapojení transcieverů lze vidět na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Schematické zapojení CAN transcieverů.

Poslední zakomponovanou částí byla LED pro indikaci přítomnosti izolovaného napájení a konektor pro připojení CAN-USB převodníku, které byly zapojeny podle obrázku 5.10.

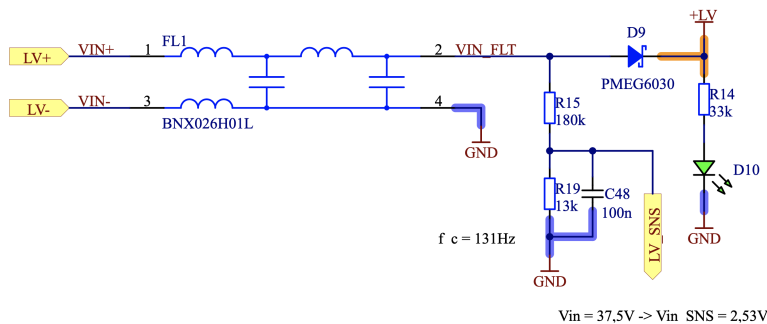


Obrázek 5.10: Konektor pro připojení CAN převodníku a indikační LED.

5.1.5 Napájení

Jednotka je napájena z neregulovaného napětí, které se pohybuje v rozmezí přibližně 32 V - 37,5 V. Toto napětí je nutné regulovat na několik dalších napěťových úrovní.

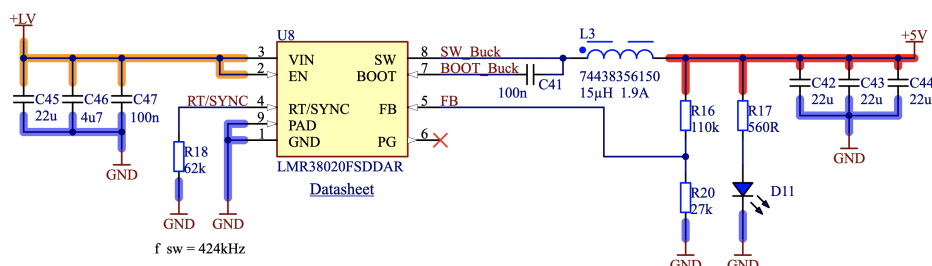
Po přivedení napájení do jednotky je prvním komponentem v cestě LC filtr, který slouží k potlačení rušení. Následně je filtrované napájení přivedené na napěťový dělič s filtrem typu dolní propust, ze kterého je následně napětí přivedeno na analogový vstup mikrokontroléru. Díky tomu můžeme monitorovat hodnotu napětí na vstupu jednotky. Jako ochrana proti přivedení napětí opačné polaritě je přidána dioda. Poslední částí je LED indikace pro přítomnost vstupního napětí. Kompletní zapojení lze vidět na obrázku 5.11.



Obrázek 5.11: Filtr vstupního napětí, dělič pro monitorování napětí, dioda jako ochrana proti opačné polaritě a LED indikace.

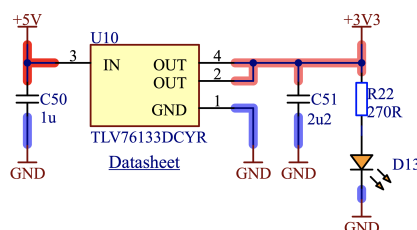
Jednou z napěťových úrovní, která je nutná pro napájení určitých komponentů, je 5 V. K tomu je využit spínaný zdroj LMR38020FSDDAR od výrobce Texas Instruments. Ten byl zvolen mimo jiné díky jeho velkému vstupnímu rozsahu, který by mohl být užitečný v případě navýšení vstupního napětí. Schematické zapojení a pasivní komponenty byly navrženy na základě katalogového listu [20]. Pro spínací frekvence byla podle dokumentu [19] zvolena hodnota přibližně 420 kHz. Použité komponenty tedy nebudou muset být tak velké a zároveň se nejedná o zbytečně velkou frekvenci. To znamená, že

nebude docházet k příliš velkému rušení. Pro vizualizaci přítomnosti 5 V byla přidána indikační LED. Celé zapojení zdroje 5V lze vidět na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12: Schematické zapojení zdroje 5 V.

Poslední potřebnou napěťovou úrovní je 3,3 V. Z té jsou napájeny skoro všechny zvolené integrované obvody. K vytvoření této úrovně byl použit zdroj TLV76133DCYR od výrobce Texas Instruments. Jde o lineární zdroj s maximálním dodávaným proudem 1 A, což by podle odhadů mělo být pro jednotku dostatečné. Ke zdroji byly přidány kondenzátory podle katalogového listu [18] a indikační LED. Zapojení zdroje 3,3 V lze vidět na obrázku 5.13.



Obrázek 5.13: Schematické zapojení zdroje 3,3 V.

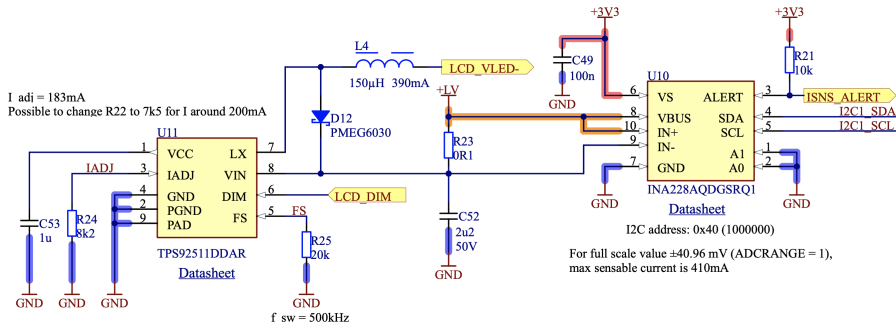
Speciální přístup k napájení vyžaduje podsvícení displeje. Ten podle katalogového listu obsahuje podsvícení ve formě tří paralelních a 8 sériových LED. Typické průběžné napětí na těchto LED podle katalogového listu je 25,6 V a při maximálním jasu potřebuje běžnou hodnotu proudu 180 mA.

Pro regulaci jasu je potřeba měnit protékající proud. Z tohoto důvodu byl pro tuto aplikaci vybrán spínaný proudový zdroj TPS92511DDAR od firmy Texas Instruments, určený přímo pro tuto aplikaci. Informace o potřebných pasivních součástkách a jejich hodnoty byly získány z katalogového listu [21]. Vstup pro regulaci jasu byl přiveden na jeden z PWM (Pulse Width Modulation) výstupů mikrokontroléru. Tuto regulaci lze ovládat právě změnou střídání pulzně šířkové modulace. Maximální hodnota proudu byla prozatím externě nastavena na 183 mA, do budoucna bude displej testován i při větším průtoku proudu.

TPS92511DDAR disponuje interním sledováním proudu. Pro optimální nastavení je však současně s jeho regulací nutné znát přesný aktuálně protékající proud. Z tohoto důvodu byla přidána součástka INA228AQDGSRQ1, která slouží jako snímač proudu. Ta snímá napěťový úbytek na měřícím rezistoru o dané hodnotě a z toho následně dopočítává procházející proud. Informaci

o něm následně posílá po sběrnici I2C do mikrokontroléru. Výběr okolních součástek byl navrhnout na základě informací z katalogového listu [22].

Kompletní zapojení zdroje pro podsvícení displeje lze vidět na obrázku 5.14.

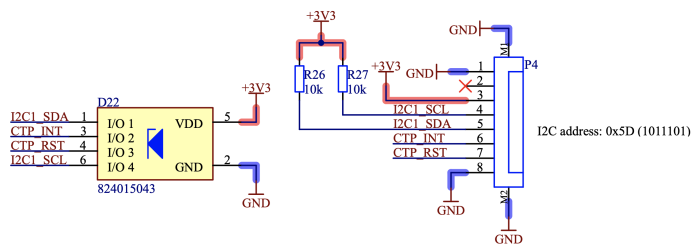


Obrázek 5.14: Schematické zapojení zdroje pro podsvícení displeje spolu s proudovým sledovačem.

5.1.6 Připojení displeje

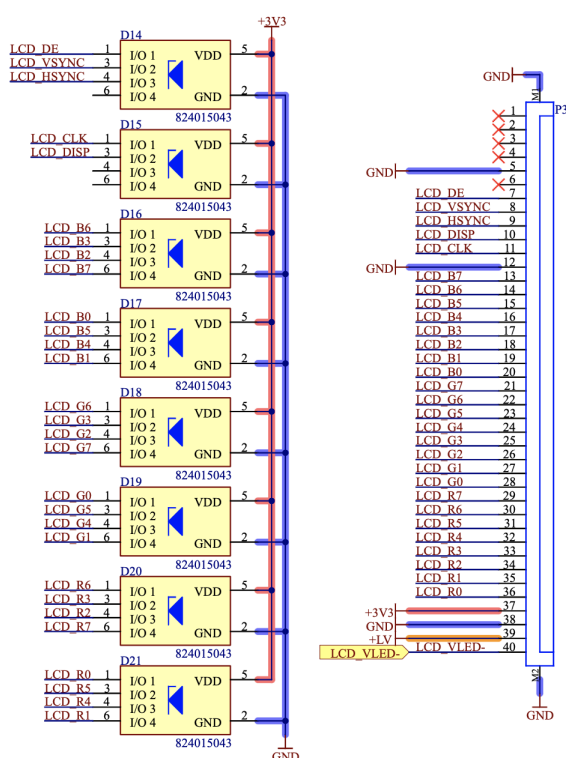
Z displeje vedou dva FPC (Flexible Printed Circuit) vývody. Jeden se připojuje k samotnému displeji, druhý slouží k připojení dotykové vrstvy. Do projektu tak byly přidány dva odpovídající konektory. Jejich zapojení k MCU bylo realizováno pomocí programu CubeMX.

Ke konektoru připojení dotykové vrstvy byly na signály sběrnice I2C přidány spolu s ESD ochranou pull-up rezistory pro definování určitého stavu. Zapojení lze vidět na obrázku 5.15.



Obrázek 5.15: Schematické zapojení konektoru pro připojení dotykové vrstvy s ESD ochranou.

V minulosti, konkrétně u displeje na volantové jednotce ze sezón FSE.07 až FSE.11, se objevoval problém, kdy displeje náhodně přestaly fungovat. Jedním z mnoha vysvětlení je nečekaný ESD výboj. Při návrhu nové palubní jednotky byla tato skutečnost brána v potaz. Všechny komunikační signály propojující displej a mikrokontrolér jsou tedy chráněny ESD ochranami. Zapojení displejového konektoru s ESD ochranami lze vidět na obrázku 5.16.



Obrázek 5.16: Schematické zapojení konektoru pro připojení displeje s ESD ochranami.

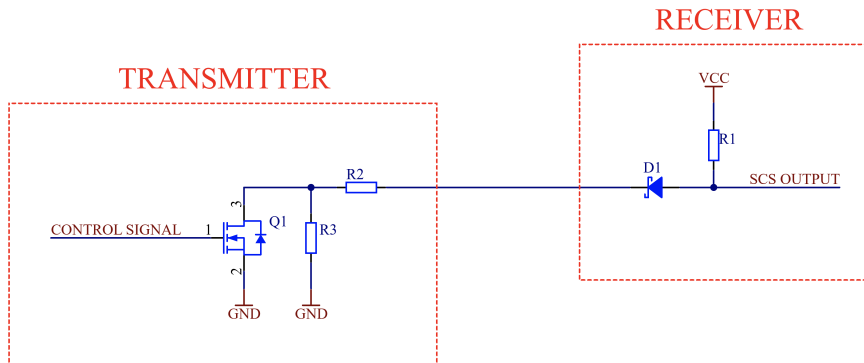
5.1.7 Řízení indikátorů

Nejstriktnější částí celé palubní desky dle pravidel [2] jsou indikátory, respektive signály, které definují jejich stav. Ty jsou podle pravidla T11.9.1 definovány jako System Critical Signals (SCS). Tento typ signálu je nutné kontrolovat, zda funguje správně. Pokud tomu tak není, musí celá sestava přejít do takzvaného safe state. Konkrétně jde o indikátory AMS, IMD a TS OFF definované v bodech pravidel EV5.8.9, EV6.3.7 a EV4.10.

Indikátory AMS a IMD jsou řízené zprávami poskytovanými jednotkou trakčního akumulátoru posílanými po sběrnici CAN. Pro jejich signály tak platí pravidlo T11.9.2 d), které říká, že digitální signály přenášené vodiči nebo bezdrátově musí být ošetřeny proti poškození dat a proti ztrátám a zpoždění dat. To je realizováno implementací kontrolního součtu. Tyto podmínky jsou splněné správnou implementací v programu jednotky. Ze strany návrhu jsou tak signály pro indikátory AMS a IMD přivedeny na běžné GPIO výstupy.

Na rozdíl od nich je signál indikátoru TS OFF vysílán jednotkou Tractive System Active Light (TSAL), která musí být podle pravidla EV4.10.9 řešena pouze hardwarově. Nesmí být tedy použit žádný software. Proto pro jeho SCS signál platí pravidlo T11.9.2 a), které nařizuje, že signál musí být rozeznatelný od rozpojeného stavu a zkratu na zem. Z vlastní iniciativy byl implementován systém kontrolující rovněž zkrat na napájení. Celá realizace tohoto SCS signálu byla realizována pomocí víceúrovňového signálu.

Tento obvod je rozdělen na dvě části - vysílač a přijímač. Funkční schéma je vyobrazené na obrázku 5.17. Vysílačem je v tomto případě TSAL, ten vysílá signál o stavu vozu. Tento signál je přiveden na mosfet tranzistor Q1 typu N. Rezistory R1, R2 a R3 tvoří dva různé napěťové děliče, čímž definují hodnotu napětí na výstupu - SCS OUTPUT.



Obrázek 5.17: Funkční schéma SCS více stavové logiky.

Pokud dojde ke zkratu signálu mezi vysílačem a přijímačem bude na výstupu nulové napětí. V případě zkratu na napájení nebo rozpojení obvodu bude na výstupu napájecí napětí VCC. Správné nastavení hodnot rezistorů bude následně definovat hodnotu napětí na výstupu pro různé stavy sepnutí tranzistoru.

Pro případ komunikace SCS signálu TS OFF je obvod napájen vstupním napětím jednotky v rozmezí 32 V - 37,5 V. Pro hodnoty rezistorů bylo žádoucí se co nejvíce přiblížit dělicím poměrům $\frac{1}{3}$ a $\frac{2}{3}$ pro optimální rozdělení napěťových úrovní. Bylo však nutné brát zřetel na maximální možný výkon na rezistorech, jelikož pro ně bylo použito standardní pouzdro 0603 s maximálním výkonem 100 mW. Proto byl rezistor R1 realizován pomocí dvou 6,2k Ω rezistorů (v součtu s hodnotou 12,4 k Ω) a rezistor R2 pomocí dvou 3,9k Ω rezistorů (dohromady 7,8 k Ω) a rezistor R3 jako jeden rezistor s hodnotou 13 k Ω . Výsledné poměry jsou tak přibližně 0,39 a 0,63.

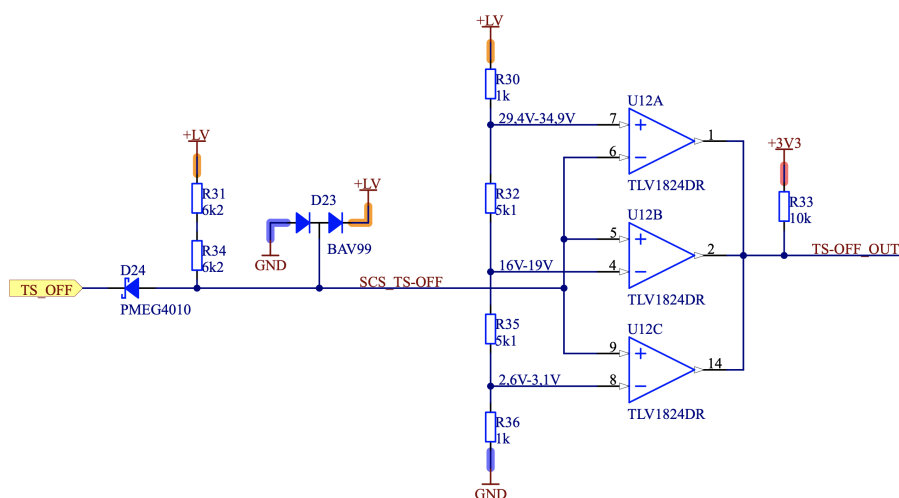
Potenciální stavy a jejich odpovídající úrovně jsou sepsány v tabulce 5.1. Z ní lze také pozorovat invertovanou logiku při normální operaci. Na tu je potřeba brát zřetel.

Tabulka 5.1: Tabulka stavů SCS signálu.

Stav	Dělicí poměr	V_{SCS_OUTPUT} při $V_{in} = 37,5V$ [V]	Logický výstup
Logická 0 na vstupu	$\frac{52}{83} = 0,63$	23,49	1
Logická 1 na vstupu	$\frac{39}{101} = 0,39$	14,48	0
Rozpojený obvod	1	37,5	0
Zkrat na napájení	1	37,5	0
Zkrat na zem	0	0	0

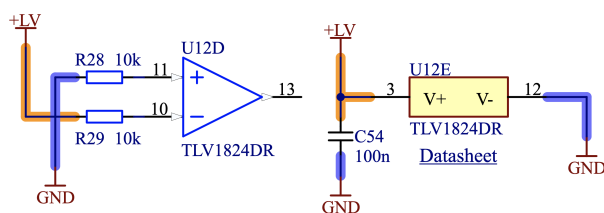
Posledním krokem ve zpracování TS OFF signálu je vyhodnocení napěťo-

vého stavu. Toho je docíleno využitím komparátorů. Konkrétně byl pro tento účel vybrán čtyřkanálový open-drain komparátor TLV1824DR výrobce Texas Instruments a to především kvůli maximálnímu vstupnímu napětí 40 V [23]. Z těchto čtyř komparátorů jsou využity pouze tři. Na jeden z jejich vstupů je vždy přivedena výstupní hodnota z SCS zpracování a na druhý určitá napěťová hodnota realizovaná pomocí napěťového děliče. Tyto konkrétní hodnoty jsou opět vztaženy k napájecímu neregulovanému napětí. Poměrově jde o hodnoty přibližně 0,92, 0,5 a 0,08. Pro správnou funkci open-drain komparátorů je jejich výstup připojen na 3,3 V přes pull-up rezistor. Toto zapojení lze vidět na obrázku 5.18.



Obrázek 5.18: Schematické zapojení zpracování SCS signálu TS OFF.

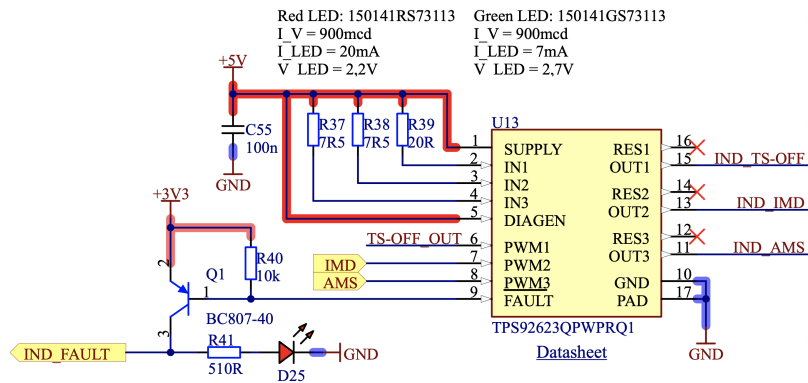
Komparátor je napájen ze vstupního napětí. Pro napájení byl také přidán blokovácí kondenzátor. Jak lze vidět na obrázku 5.19, nevyužitý kanál komparátoru byl zapojen podle katalogového listu s přidáním rezistorů, které snižují vstupní proud.



Obrázek 5.19: Napájení komparátoru a zapojení jeho nevyužitého kanálu.

S tímto zapojením všech indikátorů dokážeme vyhodnotit, zdali se signál spolehlivě dostal až na jednotku palubní desky. Pokud bychom však připojili LED indikátory přímo na signál TS OFF a AMS a IMD výstupy z mikrokontroléru, nedokázali bychom detekovat chybu samotné LED. Z tohoto důvodu byl implementován tříkanálový LED driver TPS92623QPWPRQ1 od firmy Texas Instruments. Ten disponuje FAULT výstupem, který detekuje rozpojený obvod, zkrat na zem a zkrat na napájení na straně LED indikátorů. Pokud

by došlo k jednomu z těchto selhání, mikrokontrolér tuto chybu detekuje a může následně například rozpojit shutdown circuit (SDC), díky čemuž by bylo odpojeno trakční napětí z vozu. LED driver také disponuje nastavením proudu protékajícím indikátory. Pomocí rezistorů lze přesně limitovat maximální proud. Po přivedení PWM na vstupy driveru můžeme pomocí její střídavy také regulovat jas. Obvod na FAULT výstupu driveru byl navrhnout podle jeho katalogového listu [24] a zajišťuje vypnutí funkce one-fails-all-fail. Pokud by například přestal fungovat indikátor AMS, FAULT výstup bude indikovat chybu. Indikátory TS OFF a IMD však budou nadále fungovat správně. Na FAULT výstup byl přidán LED indikátor chyby pro jednodušší vizuální kontrolu. Celé zapojení zdroje lze vidět na obrázku 5.20.



Obrázek 5.20: Zapojení proudového zdroje pro indikátory.

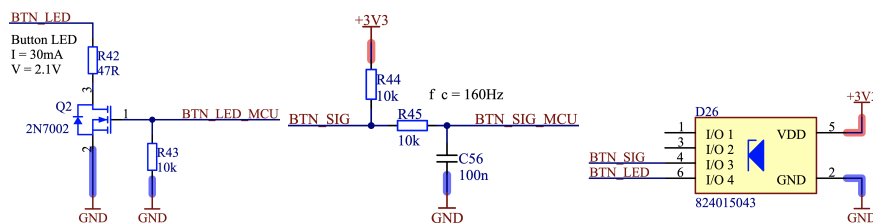
5.1.8 Tlačítko

Z požadavků je zřejmé, že je na jednotce palubní desky potřebné integrovat jedno tlačítko s LED indikací. Na dřívějších vozech byla použita tlačítka PB6B2FM5M1CAL05 od firmy TE Connectivity, které lze vidět na obrázku 5.21. Proto byl navrhnout obvod pro zpracování signálu a pro napájení LED. Ta je spínaná pomocí výstupu z mikrokontroléru připojeného k tranzistoru. Díky tomu je poskytnut LED dostatečný proud. Zároveň je před drain tranzistoru umístěn rezistor limitující proud indikátorem. Na vývod gate je přidán pull-down rezistor pro jasné definování napěťové úrovně.



Obrázek 5.21: Tlačítko PB6B2FM5M1CAL05.

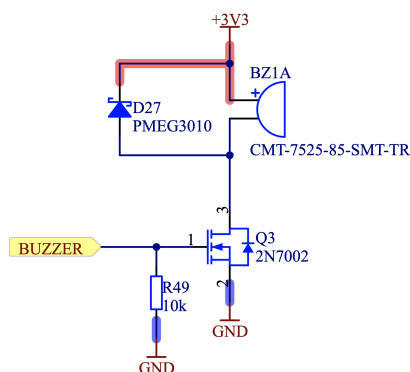
Na signál tlačítka je připojen pull-up rezistor na 3,3 V. Při sepnutí tlačítka dojde k uzemnění tohoto signálu. Pro filtrování byl implementován RC článek jako filtr typu dolní propust. Tlačítkové signály jsou chráněné ESD ochranou. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku 5.22.



Obrázek 5.22: Schéma zpracování signálů pro tlačítko.

5.1.9 Bzučák

K zajištění zvukové indikace stavu auta byl implementován bzučák. Ten je spínáný pomocí tranzistoru. Pro jeho vybití při rozpojení tranzistoru byla přidána paralelní schottkyho dioda. Ke gate vstupu tranzistoru byl připojen pull-down rezistor sloužící k definování jasné úrovně. Gate je dále připojen na PWM výstup mikrokontroléru. To lze vidět na obrázku 5.23. Změnou střídý pak můžeme měnit hlasitost a změnou její frekvence tón.



Obrázek 5.23: Schéma zapojení bzučáku.

5.1.10 Konektory

Kromě již zmíněných konektorů jsou potřebné další dva - hlavní konektor pro připojení jednotky ke zbytku vozu a konektor pro připojení indikátorové desky.

Hlavním konektorem byl zvolen konektor standardu DEUTSCH AS, konkrétně produkt AS210-35SN od firmy TE Connectivity, který lze vidět na obrázku 5.24. Jedná se o 13kontakový konektor určený pro autosport. Na posledních vozech týmu eForce je tento typ konektorů standardem. Jeho výhodami jsou vodotěsnost, zámkování a možnosti jiného klíčování. Na tento

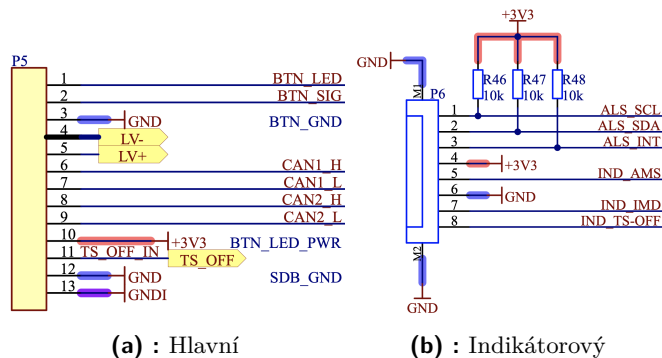
konektor bylo přivedeno vstupní napájení, obě CAN sběrnice včetně izolované země a signál TS OFF z jednotky TSAL. Také jsou zde vyvedeny signály pro připojení tlačítka.



Obrázek 5.24: Konektor AS210-35SN.

K propojení hlavní a indikátorové desky plošných spojů byly zvoleny FPC konektory podobné těm pro připojení displeje. Ty byly vybrány na základě jejich kompaktnosti a jednoduchosti opakovaného připojení. Konkrétně bylo zvoleno 8 kontaktů s roztečí 0,5 mm. Tento konektor bude přivádět signály a napájení pro sensor okolního osvětlení a signály pro LED indikátory. K signálům ze senzoru osvětlení byly přidány pull-up rezistory podle katalogového listu.

Zapojení obou konektorů lze vidět na obrázku 5.25.



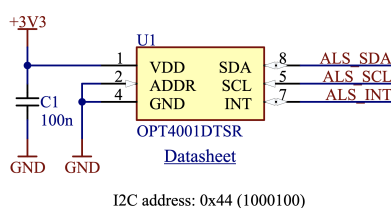
Obrázek 5.25: Schéma zapojení konektorů.

5.2 Indikátorová deska

Úkolem indikátorové desky plošných spojů je integrovat LED indikátory a sensor okolního osvětlení. S hlavní deskou je propojena pomocí vertikálního FPC konektoru.

5.2.1 Senzor okolního osvětlení

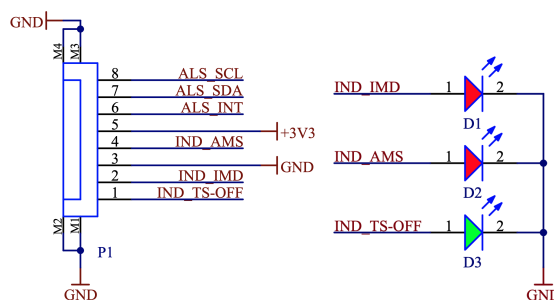
Pro dynamickou regulaci jasu displeje a indikátorů AMS a IMD je nutné znát stav okolního osvětlení. Pro novou jednotku palubní desky byl použit integrovaný obvod OPT4001DTSR od výrobce Texas Instruments. Výhodou tohoto čipu je jednoduchá implementace. V minulosti byla na jednotkách palubní desky implementována měření okolního osvětlení pomocí fotodiod a fototranzistorů. Většinou jejich měření nebylo spolehlivé. Proto byl pro letošní návrh vybrán přímo integrovaný senzor s okolními periferiemi a zpracováním signálu. S mikrokontrolérem komunikuje tento čip pomocí I2C sběrnice. Jak je možné vidět na obrázku 5.26, k senzoru byl přidán 100nF blokovací kondenzátor. Katalogovým listem [25] vyžadované pull-up rezistory jsou integrované na hlavní desce.



Obrázek 5.26: Schematické zapojení senzoru okolního osvětlení.

5.2.2 Indikátory

Pro indikátory byly zvoleny LED řady 150141xS73113 od firmy Würth Elektronik. Indikátory by měly být snadno viditelné i za jasného slunečního svitu, což vyplývá z pravidel. Z minulých sezón je zřejmé, že taková svítivost odpovídá minimální hodnotě 900 mcd. Vybrané LED mají svítivost daleko vyšší, budou však limitované pomocí proudového zdroje na hlavní desce. Pro zvětšení jasu pak stačí pouze změnit hodnotu daného rezistoru. Barvy indikátorů jsou také určeny pravidly. TS OFF indikátor má být zelený a AMS a IMD indikátory červené. Indikátory a konektor indikátorové desky jsou zobrazeny na obrázku 5.27.



Obrázek 5.27: Schéma zapojení konektoru a LED indikátorů na indikátorové desce.

Kapitola 6

Návrh desek plošných spojů

S hotovým schematickým zapojením bylo možné přejít na samotný návrh desek plošných spojů.

6.1 Hlavní deska

Již před začátkem routování bylo zřejmé, že hlavní deska bude muset být navrhnutá na větší počet vrstev, než jsou základní dvě. Důvodem je četnost a promíchanost signálů vedoucích z mikrokontroléru ke konektoru pro připojení displeje. Routing tedy začal na čtyřvrstvé desce, jejíž vrstvy byly navrhnuty podle knížky [26] na dvě vnější signálové a vnitřní zemnicí a napěťovou vrstvu. Plošné spoje vyrábí týmu eForce partnersky firma PragoBoard s.r.o. Tato deska bude vyrobena standardní metodou pool servis, jejíž skladbu (stackup) lze vidět na obrázku 6.1.

1	SIG Top	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 1	PP-006	Prepreg		0.065mm	4.1	0.02
	Dielectric 2	PP-006	Prepreg		0.065mm	4.1	0.02
2	GND	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 3	FR-4	Dielectric		1.2mm	4.8	
3	PWR	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 4	PP-006	Prepreg		0.065mm	4.1	0.02
	Dielectric 5	PP-006	Prepreg		0.065mm	4.1	0.02
4	SIG Bot	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		

Obrázek 6.1: Skladba hlavní desky.

Již při vytváření schématu byly vybírány jednotlivé součástky i podle jejich pouzder a to hlavně kvůli jednoduchému ručnímu pájení a servisu. Většina rezistorů a kondenzátorů byla navrhnutá s pouzdem 0603, jelikož jde o týmový standard. Kondenzátorům s větší kapacitou bylo nutné přidat větší pouzdro.

Po importu součástek do projektu plošného spoje došlo nejprve k rozdělení součástek na funkční bloky. Bylo nutné ideálně rozvrhnout rozložení těchto bloků, aby například analogové signály nebyly blízko spínaných zdrojů kvůli rušení. Hned na začátku bylo třeba definovat několik základních omezení pro rozmístění komponentů. Prvním bylo umístění FPC konektorů připojujících samotný displej k plošnému spoji. Jejich vzájemná poloha byla definována

výkresem z katalogového listu [6]. Dalším určujícím parametrem byla poloha hlavního konektoru, kterým je jednotka připojena ke zbytku vozu. Ten musel být kvůli umístění jednotky na palubní desce co nejnižší. Pouze tyto tři fixně dané součástky následně definovaly rozložení téměř všech bloků.

ESD ochrany byly umístěny co nejbližší u konektorů, aby byl minimalizován negativní dopad ESD výboje. Stejný princip byl použit pro umístění vstupního LC filtru napájení. Ten byl rovněž umístěn co nejbližší ke vstupnímu konektoru pro minimalizování cesty nefiltrovaného napájení na desce.

Dalším krokem bylo umístění mikrokontroléru, ke kterému jsou připojeny skoro všechny funkční bloky. Nejvíce praktickým se ukázalo umístění přímo nad displejovým konektorem, aby byly spoje mezi MCU a displejem co nejkratší. Co nejbližší k napájecím kontaktům mikrokontroléru byly přidány blokovací kondenzátory, což je popsáno v publikaci [27]. Toto pravidlo bylo dodrženo i pro ostatní blokovací kondenzátory. Pro mikrokontrolér bylo důležité i umístění oscilátoru. Celý návrh byl realizován podle dokumentu [13]. Pro oscilátor je klíčové umístit load kondenzátory přímo do cest mezi mikrokontrolér a oscilátor a mít podobně dlouhé vstupní i výstupní cesty.

Druhým komponentem, který je k mikrokontroléru připojen pomocí většího počtu signálů, je RAM paměť. Ta byla tedy umístěna také co nejbližší mikrokontroléru.

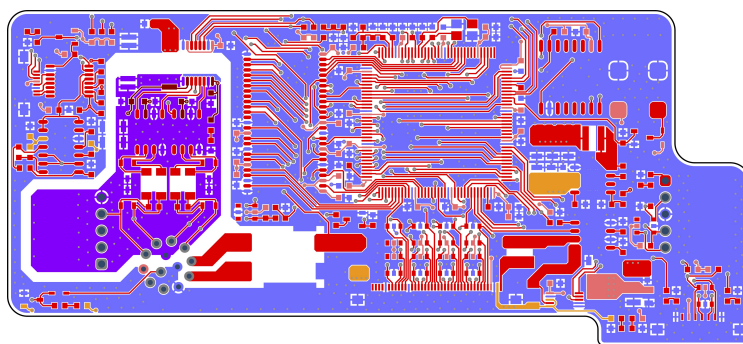
Pevným umístěním vstupního konektoru bylo také částečně definováno umístění obvodů zpracování izolovaných CAN signálů. Kolem tohoto obvodu byla dodržena izolační bariéra minimálně 1 mm.

Blok napájení displeje s měřením proudu byl umístěn poblíž displejového konektoru. Zbylé napájecí bloky byly umístěny poblíž pro vytvoření napájecí části. Všechny zdroje byly navrženy podle informací z katalogových listů a z publikace [27].

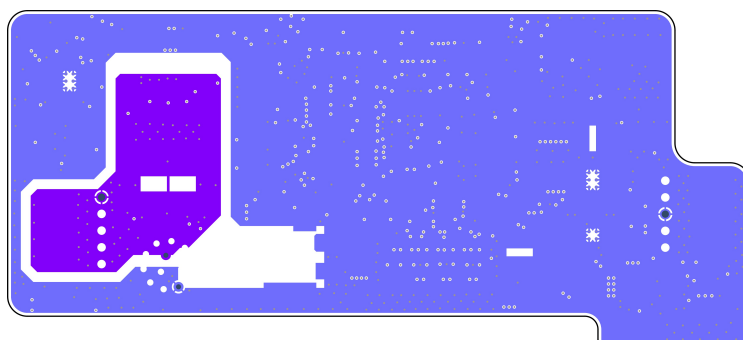
Zpracování signálu TS OFF a řízení indikátorů bylo přidáno nalevo od obvodů CAN. Zde je také umístěn FPC konektor pro připojení indikátorové desky.

Zbytek součástek jako flash paměť, bzučák a další, byly rovnoměrně rozmístěny po desce plošných spojů pro vytvoření unifikovaného tvaru.

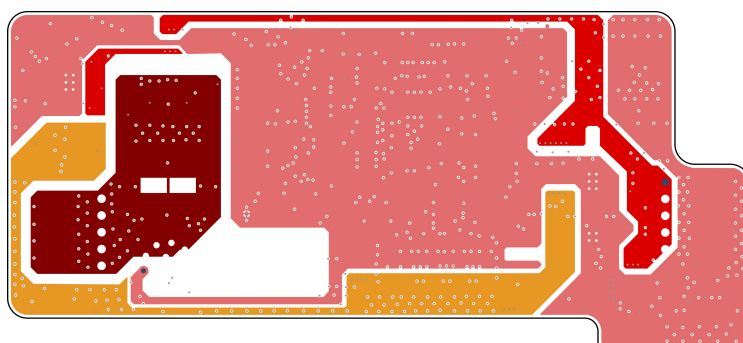
Následně došlo k propojení komponentů použitím vhodně zvolených vrstev, polygonů a cest. Speciální přístup si žádaly sběrnice I2C a CAN. U I2C byla prioritou podobná délka signálů SDA a SCL. Také byla snaha se co nejvíce vyhnout vedením spojů v zarušených oblastech. To bohužel nebylo možné u I2C sběrnice propojující MCU s CTP a senzorem měřícím proud LCD. I tak byly cesty zvoleny dle nejlepšího uvážení. Pro diferenciální signály obou sběrnic CAN byla také snaha vést cesty těchto signálů co nejbližší u sebe a hlavně s podobnou délkou. Na vnějších vrstvách byla ve volných prostorech rozlita měď na zemním potenciálu. To může pomoci například s lepším odvodem tepla, zlepšením elektrických vlastností a odolností proti rušení. Do těchto polygonů byly následně přidány prokovy. Propojení lze vidět na obrázcích jednotlivých vrstev 6.2 a kompletní render desky na obrázku 6.3.



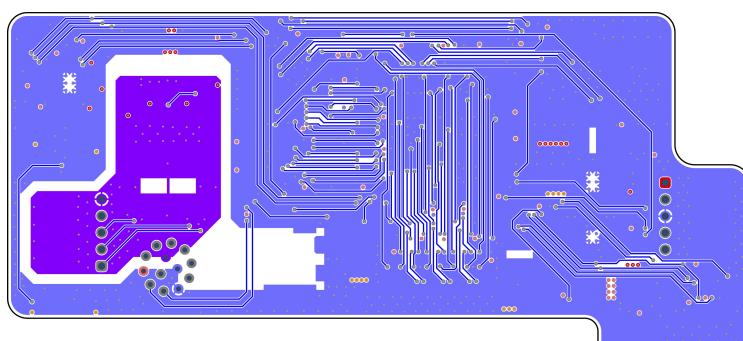
(a) : Vrstva SIG Top



(b) : Vrstva GND

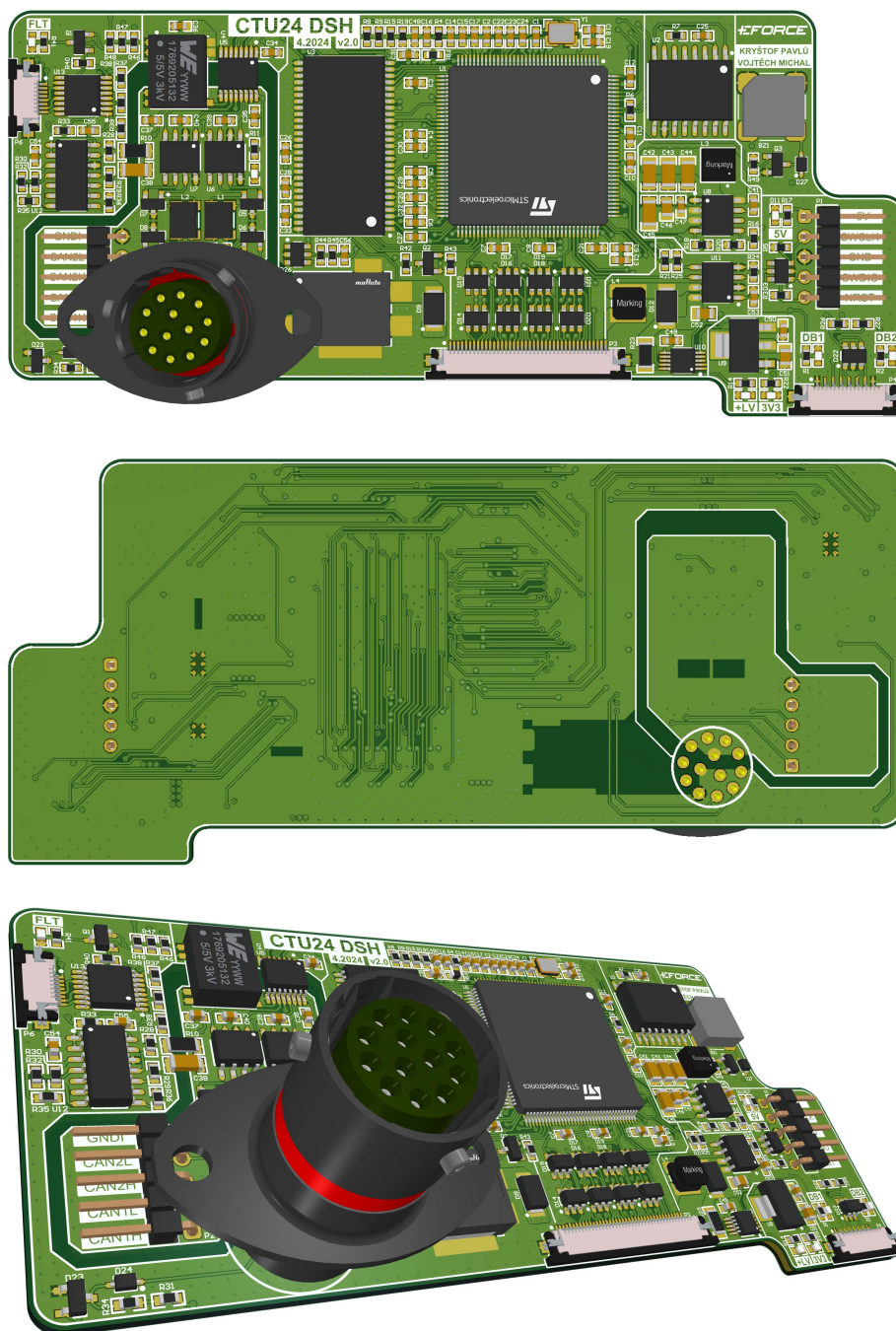


(c) : Vrstva PWR



(d) : Vrstva SIG Bot

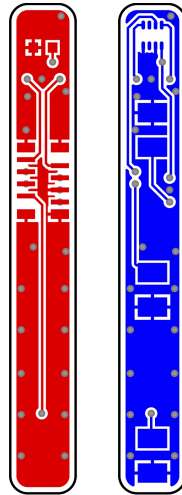
Obrázek 6.2: Jednotlivé vrstvy plošného spoje hlavní desky.



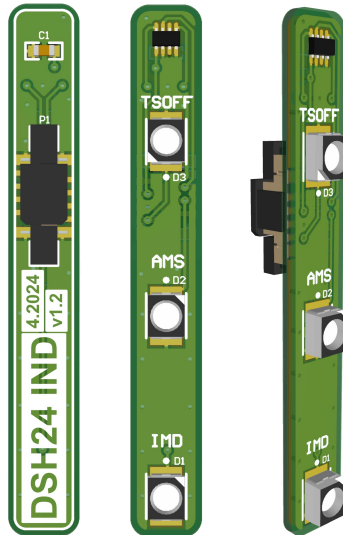
Obrázek 6.3: Rendery plošného spoje hlavní desky.

6.2 Indikátorová deska

Návrh indikátorové desky byl výrazně snazší, než návrh hlavní desky. Byla použita pouze dvouvrstvá deska, jednotlivé vrstvy lze vidět na obrázku 6.4. Cílem bylo navrhnout desku co nejmenší, aby zbytečně nezvětšovala kompletní mechanickou zástavbu jednotky. Výsledný návrh lze vidět na obrázku 6.5.



Obrázek 6.4: Horní a dolní vrstva plošného spoje indikátorové desky.



Obrázek 6.5: Rendery plošného spoje indikátorové desky.

Kapitola 7

Mechanická zástavba

V rámci celého projektu jednotky palubní desky bylo nutné navrhnout i mechanickou zástavbu. Návrh byl realizován v softwaru Fusion 360 od společnosti Autodesk. Při návrhu byl kladen důraz primárně na vodotěsnost a na optimalizaci velikosti. Jednotka se dle celého modelu vozu musela vejít do rozměrů $180 \times 120 \times 20$ mm. Finální návrh má velikost $176,2 \times 112 \times 17$ mm. Kromě akrylátového skla, které chrání indikátory a indikátorovou desku, byly všechny díly navrženy tak, aby je bylo možné vyrobit pomocí FDM 3D tisku. Jako materiál byl zvolen polykarbonát především kvůli jeho vysoké mechanické a teplotní odolnosti. Rendery rozpadu a finální zástavby lze vidět na obrázcích 7.1 a 7.2.



Obrázek 7.1: Render rozpadu mechanické zástavby.



Obrázek 7.2: Rendery mechanické zástavby.

Kapitola 8

Osazení a ověření funkčnosti

Po obdržení hotových desek plošných spojů bylo možné začít desky osazovat. Jak již bylo dříve zmíněno, osazování probíhá standardně ručním pájením za použití pájecí stanice s hrotovou pájkou, případně horkovzdušnou stanicí. Osazování komponentů probíhalo vždy po určitých funkčních blocích, kdy byla po osazení každého bloku zkontrolována funkčnost zařízení. Tím lze předejít obtížnému hledání chyb.

Jako první byly osazeny součástky spravující napájení na hlavní desce. Po osazení byly hlavní napěťové úrovně zkontrolovány a proměřeny pro ověření nepřítomnosti zkratu. Na desku bylo následně přivedeno napětí a byly přeměřeny všechny výstupní napěťové úrovně. Díky LED bylo také možné vizuálně zkontrolovat přítomnost napětí na různých větvích.

S přítomným 3,3V napájením mohl být osazen a otestován mikrokontrolér. Spolu s ním byl osazen i oscilátor, programovací konektor a veškeré okolní pasivní komponenty. Opět došlo ke kontrole zkratů jak mezi sousedními vývody MCU, tak na napájení. Po přivedení napětí na desku a zkontrolování jejího rozumného odběru byl mikrokontrolér připojen k externímu programátoru a byla zkontrolována možnost připojení k mikrokontroléru.

Druhým klíčovým komponentem, který bylo potřeba otestovat, byl samotný displej. Pro jeho připojení k mikrokontroléru tak byly osazeny FPC konektory, ESD ochrany a ostatní pasivní komponenty. Po připojení k počítači byl do mikrokontroléru nahrán program pro otestování všech barev displeje. S tím bylo také možné otestovat PWM regulaci jasu. Jako poslední byla s připojeným displejem otestována dotyková vrstva komunikující přes I2C sběrnici.

Dále zbývalo na hlavní desce osadit bloky RAM a flash paměti, CAN obvody, indikátorů a bzučáku. Během osazování byla deska průběžně kontrolována na přítomnost zkratů, byl měřen vstupní proud a také byla snímána termokamerou. Díky ní bylo také možné pozorovat rozdíly v teplotách různých částí plošného spoje. Nejvíce tepelně namáhaným místem bylo zjištěno okolí lineárního regulátoru 3,3 V. Jeho teplota však v pokojových podmínkách nepřesáhla 48°C. Snímek pořízený termokamerou lze vidět na obrázku 8.1. Při testování byly na určité signály připájeny testovací vodiče, na které bylo následně možné pohodlně připojit měřicí sondy.

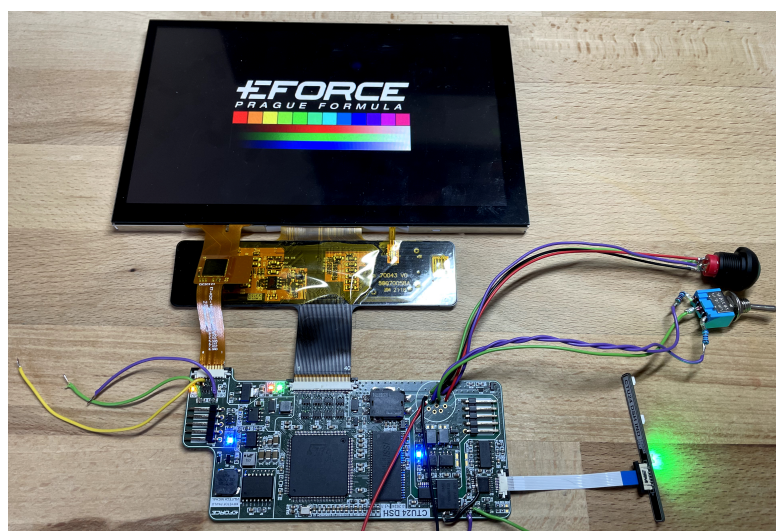
Paměti byly testované zápisem určitých hodnot, jejich následným přečtením a vymazáním. CAN komunikace byla otestována připojením převodníku pro



Obrázek 8.1: Termografický snímek desky plošných spojů.

CAN, ze kterého byly čteny přijaté zprávy. Testování bzučáku probíhalo generováním PWM signálu s proměnnou střídou a frekvencí.

Posledním důležitým blokem na otestování byly indikátory a ALS. K tomu bylo nutné osadit indikátorovou desku. Ta byla následně připojena k hlavní desce pomocí FPC vodiče. Pro otestování indikátorů AMS a IMD stačilo pouze měnit výstupní hodnotu GPIO výstupů z mikrokontroléru. Indikátor TS OFF bylo nutné otestovat zapojením různých hodnot rezistorů mezi vstupní TS OFF vstup na konektoru a zemní potenciál. Kromě samotných indikátorů bylo potřeba otestovat i chybné stavy SCS signálu TS OFF, při kterém nesmí indikátor svítit. Jedná se o stav otevřeného obvodu, zkratu na napájení a zkratu na zem. Následně proběhla kontrola správného fungování FAULT výstupu ze zdroje pro indikátory a vypnuté logiky one-fails-all-fail. Při ní byl odpájen jeden z indikátorů a byly kontrolovány funkce ostatních. Senzor okolního osvětlení a jeho komunikace pomocí sběrnice I2C byla testována dotazem na konkrétní data senzoru. Veškeré testování jednotky bylo úspěšné, vše fungovalo dle očekávání. Funkční jednotku lze vidět na obrázku 8.2.



Obrázek 8.2: Funkční jednotka palubní desky.

Kapitola 9

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a otestovat jednotku palubní desky pro vůz CTU.24 týmu eForce Prague Formula.

V první části práce byla popsána řešení u předchozích vozů a zároveň byly definovány přesné požadavky pro letošní palubní desku. Ty vyplývaly z pravidel soutěže Formula Student Germany, z kompletně nového konceptu vozu a ze zpětné vazby od pilotů z minulých let. Hlavní změnou v novém konceptu vozu byla integrace barevného dotykového displeje na jednotku palubní desky. V další kapitole byly proto popsány obecné parametry displejů a konkrétní kritéria jejich výběru pro aplikaci na palubní desce. Podle požadavků byl vybrán sedmpalcový LCD displej KD070WVFPA043-C049A od výrobce Shenzhen Startek Electronic Technology Co. s kapacitní dotykovou vrstvou. Druhým klíčovým komponentem jednotky je mikrokontrolér, bylo proto nutné blíže specifikovat parametry jeho výběru. Díky nim byl vybrán mikrokontrolér STM32H7A3ZIT6 od výrobce STMicroelectronics. S vybranými klíčovými komponenty bylo možné přejít k tvorbě funkčních bloků na základě zadání, výběru jejich součástek a realizaci schematického zapojení. Na jeho základě byly dále navrženy desky plošných spojů. Celá jednotka byla rozdělena na dvě desky plošných spojů - hlavní a indikátorovou a to především kvůli jednoduššímu návrhu mechanické zástavby. Po dodání vyrobených plošných spojů došlo k jejich osazení a k testování jednotky. To bylo prováděno systematicky po jednotlivých funkčních blocích.

Po otestování bylo zřejmé, že jednotka palubní desky funguje podle očekávání. Její funkčnost a spolehlivost však bude nejvíce prověřena během skutečné závodní sezóny na voze CTU.24.

Příloha A

Bibliografie

- [1] STMicroelectronics. *AN4860, Application note, Introduction to DSI host on STM32 MCUs and MPUs* [Online]. 4. vydání. 2023 [cit. 2024-04-13]. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4860-introduction-to-dsi-host-on-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
- [2] *Formula Student Rules 2024* [Online]. 2. vydání. 2024 [cit. 2024-04-13]. Dostupné také z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf
- [3] STMicroelectronics. *AN4861, Application note, LCD-TFT display controller (LTDC) on STM32 MCUs* [Online]. 4. vydání. 2023 [cit. 2024-04-13]. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4861-lcdtft-display-controller-ltdc-on-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [4] NAM, Hyoungsik, Ki-Hyuk SEOL, Junhee LEE, Hyeonseong CHO a Sang Won JUNG. Review of Capacitive Touchscreen Technologies: Overview, Research Trends, and Machine Learning Approaches. *Sensors*. 2021, 21(14).
- [5] Display KD070WVFPA043-C049A. In: *Lcdlcd.com* [online]. 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://en.lcdlcd.com/product/888-KD070WVFPA043-C049A-7.0-inch-800x480-full-viewing-angle-high-brightness-IPS-TFT-LCD-display-with-RGB-interface-with-capacitive-touch-panel.html>
- [6] Shenzhen Startek Electronic Technology Co.,Ltd. *KD070WVFPA043-C049A display datasheet* [Online]. 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://en.lcdlcd.com/product/888-KD070WVFPA043-C049A-7.0-inch-800x480-full-viewing-angle-high-brightness-IPS-TFT-LCD-display-with-RGB-interface-with-capacitive-touch-panel.html>

- [7] PAWLENKA, Tomas, Jiri KULHANEK, Petr TOMCIK a Rostislav ZAPLETAL. Design of Digital CAN Based Car Dashboard Unit. *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)* [online]. IEEE, 2019, 1-4 [cit. 2024-05-10]. ISBN 978-1-7281-0702-8. Dostupné z: doi:10.1109/CarpathianCC.2019.8766024
- [8] AiM MXS Strada Technical Specification. *AiM Sportline* [online]. 2024 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.aim-sportline.com/en/out-of-production/mxs-strada/technical-specifications.htm>
- [9] AiM MXS Strada. In: *Aim-cz.com* [online]. 2018 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.aim-cz.com/ver-Strada/MXS-Strada.html>
- [10] TSD 4.3 Inch 800x480 TFT LCD With CTP. *TSLCD* [online]. 2024 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: https://www.tslcd.com/tsd-4-3-inch-800x480-tft-lcd-with-ctp_p731.html
- [11] STMicroelectronics. *AN5307, Application note, Getting started with STM32H7A3/7B3 line and STM32H7B0 Value line microcontroller hardware development* [Online]. 6. vydání. 2022 [cit. 2024-04-16]. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5307-getting-started-with-stm32h7a37b3-line-and-stm32h7b0-value-line-microcontroller-hardware-development-stmicroelectronics.pdf
- [12] STMicroelectronics. *STM32H7A3xI/G Datasheet* [Online]. 8. vydání. 2022 [cit. 2024-04-16]. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h7a3ai.pdf>
- [13] STMicroelectronics. *AN2867 Application note, Guidelines for oscillator design on STM8AF/AL/S, and STM32 MCUs/MPUs* [Online]. 20. vydání. 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an2867-guidelines-for-oscillator-design-on-stm8afals-and-stm32-mcusmpus-stmicroelectronics.pdf
- [14] Würth Elektronik. *830108338809 Datasheet* [Online]. 2020 [cit. 2024-04-16]. Dostupné také z: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/830108338809.pdf>
- [15] Integrated Silicon Solution, Inc. *IS37SML01G1, IS38SML01G1 Data Sheet* [Online]. 2. vydání. 2020 [cit. 2024-04-18]. Dostupné také z: <https://www.issi.com/WW/pdf/37-38SML01G1.pdf>
- [16] Integrated Silicon Solution, Inc. *IS42S16400J, IS45S16400J, 1 Meg Bits x 16 Bits x 4 Banks (64-MBIT) SYNCHRONOUS DYNAMIC RAM* [Online]. 2022 [cit. 2024-04-18]. Dostupné také z: <https://www.issi.com/ww/pdf/42-45s16400j.pdf>

- [17] Texas Instruments Incorporated. *TCAN1462-Q1 and TCAN1462V-Q1 Automotive Fault-Protected CAN FD Transceiver with Signal Improvement Capability (SIC) and Standby Mode*. 2. vydání. 2022 [cit. 2024-04-18]. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcan1462-q1.pdf>
- [18] LMR38020 4.2-V to 80-V, 2-A, *Synchronous SIMPLE SWITCHER® Power Converter with 40- μ A IQ* [online]. 5. vydání. 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr38020.pdf>
- [19] XIE, Henry a Eric GUO. *Application Note, How the Switching Frequency Affects the Performance of Buck Converter* [Online]. 2. vydání. 2024 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slvaed3a/slv_aed3a.pdf
- [20] Texas Instruments Incorporated. *TLV761 16V, 1A, Fixed Output Linear Voltage Regulator* [Online]. 3. vydání. 2024 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv761.pdf>
- [21] Texas Instruments Incorporated. *TPS92511 500-mA, 65-V Common Anode Constant Current Buck LED Driver Without External Current Sensing Resistor* [Online]. 2. vydání. 2014 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92511.pdf>
- [22] Texas Instruments Incorporated. *NA228-Q1 AEC-Q100, 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With I2C Interface* [Online]. 2. vydání. 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina228-q1.pdf>
- [23] Texas Instruments Incorporated. *TLV181x and TLV182x Family of 40 V Rail-to-Rail Input Comparators with Push-Pull or Open-Drain Output Options* [Online]. 4. vydání. 2023 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv1824.pdf>
- [24] Texas Instruments Incorporated. *TPS92623-Q1 Three-Channel, Automotive High Side LED Driver with Thermal Sharing Control* [online]. 2. vydání. 2022 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92623-q1.pdf>
- [25] Texas Instruments Incorporated. *OPT4001 High Speed, High Precision, Digital Ambient Light Sensor* [Online]. 2. vydání. 2022 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt4001.pdf>
- [26] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0181-0.
- [27] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

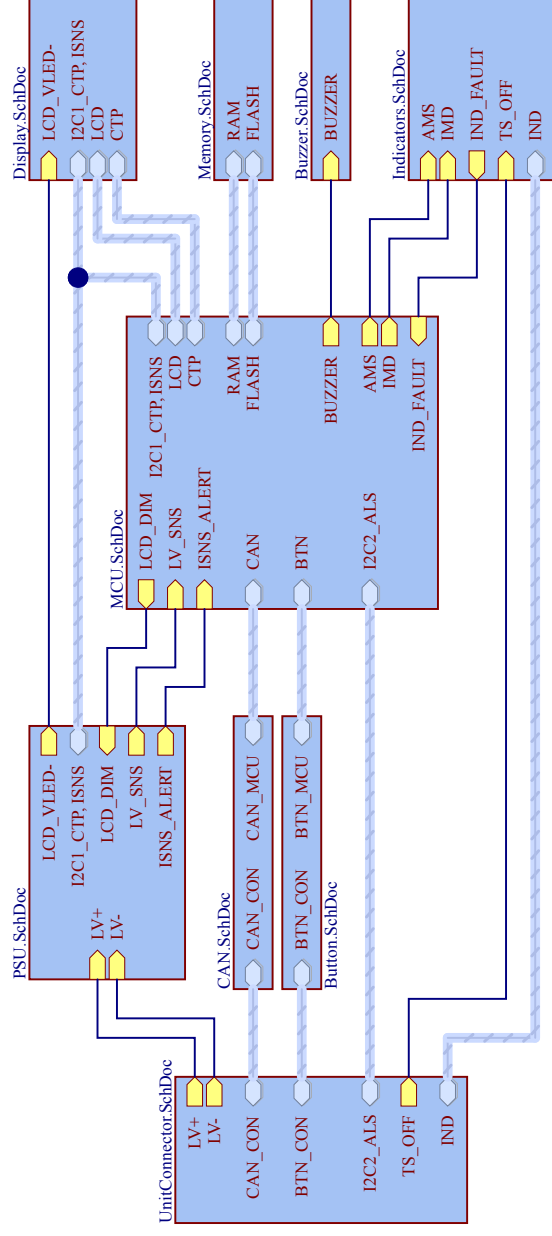


Příloha B

Schémata zapojení

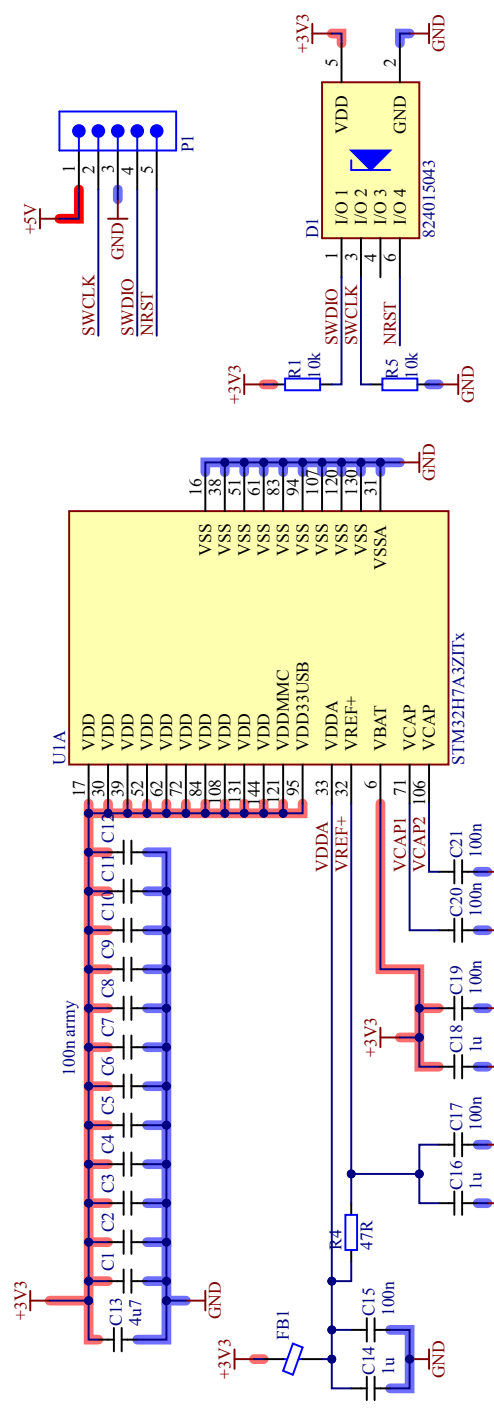
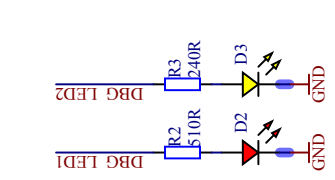
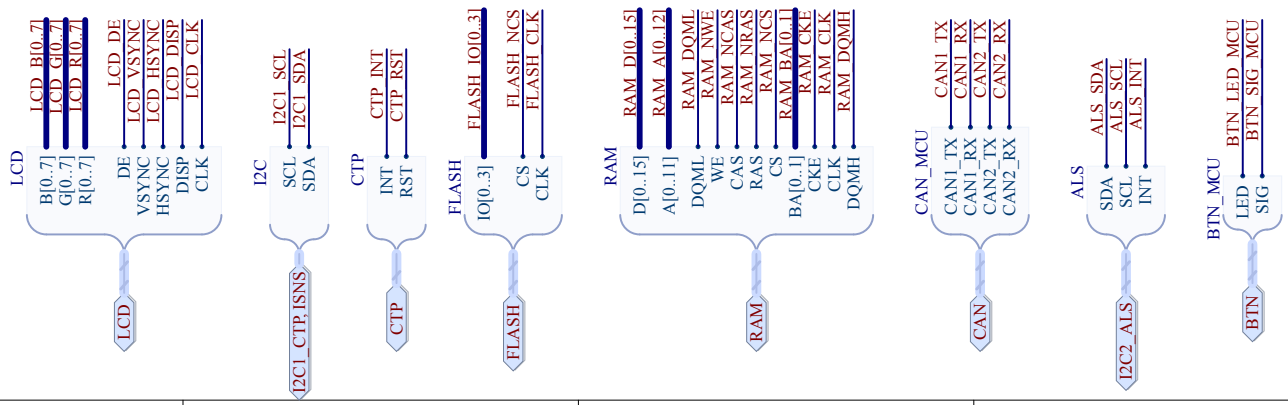
CTU24 Dashboard

This project includes the design of the dashboard unit for the Formula Student car CTU24 of the eForce Prague Formula team from the Czech Technical University in Prague. The unit contains two PCBs, this Main PCB and then the Indicator PCB. On this PCB all power and control of the unit is located. The indicator PCB contains only LED indicators and ambient light sensor. The unit has been split into two boards for better mechanical integration.



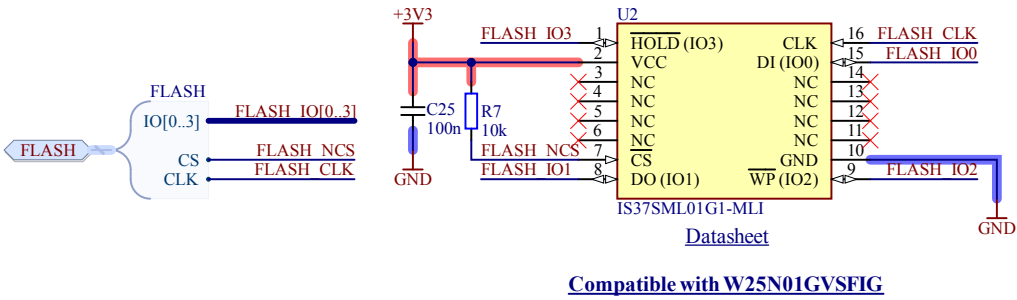
MCU

The STM32H7A3ZIT6 chip was chosen for the microcontroller. The main parameters of the selection were 2x CANFD, FMC periphery for connecting 16bit SDRAM and LTDC for connecting LDC TFT display.



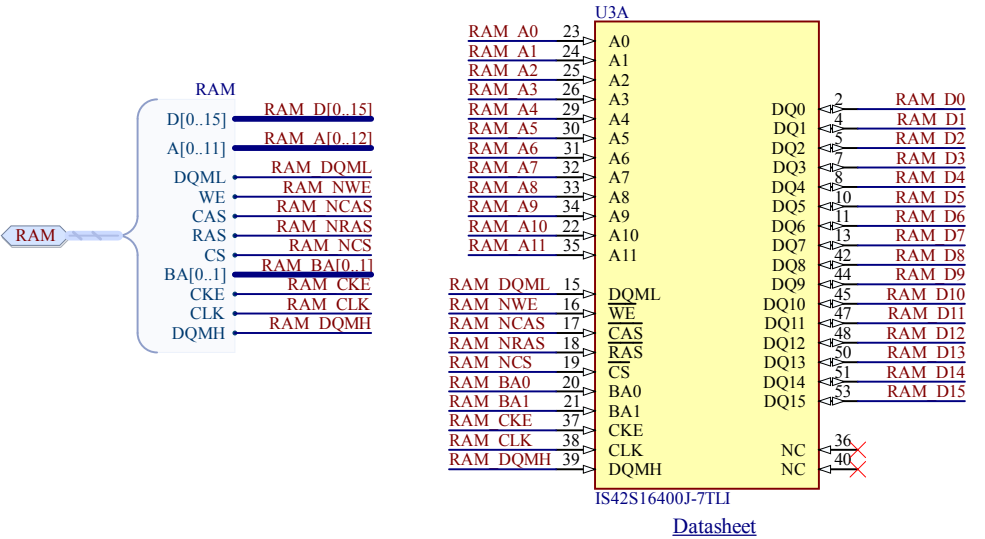
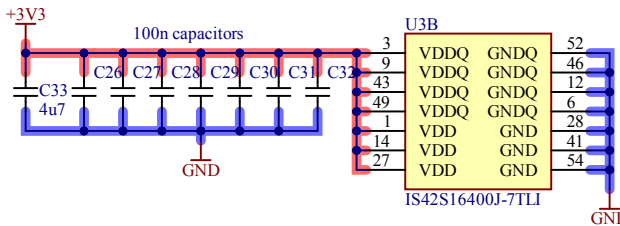
FLASH memory

An external NAND flash memory is used to store the parameters. It will store driving profiles (car settings) for individual pilots, namely VDCU settings. It can also be used for storing larger graphic materials rendered on the display (bitmaps) or graphic libraries.



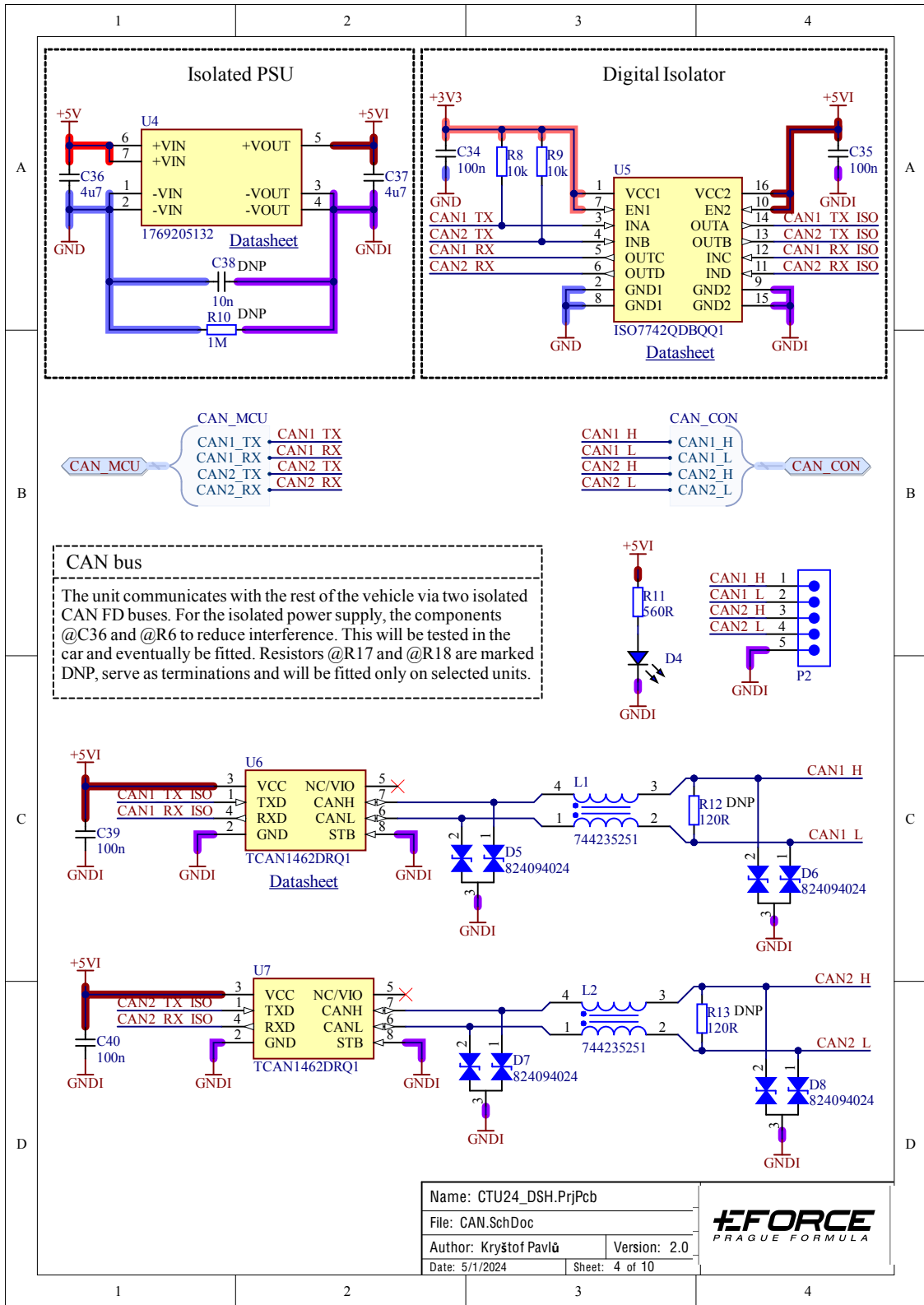
SDRAM

SDRAM is used to store and manipulate the data of the rendered image to be rendered on the display. A single 4 bank SDRAM with a total size of 64Mbit and a 16bit bus width was chosen based on the recommendations from the MCU manufacturer.



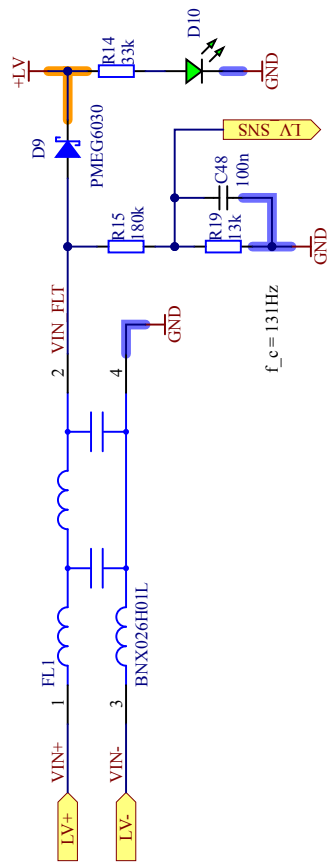
Name: CTU24_DSH.PrfPcb	
File: Memory.SchDoc	
Author: Kryštof Pavlů	Version: 2.0
Date: 5/1/2024	Sheet: 3 of 10





LV to +5V

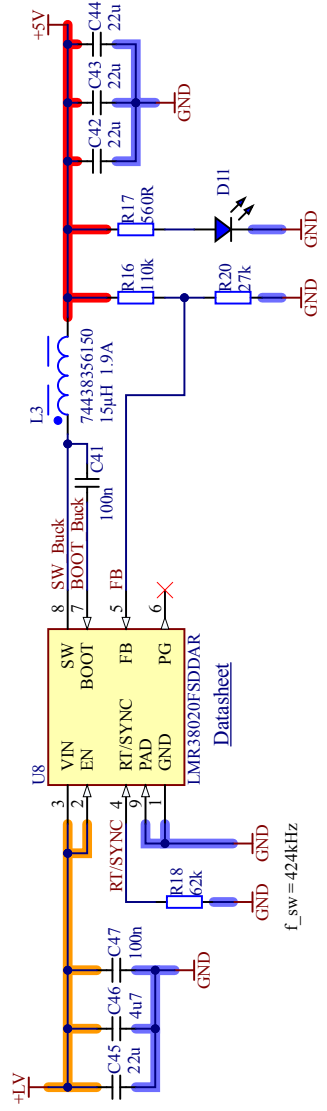
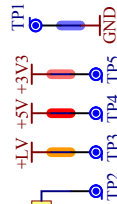
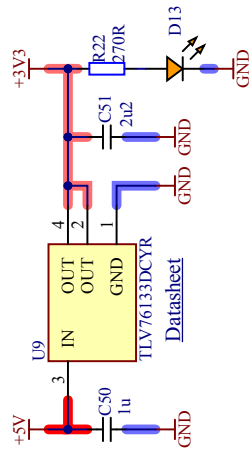
The unit is powered by an unregulated supply that corresponds to 1/16th of the voltage on a 600V traction accumulator. Due to accumulator discharge, we assume an input voltage of 37.5V - 32V. This voltage is further reduced to 5V using the LMR38020FSDDAR switching power supply.



$$V_{in} = 37.5V \rightarrow V_{in_SNS} = 2.53V$$

+5V to +3,3V

Linear regulator for creating 3V3 voltage levels for all components with 3V3 logic and supply.

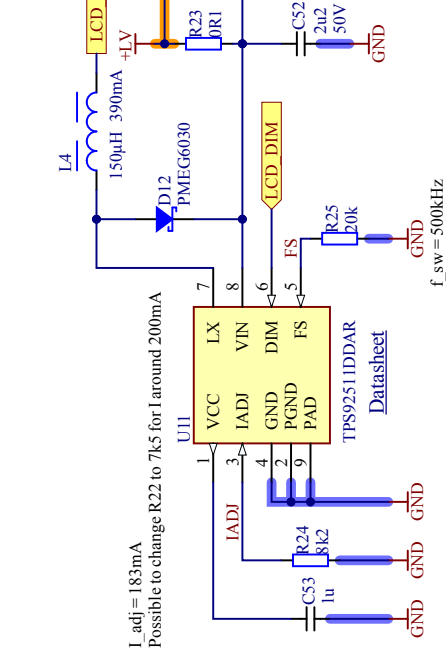


$$f_{sw} = 424kHz$$

$$f_c = 13.1Hz$$

LCD backlight

The backlight consists of 3 parallel branches, each with 8 serial LEDs.
 $V_{LED} = 25,6V$
 $I_{LED} = 180mA$ (typ.)
 The current flowing into the display is regulated by the TPS92511DDAR. The brightness can be controlled just by regulating the current. To sense and adjust the current more accurately, there is a current sensor INA228AQDGSRQ1 which then sends the current data via I2C to the MCU.



$$I_{adj} = 183mA$$

Possible to change R22 to 7k5 for I around 200mA

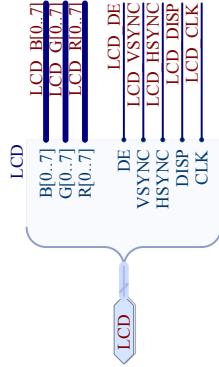
I2C address: 0x40 (10000000)
 For full scale value $\pm 40,96 mV$ (ADCRANGE = 1),
 max sensable current is 410mA

$$f_{sw} = 500kHz$$



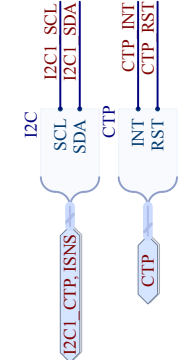
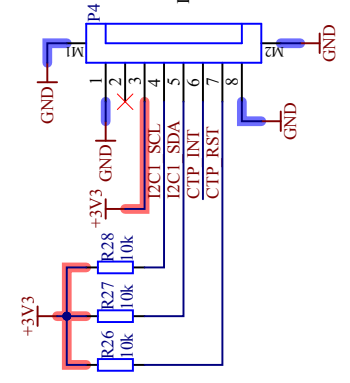
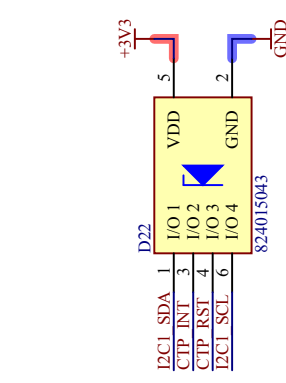
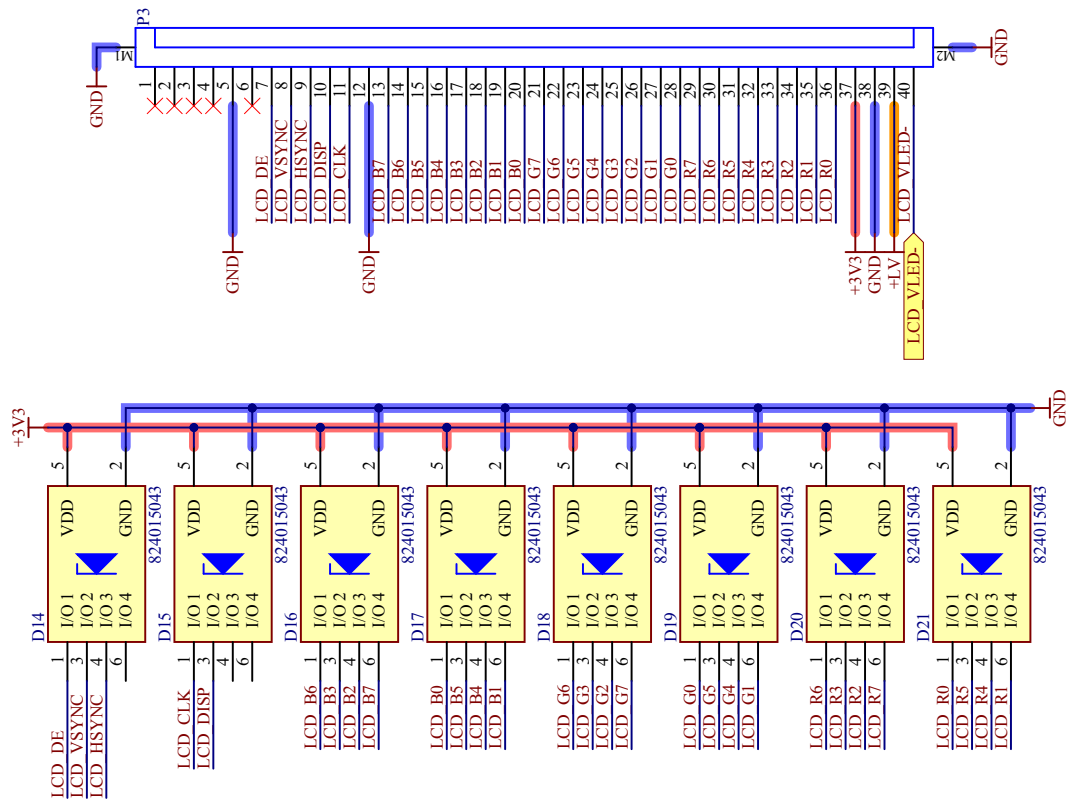
Display connectors

The display is connected to the PCB by two FPC connectors, for the LCD itself it is a 40pin and for the capacitive touch layer it is an 8pin connector. Each data line leading from the display is properly protected against ESD discharges and against connection to higher voltages, to avoid destroying the MCU or the display.



The display connector is numbered opposite to the datasheet, this is due to the mechanical design of the connector. When you look at the mechanical drawing of the display you can see that once the connector is numbered from left to right and the other way round.

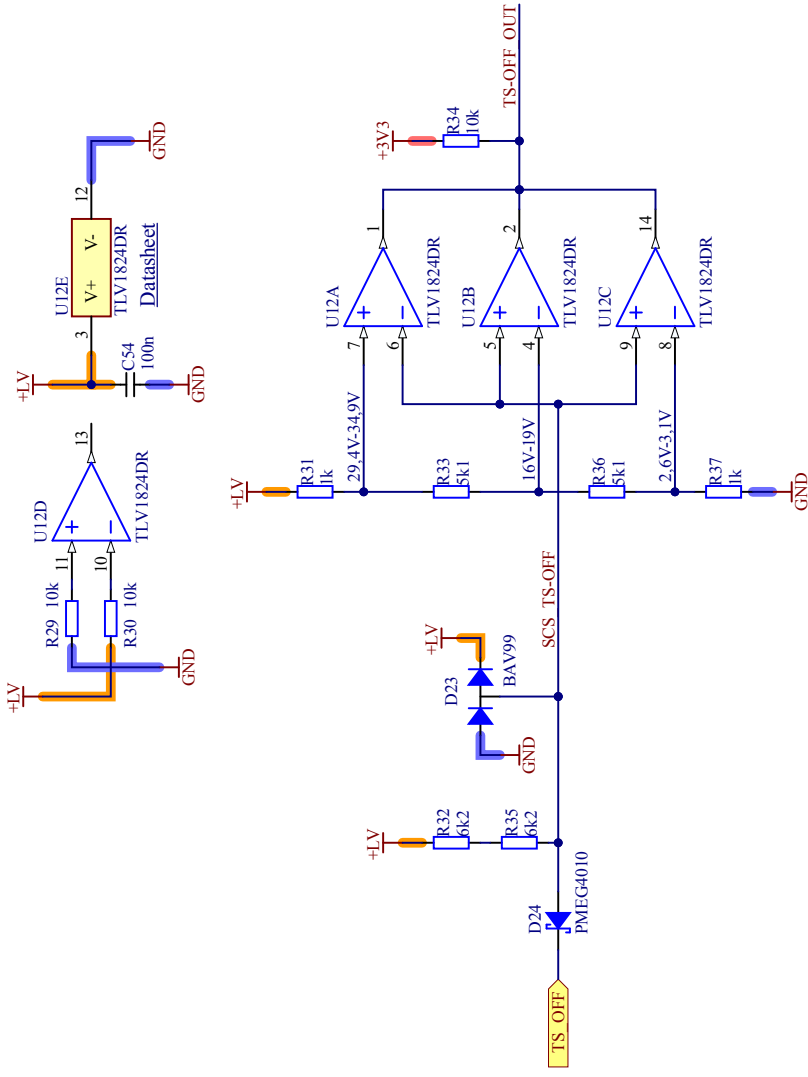
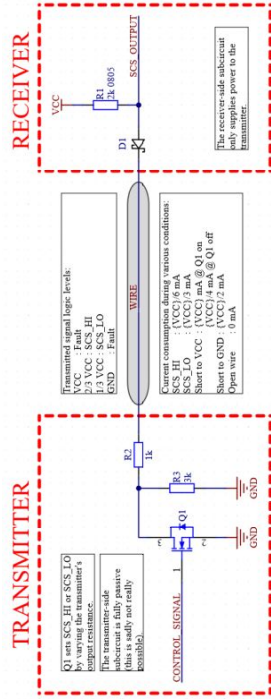
[Datasheet](#)



TS OFF indicator

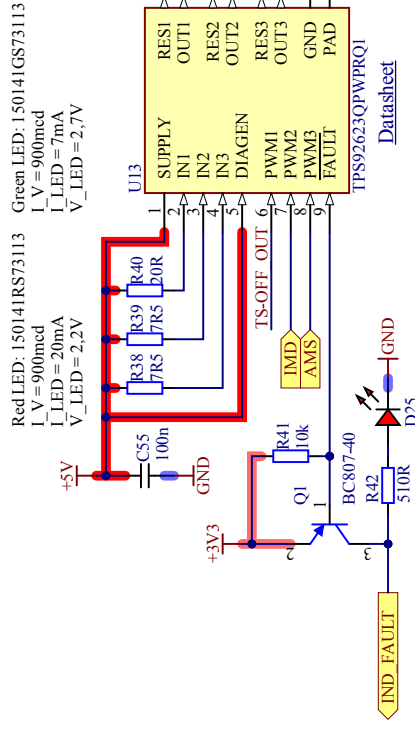
According to FSG rules, there must be three indicators in the cockpit of the car: the AMS, IMD and TS OFF. TS OFF signal is sent by the TSAL unit, which according to EV 4.10.9 must be all hard-wired and software control is not allowed. Therefore the information is sent over the actual signal line. However, the rules of Chapter T 11.9 state that this line is to be a system critical signal, which must evaluate a faulty transfer of information, such as a short to ground, short to power, or open-wire. Therefore, multiple state logic operates on the line. The overall concept of SCS can be seen here: [Simulation](#)

For VCC = LV transmitter resistors: R2 = 2x 3.9k and R3 = 13k



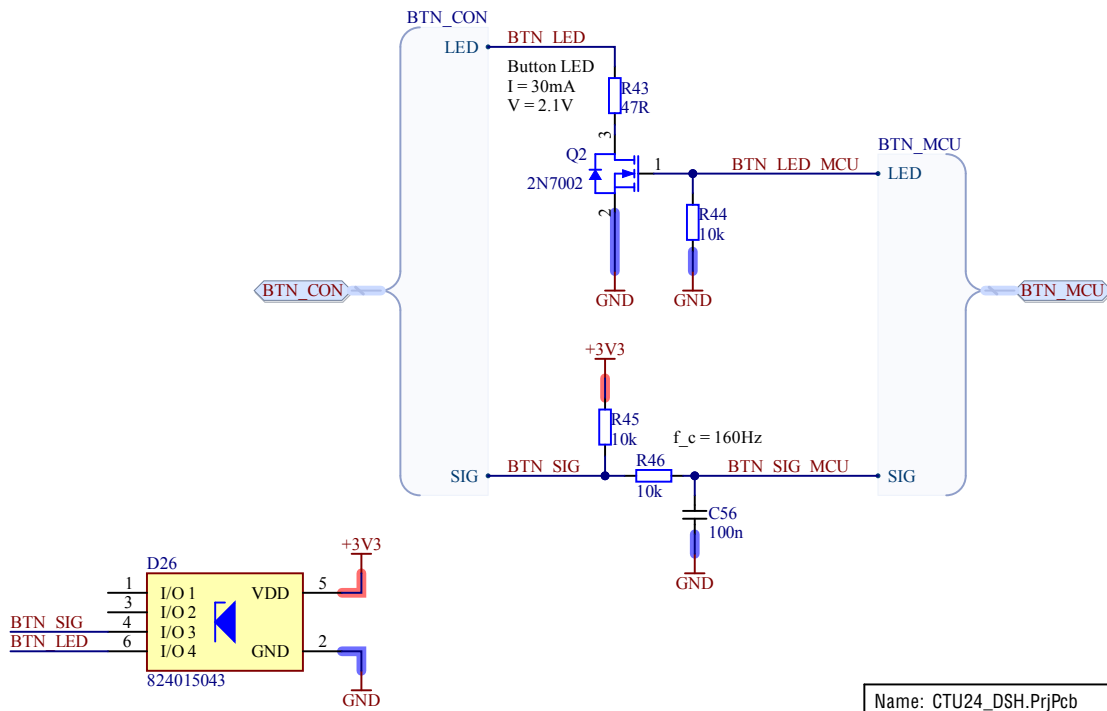
AMS, IMD indicators

The AMS and IMD indicators are illuminated depending on the signals from the traction battery unit. The information is sent over the CAN bus, which is secured like TS OFF as a system critical signal, only using software. The LED driver TPS92623QPW/PQ1 is used because of the adjustability of the LED brightness, but mainly because of the possibility to detect LED errors such as open circuit, short to power supply, or ground and overtemperature.



START button

An button with LED backlight is used for the START button. The LED alerts the driver to the status of the car by lighting/flashing.

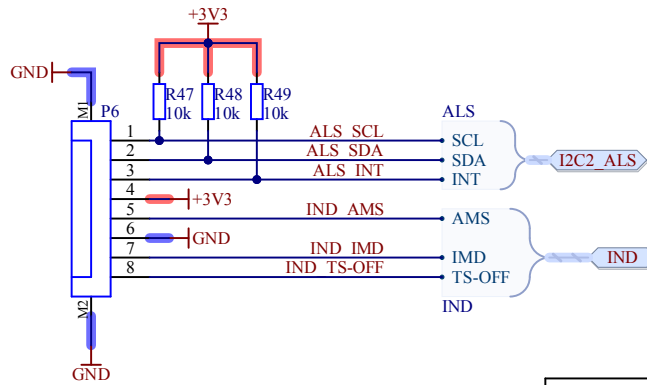
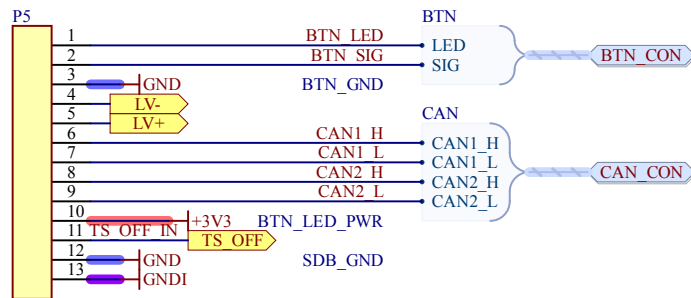


Name: CTU24_DSH.PrjPcb	
File: Button.SchDoc	
Author: Kryštof Pavlů	Version: 2.0
Date: 5/1/2024	Sheet: 8 of 10



Unit connectors

The unit is connected to the rest of the car via a 13-pin DEUTSCH AS210-35Sx connector. It is used for power supply, CAN bus, TS OFF signal and output for START button. The second connector is used to connect the indicator board using the FPC cable.

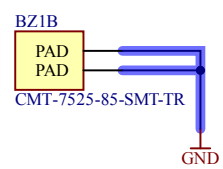
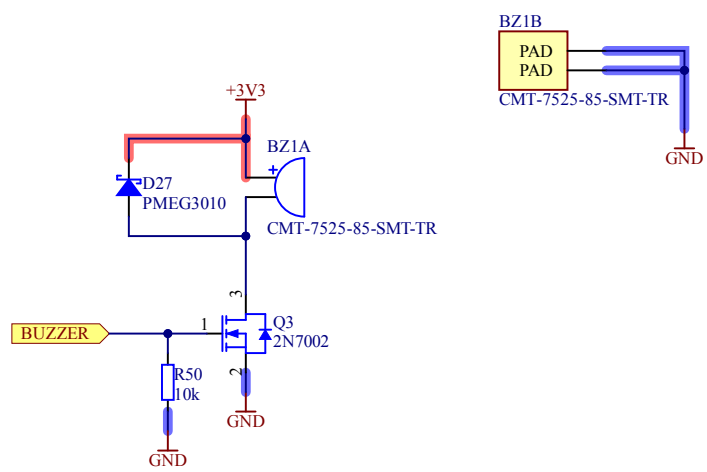


Name: CTU24_DSH.PrjPcb	
File: UnitConnector.SchDoc	
Author: Kryštof Pavlů	Version: 2.0
Date: 5/1/2024	Sheet: 9 of 10



Buzzer

A simple buzzer was added to complement the visual component of the display with audio. The intensity can be changed by using the PWM signal's alternation and frequency.

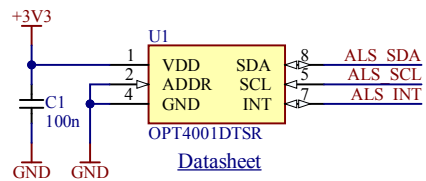


Name: CTU24_DSH.PrjPcb		
File: Buzzer.SchDoc		
Author: Kryštof Pavlů	Version: 2.0	
Date: 5/1/2024	Sheet: 10 of 10	

CTU24 Dashboard Indicators

This PCB serves as an indicator board for the dashboard unit of the eFroce Prague Formula Student team's CTU24 car from the Czech Technical University in Prague. The board complements the Main dashboard board with LED indicators and ambient light sensor. It is separated from the main board for better mechanical integration.

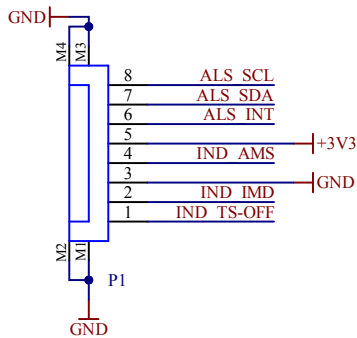
Ambient Light Sensor



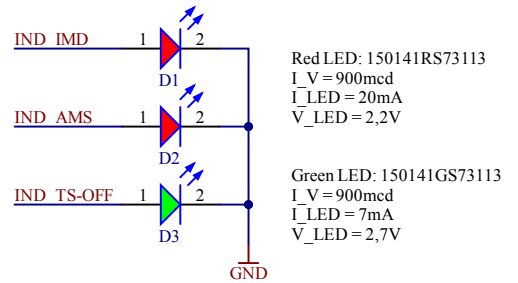
I2C address: 0x44 (1000100)

[Datasheet](#)

PCB Connector



Indicators



Name: CTU24_DSH_IND.PrjPcb	
File: Main.SchDoc	
Author: Kryštof Pavlů	Version: 1.1
Date: 5/1/2024	Sheet: 1 of 1

EFORCE
PRAGUE FORMULA