

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**NÁVRH PROGRAMOVATELNÉ
POJISTKOVÉ SKŘÍNĚ PRO
STUDENTSKOU FORMULI**

**DESIGN OF A CONNECTED FUSEBOX FOR A FORMULA STUDENT RACING
CAR**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hazdra** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **482599**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh měřicí pojistkové skříně pro studentskou formuli

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a measurement fusebox for a formula student racing car

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení se se senzory elektrického proudu a sběrnici CAN
2. Výběr senzorů a mikrokontroleru pro pojistkovou skříně
3. Vývoj měřicího a komunikačního softwaru zařízení
4. Ověření funkčnosti v provozu a analýza dat

Seznam doporučené literatury:

- [1] Uhlíř I. Elektrické obvody a elektronika, skriptum ČVUT, 2008, ISBN 978-80-01-03932-8
- [2] Rizzoni Giorgio, Principles and Applications of electrical Engineering, McGraw-Hill Publishing Company, ISBN 0-256-26116-4
- [3] Cetl, T., Papež, V.: Konstrukce a realizace elektronických obvodů. Skripta FEL ČVUT, Praha 2002

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubomír Musálek, odbor elektrotechniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lubomír Musálek
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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

Anotační list

Jméno autora:	Martin Hazdra
Název BP:	Návrh měřicí pojistkové skříně pro studentskou formuli
Anglický název:	Design of a measurement fusebox for a formula student racing car
Rok:	2021
Studijní program:	B2342 TZSI
Ústav:	U12110 Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí a konzultant BP:	Ing. Lubomír Musálek.
Bibliografické údaje:	počet stran 44 počet obrázků 15 počet tabulek 5 počet grafů 1 počet příloh 1 CD, 5 listů
Klíčová slova:	Formula student, měření proudu, pojistková skříň, CAN
Keywords:	Formula student, current measurement, fusebox, CAN

Anotace: Práce se zabývá návrhem pojistkové skříně pro vůz formula student. Jsou v ní rozebrány způsoby měření proudu s pomocí bočníků a se senzory využívajícími Hallova jevu. Dále je nastíněn základ komunikace digitálních systémů, obzvláště pak sériové komunikace. Nakonec je podrobně popsáno fungování sběrnice CAN. Na konci teoretické části jsou z praktického hlediska rozebrány parametry tranzistorů MOSFET. V praktické části jsou vybrány vhodné součásti, důkladně je rozebrán výběr mikrokontroleru, proudových snímačů a spínacích prvků. Dále je popsán postup při návrhu plošného spoje a je vypočítáno, zda je zvolené chlazení dostatečné. V části software jsou popsány použité nástroje pro vývoj, dále je vysvětlen postup vývoje softwaru a jeho funkce. Na konci práce jsou vyhodnocena data, získaná z navrženého systému za jízdy.

Abstract: This thesis is concerned with the design of a fusebox for a formula student racing car. It describes the principles and application of electrical current measurement using both shunt resistors and hall effect based sensors. Then communication in digital systems is described, with emphasis on serial communication. The thesis then describes the operation of CAN bus. Mosfet operation is also briefly touched on from from a practical point of view. In the practical section, component choices are explained. The PCB design process is covered, as well as the process of thermal calculation for power devices. The tools used for development are described in the software section. The operation of the final software is explained. The saved data from system operation are then used calculate the expected consumption of all significant systems in the car.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Lubomíru Musálkovi, za vedení mé bakalářské práce a za cenné rady.

Dále děkuji mé rodině za podporu při psaní této práce a při studiu.

Děkuji také kolegům z týmu CTU CarTech za možnost realizace navrženého systému.

Obsah

1 Úvod	6
2 Teoretická část	8
2.1 Jednotky napájení	8
2.1.1 Life racing PDUx2	8
2.1.2 Motec PDM15	8
2.1.3 Haltech nexus R5	8
2.1.4 Shrnutí	8
2.2 Měření proudu	9
2.2.1 Hallův jev	9
ACS770	10
LEM HLSR	11
Split core	11
2.2.2 Měření s pomocí bočníků	11
Možnosti umístění bočníku	11
Proud snímající zesilovač	12
2.3 Sběrnice CAN	12
2.3.1 Elektronická komunikace	12
2.3.2 Specifikace CAN	13
2.3.3 Revize sběrnice CAN	15
2.3.4 CAN Kontroler	15
2.3.5 CAN Transceiver	16
SN65HVD232	16
MCP2542FD	16
2.3.6 Řídící systém	16
Mikropočítač	16
2.4 Další využití prvků	17
2.4.1 A/D převodník	17
2.4.2 Automobilové pojistky	18
2.4.3 Spínání zátěží	18
3 Praktická část	19
3.1 Návrhový postup	19
3.2 Výběr komponentů	19
3.2.1 Mikrokontroler	19
STM	19
Texas Instruments	20
Microchip	20
3.2.2 Tranzistory MOSFET	20

3.2.3	Držáky pojistek	24
3.2.4	Relé	24
3.2.5	Diody	24
3.3	Senzory proudu	24
3.3.1	Hall effect	24
3.3.2	Proud snímající zesilovače	25
3.3.3	Bočníky	25
3.4	Návrh PCB	26
3.4.1	Technologické parametry PCB	26
3.4.2	Konektory	26
3.4.3	Rozměry	27
3.4.4	Chlazení	28
3.4.5	Krabička	29
3.4.6	Změny	29
3.5	Software	30
3.5.1	Programování mikrokontrolerů	30
3.5.2	Použité nástroje	31
	Vývojové prostředí	31
	Verzování	31
	Lazení kódu	31
3.5.3	Vlastní software	32
	Nastavení periférií	32
	Nastavení a validace komunikace	33
3.6	Naměřená data	34
4	Závěr	36
	Seznam použitých značek a symbolů	38
	Seznam použité literatury a zdrojů	40
	Seznam příloh	44
	Obsah přiloženého CD	44

1 Úvod

V týmu CTU CarTech stavíme každý rok nový závodní monopost. Pro připojení všech použitých senzorů, řízení motoru a splnění pravidel obsahují kabelové svazky FS.13 dohromady přes 220 metrů vodičů. Z veškeré elektroniky ve voze jsou svazky na výrobu nejnáročnější díl, navíc jsou stále vystavovány riziku poškození. Při spouště servisních úkonů se totiž se svazky musí manipulovat. Zkrat pak může nastat kontaktem svazků s některou rozžhavenou částí motoru, skřípnutím do pohybujících se částí nebo jenom nepozorností při demontáži.

Oprava svazků je bez snížení kvality výroby nepraktická, protože použité obaly svazků se většinou bez kompletního rozebrání více konektorů nedají vyměnit.

Proto je důležité mít pro každý spotřebič zvlášť správně dimenzovanou pojistku, aby v případě jakékoliv chyby vedoucí ke zkratu byly svazky ochráněny a aby bylo pak zpětně možné dohledat, kde zkrat nastal.

Mimo ochranu svazků mohou mít pojistkové skříně další funkce. Mimo pojistky je do pojistkové skříně vhodné umístit i ovládací relé. V pravidlech soutěže je kvůli bezpečnosti nařízeno, že každý závodní vůz musí obsahovat shutdown circuit, definovaný pravidly soutěže jako sériové spojení všech bezpečnostních zařízení formule. Shutdown circuit je zakončen dvěma relé, která zvlášť napájí zapalování a palivovou pumpu. Třetí relé se pak používá pro ECU. Jeho vypnutím řidič vypíná motor.

Pro správný návrh vedení v budoucích autech a zlepšení diagnózy závad se často jako užitečná informace jeví velikost elektrického proudu, který protéká různými systémy. Pojistková skříň pak představuje ideální místo pro jeho měření díky skutečnosti, že to je jediné místo, kde se přívod napětí od akumulátoru rozděluje na různá místa ve vozidle.

Rozložením formule ale vzniká i druhé místo, kde se přímý výstup z akumulátoru rozděluje na další větve, a to na startovacím relé. Zde je možnost navíc měřit zvlášť proud do pravého a levého ventilátoru, proud tekoucí do aktivních aerodynamických prvků a proud z alternátoru. V případě potřeby by se pak do těchto kanálů daly zapojit i jiné senzory pro ostatní skupiny.

Mezi další problémy které je možné pojistkovou skříní řešit je chybějící zadní akcelerometr pro výpočet zrychlení na jednotlivých nápravách a možnost ovládnutí průtoku palivovou pumpou, který v tuto chvíli nemáme jak ovlivnit.

Cílem této práce je tedy návrh pojistkové skříně, která splní výše vytyčené požadavky a půjde upravit pro použití na dvou místech v autě.

Plán elektroniky v novém monopostu FS.13 zobrazuje diagram Obr. 2

V autě používáme pro ukládání jízdních dat datalogger AIM MXS, který mimo své vlastní analogové vstupy se zbytkem vozidla komunikuje prostřednictvím dvou oddělených CAN

2 Teoretická část

2.1 Jednotky napájení

Protože ochrana vodičů je nutná v každém automobilu, poskytuje mnoho výrobců jednotek řízení motoru také "power delivery module", tedy modul, který se stará o distribuci elektrické energie. Pojistky jsou v těchto modulech řešeny elektronicky, v případě nadproudu se tedy poruchová větev elektronicky vypne. Výhodou elektronického vypínání je snadné resetování do původního stavu, toto je možné nastavit i automaticky a díky tomu například dojet závod, když je porucha jenom občasná.

2.1.1 Life racing PDUx2

Jedna taková jednotka je například life racing PDUx2. Nabízí 16 výstupů s různými zapojeními i ve formě H můstků, 12 vstupů pro vypínače nebo senzory a veliké množství komunikačních kanálů na 62 pinovém LevySeal konektoru. Hmotnost PDUx2 je 750g.

2.1.2 Motec PDM15

Jedna z nejlehčích PDM na trhu je MOTEC PDM15. Ta poskytuje celkem 15 výstupů, stavěných na minimálně 8 ampér. Napájení jednotky je prováděno přes hlavní šroub velikosti M6. Pro zaznamenávání dat komunikuje jednotka přes sběrnici CAN, jak je v automobilech běžné. Prodávají se ve dvou variacích, buď s kruhovými autosport konektory nebo s levnějšími plastovými AMP Superseal 1.0. Hmotnost této jednotky je 260g. [15]

2.1.3 Haltech nexus R5

Další výrobce jednotek motorů a PDM je Haltech. Nexus R5 představuje kombinaci řídicí jednotky motoru a PDM, tedy jedna jednotka se stará o řízení motoru i napájení všech silových komponentů, jako například ventilátory a pumpy.

2.1.4 Shrnutí

Problém těchto zařízení je jejich vysoká cena, veliké množství výstupů a od toho se odvíjející hmotnost. Důvodem je to, že většinou bývají navrhovány pro klasické závodní automobily, které mají víc spotřebičů s vyššími nároky na výkon, jako například světla. Do ceny se pak promítá i nutnost specializovaného softwaru. Jednotky navíc nesplňují bezpečnostní pravidla soutěže formula student, bylo by tedy stále potřeba relé na zapalování a palivovou pumpu někde umístit.



Obr. 3: PDM15

2.2 Měření proudu

2.2.1 Hallův jev

Pro měření větších proudů se používají sondy, využívající Hallův jev. Protéká li materiálem proud a tento materiál je vložen do magnetického pole kolmého na tok proudu, vznikne kolmo na směry toku proudu i magnetického pole napětí. To vzniká díky síle působící na pohybující se nabitě částice v magnetickém poli. Hallův jev nastává ve všech vodičích, ale měření hallova napětí v obvyklých vodičích není praktické. Na hallovy sondy se proto používají speciální materiály. [18]

Pro měření proudu sondou prochází známý proud. Naměřené Hallovo napětí je potom závislé na magnetickém poli. Protože magnetické pole vytvořené vodičem není moc silné, nestačí pouze Hallovu sondu umístit do blízkosti vodiče ale je nutné navíc magnetické pole zesílit koncentrátorem. Hallovy sondy mají výraznou teplotní závislost, proto je potřeba teplotní kompenzace.

Výrobci senzorů proudu poskytují už hotové kompenzované senzory proudu v různých pouzdrech podle měřeného rozsahu s napěťovým výstupem.

Měření proudu pomocí Hallovy sondy je možné provádět buď formou "open loop" nebo "closed loop". [2]

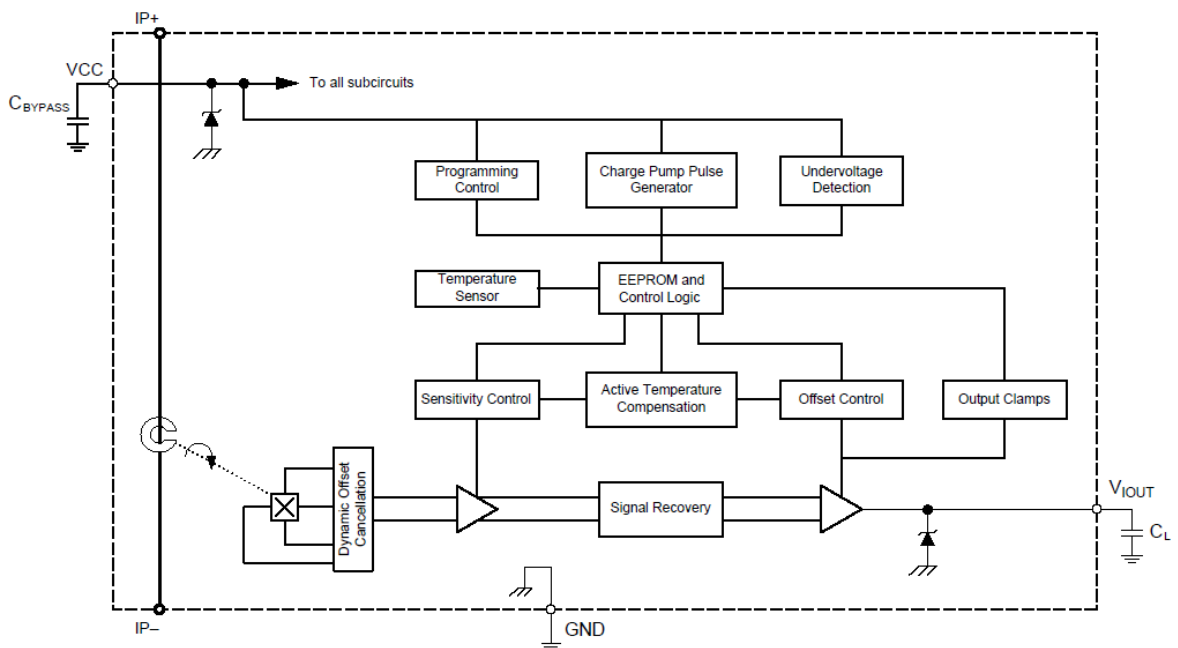
Senzory využívající konfiguraci open loop jsou vnitřně jednodušší a tím pádem levnější. Protože v konfiguraci open loop měří Hallova sonda pokaždé jinak silné magnetické pole, je potřeba kompenzovat její nelinearitu a chyby zesílení. Rozsah měření takového senzoru je navíc omezen možnostmi magnetické saturace použitého koncentrátoru.

Měření s pomocí konfigurace closed loop je založeno na negativní zpětné vazbě. Na magnetickém jádře je namotáno sekundární vinutí, které je napájeno výstupem z měřicího obvodu. Magnetické pole v jádře je měřeno Hallovou sondou, která pak ovládá proud sekundárním vinutím tak, aby se celkový magnetický tok jádrem rovnal nule.

Nyní zde uvedu příklady senzorů proudu, které svými rozměry a proudovým rozsahem vyhovují pro měření proudu z akumulátoru.

ACS770 ACS série proudových senzorů od Allegro microsystems je použitelná pro stejnosměrné i střídavé aplikace pro měření proudu. Typické aplikace jsou ovládání motorů, detekce zatížení, řízení zdrojů a detekce nadproudů.

Zařízení obsahují přesný Hall obvod, umístěný v blízkosti vodivé cesty. Magnetické pole vznikající díky tekoucímu proudu je zesíleno a pomocí Hallovy sondy převedeno na proporciální napětí. Zařízení je interně teplotně kompenzováno. Interní odpor zařízení je standartně méně než $100\mu\Omega$, což dohromady s velkou tloušťkou měděných vodičů zajišťuje odolnost i vůči vysokým nadproudům. Zařízení je kalibrováno z výroby. Vyrábí se ve dvou verzích, a to unipolární a bipolární. Hmotnost senzoru je 5g. V rozsahu teplot od 25° do 150° je celková výstupní chyba typicky 1.5%. [1]



Obr. 4: Diagram hallového senzoru proudu

LEM HLSR Řada senzorů HLSR od společnosti LEM se prodává v pěti rozsazích, rozmístěných od $10A_{RMS}$ do $50A_{RMS}$. Sensory mají malé rozměry a váží 5.5g.

Pracovní napětí na měřicí straně je buď 3.3V nebo 5V. Nejdůležitější charakteristiky proudových senzorů jsou linearita a v případě senzorů s zabudovanou primární stranou schopnost zbavování se tepla. Linearita senzorů HLSR je 0.5%, celková výstupní chyba je v předpokládaném rozsahu teplot do 1%. [5]

Split core Další dostupné senzory se vyrábějí rozpojitelné, je tedy možné do kroužku vložit nepřerušovaný vodič a tak měřit protékající proud, což je vhodné pro příležitostné měření, nebo v případech, kdy je přerušování existujícího vedení náročné. [10]

Vyrábějí se převážně pro střídavé proudy, protože rozpojitelné provedení je vhodné do elektrické sítě, ve stejnosměrném provedení je vyrábí například MAGNELAB, jako příklad uvedu sérii HCT. Ta měří v rozsahu do 50A, s přesností 1%. Senzor ale pro správnou operaci potřebuje napájecí napětí $\pm 15V$.

2.2.2 Měření s pomocí bočnicků

Nejjednodušší způsob měření proudu je vložení malého rezistoru, kterému říkáme bočník, do série s obvodem, jímž protéká proud měříme. Změříme-li potom napětí přes tento bočník, můžeme díky znalosti odporu bočnicku spočítat obvodem protékající proud pomocí Ohmova zákona. Tato metoda je výhodná díky jednoduchosti, nízké ceně a linearitě. [16]

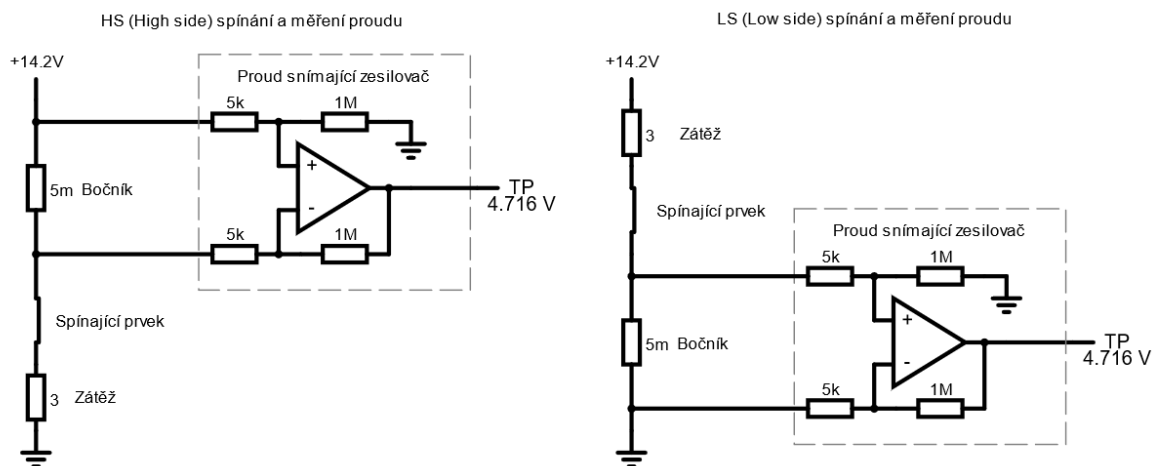
Přesnost měření proudu tímto způsobem je závislá na přesnosti bočnicku, proto volíme specializované rezistory pro tento účel, které mají navíc nízkou závislost odporu na teplotě. Proud protékající bočnickem jej bude totiž zahřívat, proto musíme navíc zvolit takové pouzdro bočnicku, které tento ztrátový výkon uchladí.

Velikost odporu bočnicku pak určuje strmost závislosti naměřeného napětí na protékajícím proudem. Z toho důvodu se pro nižší proudy používají bočnickové s větším odporem a naopak.

Pro proudy v řádu ampérů mají bočnickové odpor řádu zlomků ohmu, proto se pro ně na rozdíl od obvyklých odporů používají jiné výrobní metody. Bočnickové jako vodivý materiál potom používají kovové filmy či folie.

Možnosti umístění bočnicku Bočník lze umístit buď na straně u zdroje nebo u země. Při snímání u zdroje, dále už jenom HS, se bočník dává mezi zdroj a zátěž, při snímání u země, dále už jenom LS, se dává mezi zátěž a zem. Viz. Obr. 5

Snímání na LS pracuje s nižšími napětími, což vede k levnějším proud snímajícím zesilovačům. Nevýhoda je přesunutí zátěže nad zem, napětí země pro zátěž se tedy mění s protékajícím proudem, což může způsobit problémy v případě použití řídicí elektroniky. Zároveň není možné detekovat případné zkraty na zem mimo bočník.



Obr. 5: Umístění bočnicku a spínacího prvku vzhledem k zátěži

Výhody snímání na HS jsou, že pro všechny zátěže může mít zem stejné napětí. Tím že je proud snímán na HS bude rozdíl napětí posunutý o napětí akumulátoru nad zem. Na tuto složku, které říkáme common mode napětí, musí být proud snímající zesilovač dimenzovaný, což vede k vyšší ceně proud snímajícího zesilovače.

Proud snímající zesilovač CSA je speciální diferenciální zesilovač, navržený pro snímání změny napětí na bočnicku. Toto napětí je pro omezení výkonových ztrát vhodné mít co nejnižší, většinou od 1 do 100 mV. Z tohoto napětí musíme odečíst common mode složku, aby šlo měřit mikrokontrolerem. Napětí je navíc potřeba zesílit, protože při takové velikosti signálu bychom využili pouze malou část měřícího rozsahu mikrokontroleru.

Hodnota odporu bočnicku se volí tak, aby ztráta napětí přes bočník byla vyšší, než offsetové napětí proud snímajícího zesilovače. Jmenovitý výkon bočnicku bude záviset na předpokládaném proudu bočníkem. [20]

2.3 Sběrnice CAN

2.3.1 Elektronická komunikace

Jedna z nutných částí systémů pro sběr dat a řízení je schopnost přijímat a vysílat data. Často je kontrolní systém napojen na další digitální zařízení. V tom případě je potřeba přenášet data přímo v digitální formě. Tento způsob přenosu dat má ale oproti analogovému přenosu ve formě napětí či proudů některé výhody, digitální data jsou například méně citlivá na šum či rušení. Když zařízení čte digitální signál, stačí se rozhodnout mezi 1 a 0. Pravděpodobnost špatného rozpoznání 1 od 0 je malá. Navíc se u digitálního přenosu k datům přidávají informace, které umožní přijatá data ověřit a případně automaticky opravit. Nakonec ukládání a zpracování digitálních dat je mnohem snadněji uskutečnitelné, než by tomu bylo u analogových dat. [18]

Data se mohou posílat buď v paralelní formě, kdy je potřeba více vodičů, nebo v sériové formě.

Primární důvod, proč se nepoužívá paralelní přenos dat, je limitovaná vzdálenost, na kterou je možné v takové formě data přenášet. V takovém případě se používá spíše sériová komunikace.

Při sériové komunikaci je signál na jedné cestě a informace se posílá postupně po bitech, což snižuje cenu kabeláže i překládacích jednotek, jejichž rozsah může být omezen na tuto jednu cestu. Při sériové komunikaci existují dva způsoby operace, a to simplex, kdy se data posílají pouze jedním směrem, a duplex, kdy je dovoleno posílat data oběma směry. Způsob simplex potřebuje pouze jeden vysílač na začátku a jeden přijímač na konci, v případě duplex může komunikace probíhat buď v módu half-duplex nebo full-duplex. V módu half-duplex sice komunikace může probíhat oběma směry, ale ne najednou. V módu full-duplex je možné zároveň v obou směrech vysílat i přijímat. Full-duplex přenos se většinou realizuje s pomocí 4 vodičů.

Rychlost přenosu dat při sériové komunikaci se měří v bitech za sekundu. Jednotku 1 bit za sekundu nazýváme baud, proto se často hovoří o baudrate sériové komunikace.

Přenos dat je buď synchronní nebo asynchronní. U synchronních přenosových protokolů je potřeba s daty navíc na dalším vodiči přenášet i časovací clock. Změna stavu clocku znamená, že na datové lince už dorazila nová data. Synchronní komunikace může být rychlejší než asynchronní komunikace, ale kvůli přidané komplexitě synchronní komunikace ve formě dalšího vodiče se synchronní komunikace většinou používá spíš uvnitř zařízení, než mezi zařízeními.

Při asynchronním přenosu dat komunikující jednotky nemohou odečíst rychlost komunikace z clocku, proto musí být každá jednotka správně nastavená. Asynchronní protokoly také musejí mít způsob, jakým se oznamuje začátek vysílání. Většinou tato domluva spočívá v přenosu dat, oznamující připravenost vyslat data a oznámení o přijatých datech.

2.3.2 Specifikace CAN

Pro automobilové aplikace byl vyvinut CAN bus, což je robustní asynchronní sériová sběrnice, která se používá na komunikaci mezi různými jednotkami. Hojně se využívá v automobilech ale i v dalších náročných prostředích, například v průmyslové automatizaci. [17]

V moderních automobilech je čím dál více elektronických systémů. Může se stát, že více systémů potřebuje pro svojí funkci znát stejnou proměnnou. Například informace o rychlosti kol se používá na displeji řidiče, k trakční kontrole s pomocí motoru, jako vstup do ABS apod. Aby bylo možné naměřené hodnoty sdílet, bylo nutné vyvinout novou rychlou komunikační metodu.

Sběrnice CAN poskytuje sofistikovaný komunikační systém pro komunikaci mezi různými subsystemy. Mezi důležité vlastnosti tohoto systému patří komunikační protokol a formát zpráv. Je velice výhodné mít jeden standardní protokol pro všechny automobily. SAE standardizovala specifikaci CAN, původně pouze s rychlostí přenosu 500kbit/s. Ve standartu se počítá buď s implementací s pomocí vodičů nebo s přenosem informací v optických vláknech. Sběrnice CAN je tedy formou místní sítě, která umožňuje sdílení dat.

Pro použití v automobilech je potřeba zavést formu přednosti některých zpráv před ostatními, chtějí-li dvě jednotky poslat zprávu najednou. Nesmí se například stát, že požadavek změny nastavení klimatizace by měl přednost před některým kritickým signálem pro bezpečnost.

Struktura zpráv počítá s tím, že se přenášené informace na sběrnici stále opakují. To znamená, že obsah každé zprávy je znám, rozdíl mezi zprávami spočívá v rozdílných hodnotách veličin.

Subsystemy napojené na sběrnici CAN se ve specifikaci označují zkratkou ECU, ve smyslu electronic control unit. V práci je dále budu označovat slovem jednotka.

Každá připojená jednotka může v případě volné sběrnice vyslat zprávu standardního formátu. Taková zpráva začíná "start of frame" bitem, hned další je identifikátor, který specifikuje obsah zprávy a zároveň její prioritu. Identifikátor musí být unikátní pro celou síť, aby se jednotky mohly vždy rozpoznat.

Když je více jednotek připraveno vysílat zprávu, proběhne zde arbitráž, neboli rozhodování, jaká zpráva se odešle jako první. Identifikátor vysílají všechny jednotky najednou a sledují, co se děje na sběrnici. Arbitráž vyhrává jednotka která na sběrnici vždy viděla jen stejný stav, který sama vysílala. Matematicky tento proces dojde k tomu výsledku, že první se vždy odvysílá zpráva s nejnižším ID.

Další je ve zprávě informace o délce datového pole, které specifikuje délku od 1 až do 8 bajtů. Pak následuje správně dlouhé datové pole. Po datovém poli následuje CRC , který lze použít pro ověření správnosti všech přijatých bitů. Na konci zprávy je pole ACK , kde ostatní jednotky potvrdí vysláním dominantního bitu, že zprávu přijaly v pořádku a "end of frame" bit.

Sběrnice CAN je vhodná do automobilů, protože umožňuje přidávání nových subsystemů do funkční sítě bez její úpravy. Každý subsystem pak může být vylepšován opět bez ovlivňování zbytku sítě.

Fyzicky, CAN je pospojován dvojicí vodičů CAN_H a CAN_L, jejichž vzájemné napětí značí buď dominantní nebo recesivní stav sběrnice. CAN_H je udržován na prostřední napěťové úrovni při recesivním stavu a je hnán k pozitivnímu napájecímu napětí při dominantním stavu. CAN_L je podobně při recesivním stavu udržován na prostřední napěťové úrovni a při dominantním stavu je hnán směrem k zemi.

Recesivní stav je stav sběrnice, kdy napětí mezi CAN_H a CAN_L je přibližně 0. Recesivní stav reprezentuje logickou hodnotu 1. Naopak v dominantním stavu je rozdíl napětí mezi CAN_H a CAN_L vyšší, než minimální hraniční hodnota. Vysílá-li některá jednotka recesivní stav a některá stav dominantní, dominantní stav překoná recesivní stav a ostatní jednotky vidí, že bus je v dominantním stavu, reprezentujícím logickou 0.

CAN je schopný přenášet data mezi 2 až 24 jednotkami. Vzdálenost mezi dvěma nejbližšími jednotkami může být až 33m. Větev sběrnice vedoucí k další jednotce je ale délkově omezena na maximálně 5m. Na dvou koncích musí být CAN terminován 120Ω rezistory.

2.3.3 Revize sběrnice CAN

Existuje více revizí sběrnice CAN, první revize CAN1.0, později přejmenovaná na CAN2.0A se stále používá v menších sítích, pro větší sítě stejné rychlosti se používá CAN2.0B. Nejnovější revize je CAN FD.

Rozdíl CAN2.0A a 2.0B je v délce identifikačního pole, u CAN2.0A je dlouhé 11 bitů zatímco u CAN2.0B 29 bitů, což zvedá počet unikátních zpráv a tím i jednotek v síti. CAN FD umožňuje v datové fázi rámce zrychlit přenos a prodloužit datové pole z 8 na 64 bajtů.

CAN bus je vždy zpětně kompatibilní, ale není kompatibilní dopředu. [23]

2.3.4 CAN Kontroler

Pro splnění všech požadavků specifikace CAN se používá speciální hardware. Ten může být integrovaný do mikrokontrolerů, nebo může s řídicím systémem komunikovat přes nějakou další sběrnici, například SPI.

Tento hardware nazýváme CAN Kontroler. Jeho úkol je přijímat a odesílat zprávy podle specifikace CAN. Pro správné časování zpráv musí být CAN kontroler nastavitelný, při operaci musí svůj clock synchronizovat se zbytkem sběrnice. Dále obsahuje registry pro dočasné uchování nově příchozích a odchozích rámců. Další užitečný hardwarový prvek CAN kontrolerů jsou přijímací filtry, kterými kontroler třídí přijímané rámce. Ty, které pro jednotku nejsou důležité pak může rovnou zahodit, aniž by se jimi musel zabývat procesor. [19]

Vlastní kontroler pracuje s CAN sběrnici na obvyklých CMOS logických úrovních, s odděleným pinem pro příchozí a odchozí informace. Převedení takového signálu na diferenciální signál s recesivními a dominantními stavy zajišťuje transceiver.

2.3.5 CAN Transceiver

Transceiver, česky budič, je jednoduchý prvek, který má za úkol převést CMOS logické úrovně CAN kontroleru na diferenciální signál přenášený po sběrnici CAN. Další důležitá funkce je ochrana CAN kontroleru před zkraty CAN busu na vyšší napájecí napětí či zem.

Transceivery se v některých parametrech liší, zásadní rozdíly jsou v maximální rychlosti sběrnice a v napájecím napětí. Dále se mohou lišit například v spotřebě el. proudu, v pouzdru apod. Jako příklad uvádím tyto dva: [7]

SN65HVD232 Tento transceiver je výjimečný svojí operací s 3.3V napájecím napětím při zachování kompatibility s ostatními transceivery, které fungují při vyšším napájecím napětí. Jeho spotřeba elektrického proudu při operaci je také výrazně nižší. Maximální frekvence sběrnice je 1Mbit/s.

MCP2542FD Pro použití na sběrnici CAN FD je potřeba volit novější transceivery kvůli zvýšené rychlosti sběrnice. Výhodou MCP2542FD je rychlost až 8Mbit/s, nevýhodou je nutnost zajistit 5V napájecí napětí.

2.3.6 Řídící systém

Každá jednotka v síti CAN musí obsahovat hardware, který bude přijaté zprávy vyhodnocovat. To bývá nějaký programovatelný řídicí systému, například mikrokontroler nebo mikropočítač.

Rozdíl mezi mikrokontrolerem a mikropočítačem je v provedení. Mikrokontroler obsahuje stejné stavěcí prvky jako mikropočítač, rozdíl je v úrovni integrace, v případě mikropočítače mohou být některé jeho komponenty, typicky operační a stálé paměti, umístěny mimo hlavní pouzdro a jsou pak připojeny pomocí vodičů na PCB, zatímco u mikrokontroleru je vše, co mikrokontroler potřebuje k fungování, umístěno do jednoho pouzdra. [14]

Mikropočítač "Mikropočítač je takové uspořádání logických obvodů, umožňující vykonávat posloupnost povelů uložených v paměti podle vstupních hodnot a výsledky předávat na výstup." [26]

Mikropočítač má v zásadě stejné stavěcí prvky jako obyčejné počítače, rozdíl je ve velikosti. Existují dvě původní koncepce počítačů, a to von Neumannova a Harwardská.

Rozdíl těchto dvou koncepcí je v místě ukládání programu a operačních dat, von Neumannovský počítač ukládá veškerá data do jednoho adresního prostoru, nezávisle na tom k čemu jsou používána, zatímco počítače Harwardské používají oddělenou paměť pro program a pro operační data.

”Vznik mikropočítačů souvisí s rozvojem technologie výroby integrovaných obvodů, která zhruba v polovině sedmdesátých let minulého století dosáhla té úrovně, že bylo možné vyrobit na jednom čipu takové množství tranzistorů, že dostačovalo k realizaci obvodu, který v sobě obsahoval všechny základní bloky procesoru”[26]

Postupně s vývojem lepších způsobů výroby bylo možné do jednoho pouzdra dát více a více prvků. Takové prvky jsou například časovače, analogově digitální převodníky, komunikační rozhraní jako I2C, SPI, CAN a další.

”V současnosti je nejrozšířenější skupina 8 a 16 bitových mikropočítačů, setkat se však běžně můžeme i s 32 nebo 64 bitovými procesory. 8bitové procesory se dnes používají převážně jako náhrada jednoduchých sekvenčních nebo kombinačních automatů, případně jako procesory koncových zařízení rozsáhlejších systémů. 16bitové procesory můžeme nalézt v centrálních jednotkách PLC automatů řídicích výrobní stroje a linky, 32bitové se běžně používají v řídicích jednotkách automobilů a 64bitové jako DSP (Digital Signal Processing) procesory sloužící k digitálnímu zpracování analogových signálů obvykle v reálném čase.”

K rozšíření využití mikrokontrolerů vedlo to, že pomocí jednoho čipu je možné nahradit složité logické obvody nebo implementovat časově závislé funkce. Při použití mikrokontroleru je také možné při stejném rozložení plošného spoje měnit vlastnosti a parametry už hotového zařízení, a to i během jeho životního cyklu.

2.4 Další využití prvků

2.4.1 A/D převodník

Pro měření napětí v mikrokontrolerech se používá ADC. Existuje více konstrukcí A/D převodníků, každá konstrukce pak má své výhody a nevýhody. Nejrychlejší je A/D převodník přímý, který pomocí dlouhého děliče napětí s připojenými komparátory ihned nalezne nejnižší neaktivovaný komparátor a nejvyšší aktivovaný komparátor. Signál ze všech komparátorů poté zpracuje kodér, který jej převede na binární číslo. Nevýhodou tohoto typu ADC je jeho velikost, na získání n bitového rozlišení je potřeba, aby převodník obsahoval $2^n - 1$ komparátorů. To znamená, že přímé převodníky jsou velice drahé a tím pádem nepoužitelné ve většině aplikací. [26]

Další typ ADC je převodník komparační. Tyto převodníky pomocí komparátoru porovnávají neznámé naměřené napětí s nastavitelným napětím z DAC (D/A převodníku). Řídící obvod, který má schopnost měnit výstupní napětí DAC, pak metodou vyhledávání půlením intervalu nalezne, jaká nejmenší změna vstupu DAC ještě překlopí komparátor. Tato hodnota je potom výsledek A/D konverze.

Protože měření tímto typem převodníku trvá delší dobu, je potřeba zajistit, aby se měřené

napětí neměnilo. To zajišťuje obvod Sample and Hold, který měřeným napětím nabije kondenzátor, ve kterém je pak napětí udržováno po dobu konverze.

Komparační převodníky se obvykle používají v mikrokontrolerech.

Poslední typ ADC je převodník integrační, který funguje na principu měření doby nabíjení kondenzátoru.

2.4.2 Automobilové pojistky

V automobilech se pro nižší proudy nejčastěji používají nožové pojistky. Tyto pojistky jsou certifikovány pro napětí 32V, takže dostačují pro klasické 12V i novější 24V rozvody. [4]

Na obvyklé automobilové pojistky rozměru 19x4.5x20 se vztahuje norma ISO 8820-3. V normě jsou specifikovány jmenovité proudy, postupy testování, požadavky na operační parametry a rozměry. Pro tento model používá každý výrobce své vlastní označení, například ATOF, uniVAL a jiné. Barva plastového obalu pojistky vždy závisí na proudu, při kterém se pojistka přepálí. Tento druh pojistek se vyrábí pro jmenovité proudy od 1A až do 40A.

Další často používané pojistky nesou označení MINI. Vztahuje se na ně stejná norma, jako na obvyklé pojistky. Výhodou tohoto typu pojistky jsou menší rozměry 10.9x3.8x8.8, nevýhodou je, že se tento druh pojistky nevyrábí v tolika jmenovitých proudech, konkrétně chybí varianta 1A.

Pro jistění větších proudů se už používají pojistky s dírami na šrouby. Nejmenší z nich je série MIDIVAL, ta se vyrábí pro jmenovité proudy od 30 do 125A. Pojistka se pak usazuje šrouby velikosti M5, rozteč děr je 30mm.

Pro moderní automobilovou elektroniku využívající 48V pak existují nové řady pojistek nožových, certifikovaných pro napětí až 58V.

2.4.3 Spínání zátěží

V automobilových aplikacích je stále časté spínání pomocí relé. Výhodou relé je izolace ovládací a spínané strany.

Pro aplikace, kde je potřeba regulovat výkon spotřebiče je ale kvůli malé rychlosti spínání relé nutné použít polovodičové součástky. Často používaný polovodičový prvek pro spínání zátěží je v dnešní době tranzistor MOSFET. Jeho hlavní parametry jsou:

U_{DS}	Nejvyšší možné napětí mezi drain a source [V]
$U_{GS(th)}$	Napětí mezi hradlem a source, při kterém se už vytvoří vodivý kanál [V]
R_{DSOn}	Odpor v sepnutém stavu u tranzistoru MOSFET [$m\Omega$]
I_D	Nejvyšší možný proud tekoucí skrz drain u tranzistoru MOSFET [A]
Q_g	Celkový náboj hradla tranzistoru MOSFET [nC]
T_J	Nejvyšší možná teplota přechodu polovodičové součástky [$^{\circ}C$]

Podle typu polovodiče v kanálu tranzistoru MOSFET je dělíme na tranzistory MOSFET typu N, dále jen NMOS a tranzistory MOSFET typu P, dále jen PMOS. Největší rozdíl mezi NMOS a PMOS je z praktického hlediska polarita mezního napětí mezi hradlem a source. Aby se NMOS stal vodivým, musí být napětí mezi hradlem a source kladné. Protože při spínání zátěží v automobilu chceme, aby vypnutý spotřebič byl uzemněný, umísťujeme NMOS nad zátěž. Pak při vodivém stavu, kdy $U_{DS} \approx 0$ bude napětí source přibližně rovno napětí akumulátoru. To znamená, že k sepnutí NMOS potřebujeme zdroj vyššího napětí, než je napětí akumulátoru.

Naopak aby se PMOS stal vodivým, musí být napětí mezi gate a source záporné. Toho je v případě umístění PMOS na HS jednoduché dosáhnout, stačí hradlo PMOS připojit na zem, čímž získám napětí $U_{DS} \approx -U_{batt}$ [21][11][18]

3 Praktická část

3.1 Návrhový postup

Návrh jsem začal přesným popisem problému, ten je specifikován v úvodu práce. Abych znal přibližnou velikost výsledného produktu, potřeboval jsem nejdříve vybrat komponenty a sestavit elektronické schéma. Poté bylo potřeba najít pro jednotku vhodné místo v autě, určit rozložení PCB a vybrat konektory. Podle toho jsem se rozhodl, jaké budou technické parametry zvoleného PCB. Posledním krokem byl návrh PCB. U navrženého PCB jsem zkontroloval, jestli bude chlazení dostatečné, PCB jsem objednal a osadil všemi komponenty. Nakonec jsem navrhl vhodnou krabičku a vyvinul software.

3.2 Výběr komponentů

3.2.1 Mikrokontroler

Na trhu je dostupné velké množství různých mikrokontrolerů. Pro omezení výběru jsem se rozhodl, že nové mikrokontrolery používané ve formuli musí všechny podporovat nový protokol CAN FD, aby bylo při přechodu na tuto novější variantu možné zachovat starší jednotky. Protože stejný mikrokontroler chci používat i na další jednotky, které budou potřebovat číst data na sběrnici CAN ECU, je jeden z požadavků, aby mikrokontroler obsahoval dva CAN kontrolery. Pro aplikaci v pojistkové skříni dále potřebuji 16 kanálů ADC a 8 digitálních výstupů. Další výhodou je pouzdro vhodné pro ruční pájení.

STM STMicroelectronics je výrobce polovodičových součástek, ať už silových nebo i logických. Hlavní skupina mikrokontrolerů od ST nese označení STM32. Vyrábí se v mnoha řadách specializovaných buď na výpočty nebo na šetření energie. Ve stejné kategorii se ale mohou objevit produkty, které jsou od sebe oddělené deseti lety vývoje. Pro nový návrh

s úplně novým softwarem je vhodné využít nové rychlejší varianty, které mají většinou zároveň více periférií, ačkoliv se cena pohybuje na podobné úrovni. Mezi nejstarší řady mikrokontrolerů patří F10x, dále F40x, F70x. Řadu F10x používáme na starších týmových jednotkách. Nejnovější jsou řady G4x, G0x a L4x, kde G0x je optimalizovaná pro nízkou cenu, L4x je optimalizovaná na spotřebu a G4x je optimalizovaná pro výkon.

Protože se nejedná o aplikaci, kde by cena nebo rozumná spotřeba hrála roli, vybírám z řady G4, která poskytuje velké množství vstupů a výstupů, podporu pro nové CAN FD a 12 bitové ADC.

Při výběru se navíc omezují na mikrokontrolery jednoduše dostupné od více dodavatelů. Nakonec jsem vybral konkrétní model STM32G484RE, který měl všechny nutné periferie a vhodné malé pouzdro LQFP64.

Texas Instruments Texas Instruments je 7. největší výrobce polovodičových součástek na světě. Podobně jako ST vyrábí také logické a silové polovodiče, velkou část jejich portfolia ale tvoří analogové polovodiče. [25]

Z řad mikrokontrolerů, které by splňovaly požadavky na podporu sběrnice CAN FD, je vhodný například nový model TMS320F28384S z řady C2000.

Nevýhodou je větší pouzdro s 176 piny, které by šlo hůře ručně pájet. Cenově také vychází hůř než STM32G4 a je dostupný u méně distributorů.

Microchip Microchip je 20. největší výrobce mikrokontrolerů, parametry jejich mikrokontrolerů jsou velice podobné jako u STM32G4.

Jako příklad lze uvést mikrokontroler ATSAM4SD32B, který má dostatek CAN FD i ADC kanálů. Nevýhoda oproti STM32G4 je pouze v nižší maximální rychlosti procesoru a v nutnosti naučit se s novými vývojovými nástroji od Microchip místo už používaných STM32.[3]

3.2.2 Tranzistory MOSFET

Jedna z dalších funkcí chytré pojistkové skříně je softwarová nadproudová ochrana a ochrana akumulátoru vůči přílišnému vybití. Tyto požadavky znamenají, že mikrokontroler musí mít nějaký způsob, jak vypnout napájecího napětí spotřebičům. Pro tento účel jsem použil tranzistory MOSFET, kvůli standardnímu uspořádání v automobilech je vhodné spínat zátěž na HS, viz. Obr. 5, aby napětí země bylo v celém autě stejné a měnilo se pouze napájecí napětí.

Pro spínání na HS mohou použít jak PMOS tak NMOS, jejich zapojení ale bude odlišné. Parametry NMOS jsou pro aplikaci spínání obvykle lepší než PMOS. Hlavní rozdíl je v parametru R_{DSOn} . [27]

Pro vyčíslení tohoto rozdílu jsem na stránkách dodavatele vybral dva cenově srovnatelné tranzistory MOSFET, které měly až na typ polovodiče kanálu všechny parametry stejné. [22][24]

Výrobce:	ST	Vishay
Model:	STD110N8F6	SUD50P08-25L
$U_{DS}[V]$	80	-80
$U_{GS(th)}[V]$	4.5	-3
$R_{DSOn}[m\Omega]$	6.5	25.2
$I_D[A]$	80	-50
$Q_g[nC]$	150	105
$T_J[^\circ C]$	175	175

Tab. 1: Srovnání PMOS a NMOS s podobnými parametry

Veliký rozdíl při použití NMOS místo PMOS je tedy ve vodivém odporu, NMOS jej má přibližně čtvrtinový.

V projektu používám 7 tranzistorů MOSFET, které mají pouze funkci vypnutí/zapnutí určitých větví. Protože tyto tranzistory svůj stav po původním nastavení téměř nemění, budu při výpočtu ztrát počítat pouze s jejich vodivou složkou.

$$P = R_{DSOn} \cdot I_D^2 \quad (1)$$

P	Ztrátový výkon na tranzistoru MOSFET [W]
R_{DSOn}	Odpor v sepnutém stavu u tranzistoru MOSFET [$m\Omega$]
I_D	Proud tekoucí skrz tranzistor MOSFET [A]

Při výběru těchto 7 tranzistorů MOSFET jsem se omezil na pouzdro TO252, které rozložením vývodů a šířkou vycházelo zástavbově nejlépe. Pouzdro je také dostatečně veliké na to, aby uchládilo případný ztrátový výkon.

Pro variantu s PMOS bude u nejzatíženějšího kanálu Jouleovo teplo (z Eq. 1) činit $P = 0.0252 \cdot 5^2 = 0.63W$, oproti možnosti s NMOS, kdy to bude: $P = 0.0056 \cdot 5^2 = 0.14W$.

Rozdíl v ztrátovém výkonu je čtyřnásobný, použití NMOS tedy má smysl.

Pro ovládání NMOS by bylo potřeba na plošný spoj navíc umístit obvod, který by vytvářel napěťovou větev vyššího napětí než U_{batt} . Tento obvod by pak zabíral místo na PCB a prodlužoval vývoj. Spolehlivost takového systému by z důvodu více použitých součástek také byla nižší, což je u motorsportové aplikace důležitější parametr než ztrátový výkon. Protože je celková plocha PCB velká, není nárůst ztrátového výkonu o 0.5W tak veliký problém, proto jsem se rozhodl pro variantu s PMOS.

Do pojistkové skříně je přímo zapojená i palivová pumpa. Ta byla vybrána podle hmotnosti a dosaženého tlaku paliva. Protože má ale formule nízkou spotřebu, nevyužíváme vysoký průtok paliva touto pumpou.

Proto byl další z požadavků návrhu pojistkové skříně také regulace výkonu jdoucího do palivové pumpy, abychom omezili množství paliva, které se přes redukční ventil vrací zpět do nádrže.

Výkon regulujeme pulzně šířkovou modulací, kdy výkon palivové pumpy omezím tím, že ji nebudu napájet stále, ale pouze procento z celkového času. PMOS tedy budu používat k regulaci proudu, proto bylo potřeba spočítat dynamické ztráty.

Ze starších naměřených dat a z charakteristiky pumpy vyplývá, že proud pumpou bude pro požadovaný tlak alespoň 8A. Z důvodu bezpečnosti výpočet provedu pro proud 12A. Kdybych použil stejný PMOS jako pro ostatní kanály, byly by ztráty při takové zátěži:

$$P = 0.0252 \cdot 12^2 = 3.62W \text{ z Eq. 1}$$

$$\Delta T = R_{th} \cdot P \quad (2)$$

ΔT Rozdíl teplot na stranách oddělených tepelným odporem [K]

R_{th} Tepelný odpor [K/W]

P Výkon který je potřeba uchladiť [W]

Takový výkon v pouzdru TO262 ($R_{thj-A} = 40K/W$) bez aktivního chlazení způsobí teplotu přechodu: $\Delta T = 3.62 \cdot 40 = 145^\circ$, (z Eq. 2) což přesahuje limit ($T_j = 175^\circ C$) už při teplotě prostředí $30^\circ C$.

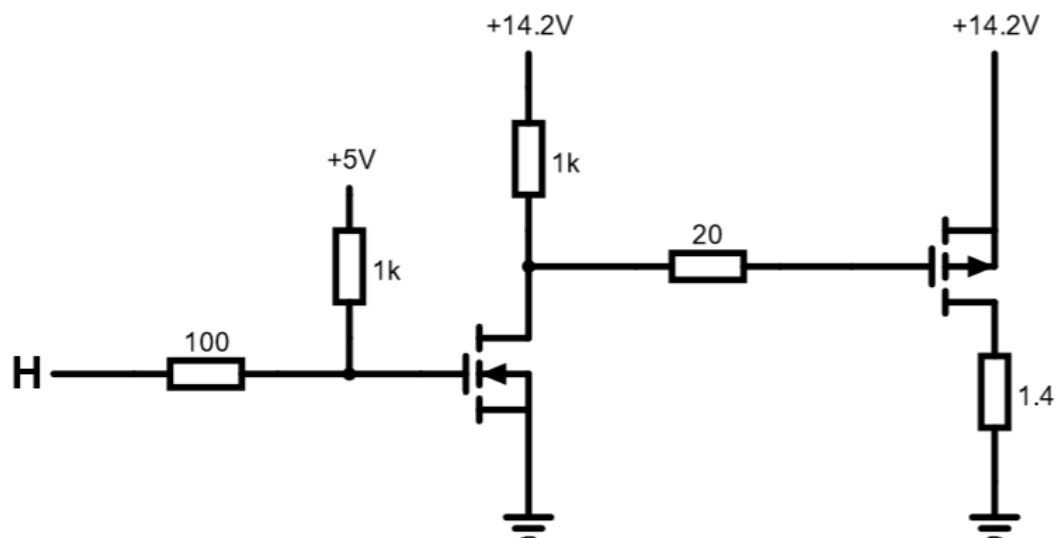
Proto jsem zvolil fyzicky větší PMOS SQM110P06-8m9L, v pouzdru TO263, který má přibližně třetinový vodivý odpor v sepnutém stavu.

Výrobce k pumpě neposkytuje detailnější parametry, proto vycházím z obvykle využívaných frekvencí, které se pohybují kolem 1 kHz. [9]

Pro řízení PMOS je potřeba zesílit a převrátit výstupní signál z mikrokontroleru. Pro tento účel jsem použil tranzistorový zesilovač.

Doba zapnutí a vypnutí záleží na proudu báze, který zase závisí na vstupních odporech. Při zapínání nepoužívám kvůli komplexnosti komplementární pár, proto bude doba vypnutí delší než doba zapnutí. Pro výpočet dob použiji zjednodušený vztah: [12] [13]:

$$t_r = \frac{Q_g \cdot R_g PD}{U_g} = \frac{130 \cdot 10^{-9} \cdot 20}{14.2} = 1.8 \cdot 10^{-7} s \quad (3)$$



Obr. 6: Použitý zesilovač

- t_f Rise time, čas pro otevření PMOS [s]
 Q_g Celkový náboj hradla [nC]
 R_g Odpor mezi hradlem a zdrojem napětí [Ω]
 U_g Napětí, kterým nabíjíme hradlo [V]

$$t_f = \frac{Q_g \cdot R_g}{U_g} = \frac{130 \cdot 10^{-9} \cdot 1020}{14.2} = 9.34 \cdot 10^{-6} s \quad (4)$$

- t_f Fall time, čas pro uzavření PMOS [s]
 Q_g Celkový náboj hradla [nC]
 R_g Odpor mezi hradlem a zdrojem napětí [Ω]
 U_g Napětí, kterým nabíjíme hradlo [V]

$$P_D = U_{GS} \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot (t_r + t_f) = 14.2 \cdot 12 \cdot 1000 \cdot 9.52 \cdot 10^{-6} = 1.62W \quad (5)$$

- P_D Dynamické ztráty [W]
 U_{DS} Napětí mezi drain a source v uzavřeném stavu [V]
 I_D Proud drainem v otevřeném stavu [A]
 f_{sw} Frekvence spínání PMOS [Hz]
 t_f Rise time, čas pro otevření PMOS [s]
 t_f Fall time, čas pro uzavření PMOS [s]

(EQ. 6)

$$P_c = I_{out}^2 \cdot R_{GS} = 12^2 \cdot 0.0089 = 1.28W \quad (6)$$

Ztráty dynamické jsem vypočítal vyšší než ztráty vodivé, ve skutečnosti bychom ale nepoužívali vysoký pracovních cyklus PWM, což by vedlo ke snížení vodivých ztrát, takže

by se dominantní složkou staly ztráty dynamické. podíl vodivých ztrát klesá s klesajícím pracovním cyklem

3.2.3 Držáky pojistek

Hlavní parametr výběru držáku pojistek je typ pojistky a rozměry držáku. Jako typ pojistky jsem se rozhodl použít standartní pojistky, protože jsou jednoduše dostupné a do standartně velkých držáků pojistek lze vložit mini pojistku, naopak nikoliv. Zvolený model držáku se označuje 178.6164.0001. Ten oproti jiné jednoduše dostupné konkurenci zabíral na PCB nejméně místa.

3.2.4 Relé

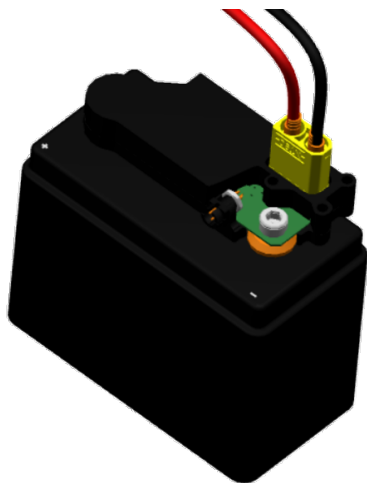
V autě používáme už na jiných jednotkách relé CP1-12V. Zvládají proud až 20A, což je pro palivovou pumpu i vstřikovače dostatečné. Další relé se používá pro řídicí jednotku motoru, která má odběr proudu nižší. Svými malými rozměry vyhovuje CP1-12V i pro tuto aplikaci.

3.2.5 Diody

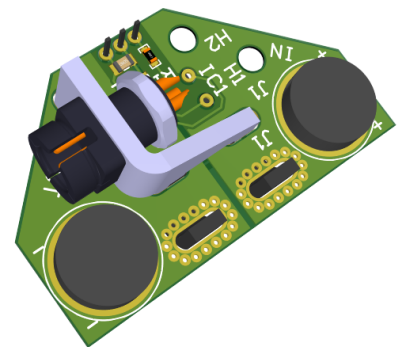
je nutné chránit vůči přepětí nastávající po přerušení proudu cívkou. Zvolil jsem řešení s antiparalelní Shottkyho diodou, kvůli vysoké spínací rychlosti. V automobilech se často používá válcové pouzdro minimelf, které má lepší vlastnosti z hlediska zbavování se tepla a tím pádem i spolehlivosti. Proto volím diodu BAT43.

3.3 Senzory proudu

3.3.1 Hall effect



Obr. 7: Uchycení senzoru proudu na baterii



Obr. 8: Externí senzor proudu

Pro měření proudu na silových větvích jsem vybral na baterii oboustranný senzor ACS770LCB-050B-PFF-T a pro měření proudu z alternátoru ACS770LCB-050U-PFF-T. Každý senzor potřeboval PCB. PCB akumulátoru obsahuje pevně uchycený konektor XT90 a úchyt na pojistku typu MIDIVAL. Tuto pojistku jsem vybral, protože terminály akumulátoru mají také závit M5, tím pádem umístěním pojisky mezi baterii a PCB ušetřím jeden měděný díl s vnitřním závitem pro usazení pojisky.

PCB pro alternátor a aktivní aerodynamické prvky se připojuje do obvodu pomocí oček na závit M5.

3.3.2 Proud snímající zesilovače

Při výběru proud snímajícího zesilovače jsem volil mezi nabídkami od firem OnSemiconductor a Texas Instruments. Proud snímající zesilovače od Texas Instruments mají výhodu přesnosti, v nabídce jsou modely s vestavěným bočníkem nebo i s modulem pro komunikaci přes I2C, pro vyšší odolnost signálu a menší nároky na mikrokontroler. Nakonec jsem ale kvůli automobilové certifikaci, dostatečnému common mode napětí, příznivé ceně, dostupnosti a malému pouzdru zvolil NCV210RSQT2G. Tento zesilovač umístím v blízkosti ke každému bočníku, což mi ulehčí práci při návrhu PCB.

3.3.3 Bočníky

Ve formuli máme 9 kanálů, kde je užitečné měřit proud. Používané kanály jsou uvedeny v tab. 2.

Měřený rozsah mikrokontrolerem: $U_{max} = 3300mV$

Rozlišení analogově digitálního převodníku: $N = 4096$

Výpočet nejvyššího měřitelného úbytku napětí na bočníku zvoleným mikrokontrolerem při daném zesílení:

$$\Delta U_{max} = \frac{U_{max}}{\alpha} \quad (7)$$

ΔU_{max} Nejvyšší možný úbytek napětí na bočníku, který je stále měřitelný [mV]

U_{max} Měřicí rozsah A/D převodníku [mV]

α Zesílení zvoleného proud snímajícího zesilovače [-]

Výpočet ideální hodnoty bočnicku:

$$R_{calc} = \frac{U_{max}}{\alpha \cdot I_{max}} \quad (8)$$

R_{calc}	Hodnota bočníku s nejlepší přesností měření ve zvoleném rozsahu. [$m\Omega$]
U_{max}	Měřicí rozsah A/D převodníku [mV]
α	Zesílení zvoleného proud snímajícího zesilovače [-]
I_{MSH}	Nejvyšší proud, který je na daném kanálu možno naměřit [A]

Kanál	Gain	$\Delta U_{SH}[mV]$	$I_{MSH}[A]$	$R_{calc}[m\Omega]$	$R_{ch}[m\Omega]$	$\Delta P_{SH}[W]$
Datalogger	200	16.5	4	4.125	4	0.064
Telemetrie	200	16.5	1.5	11	10	0.0225
Shutdown circuit	200	16.5	0.5	33	33	0.008 25
Jednotka motoru	200	16.5	4	4.125	4	0.064
Malé spotřebiče	200	16.5	4	4.125	4	0.064
ETC	200	16.5	5	3.3	1	0.025
Zapalování	200	16.5	4	4.125	4	0.064
Palivová pumpa	200	16.5	20	0.825	1	0.4
Řazení	200	16.5	2	0.825	4	0.04

Tab. 2: Zvolené hodnoty bočniců

3.4 Návrh PCB

3.4.1 Technologické parametry PCB

Před návrhem PCB je nutné správně nastavit vývojové prostředí podle parametrů výrobce, který specifikuje minimální velikosti děr a vzdálenosti mezi vodiči.

Protože jednotka se nebude vyrábět ve velkém množství, zvolil jsem technologii dvojvrstvého plošného spoje, u kterého bude případně jednodušší chybné spojení přerušit a předělat.

Další parametr výroby PCB je tloušťka mědi. Vzhledem k silové povaze zařízení je vhodné mít tuto vrstvu pro snížení Jouleových ztrát co největší, velká většina vyráběných plošných spojů ale vystačí s minimální tloušťkou vrstvy mědi, což vede k výrazně nižší ceně a rychlejšímu doručení u takových desek. Větší tloušťka má také omezený vliv na chlazení aktivních prvků[6], proto jsem nakonec zvolil obvyklou konfiguraci, kde je vrstva mědi tlustá $35 \mu m$. [8]

3.4.2 Konektory

Při výběru hlavního konektoru jsem hledal takový, který by měl pro velký počet pinů kompaktní rozměry, byl by cenově dostupný a prodával se v pravoúhlém provedení. Tyto požadavky nakonec splnily konektory z řady AMP superseal 1.0. Jsou stavěné na 15A, což je dostatečné pro každý jednotlivý spotřebič, všechny dohromady by ale mohly kapacitu jednoho pinu překonat, proto pro napájení používám piny tři.

Nevýhody konektoru AMP superseal 1.0 jsou nechráněné vodiče vedoucí do konektoru a skutečnost, že většina pinů je oproti potřebné proudové kapacitě předimenzovaná.

Na straně pumpy používám konektor ATM13-2P-BM04. Je kompatibilní s řadou DTM, se kterou se dobře pracuje.

Obě pojistkové skříně musí být chráněny vůči vniku tekutin.

Zatěsnění konektoru pumpy je řešeno už na těle konektoru, které obsahuje těsnící silikon který se pomocí dvojice šroubů do plastu přimáčkne na krabičku.

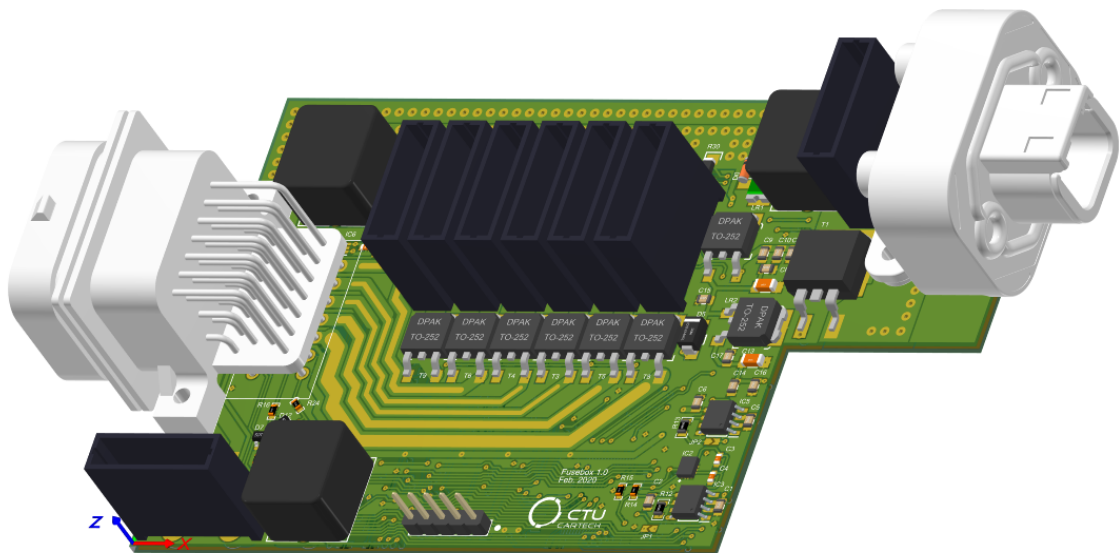
Zatěsnění hlavního AMP superseal konektoru se musí vyřešit na krabičce pomocí více dílů, které co nejvíce vyplní drážku na těle, zbytek místa jsem vyplnil silikonem, výměna pojistek je stále možná i s předním panelem trvale připevněným k PCB.

3.4.3 Rozměry

Rozvržení pcb vycházelo z dostupného místa v autě a z šířky konektorů. 6 stejných proudových kanálů jsem umístil doprostřed PCB tak, aby se rozložení mohlo opakovat. Jediný rozdíl mezi těmito kanály je protékající proud, proto má každý z kanálů rozdílnou šířku vodiče ke konektoru.

Hlavní vedení napětí z akumulátoru má šířku 7 mm a je vedeno na obou stranách desky pro lepší odvádění ztrátového tepla, podobně je vedena i silová zem pro palivovou pumpu.

Všechny vodiče, u kterých je očekáván větší proud mají odstraněnou pájecí masku, při výrobě je pak jejich proudová kapacita navýšena přidáním tlustší vrstvy cínu.



Obr. 9: Hotové PCB

3.4.4 Chlazení

Ještě v návrhové fázi je nutné zajistit, že se deska nepřehřeje. Pro teplotní výpočty v elektronice funguje analogie mezi zákonem přenosu tepla a ohmovým zákonem. [26] [Eq. 2]

Pojistková skříň bude umístěna v utěsněném prostoru, který sdílí jednu stěnu s výfukem, proto musíme počítat s maximální teplotou prostředí 60 stupňů Celsia.

Nízký profil spodní strany PCB byl jeden z návrhových požadavků, proto vyšlo pro oba lineární regulátory místo u relé a mosfetu pro palivovou pumpu. Toto místo bude tepelně nejvíce zatěžováno, proto je potřeba se mu zvlášť věnovat.

Při výpočtu ztrátového tepla počítáme s $U_{batt} = 14.2V$, tedy s napětím plně nabitého čtyřčlánkového akumulátoru typu LiFePo4. Plně nabitý akumulátor zvyšuje ztrátový výkon na lineárních regulátorech, které pak musí zmařit více napětí. Při plně nabité baterii budou také nejvyšší proudy všemi spotřebiči, které se chovají přibližně ohmicky, jako jsou například stejnosměrné motory.

3.3V		5V		12V	
Spotřebič	I[mA]	Spotřebič	I[mA]	Spotřebič	P[W]
CSA	0.072	MCP(DOM)	55	Relé	0.64
STM32	30	ACS770	12	ETC PMOS	0.63
Akcelerometr	0.65	MCP(REC)	5	Fuel PMOS	2.9
Celkem	30.7	Celkem	72	Bočníky	0.17
P celkem[W]	0.334	P Celkem[W]	0.662	P Celkem[W]	4.34
Všechny blízké spotřebiče dohromady				5.336 W	

Tab. 3: Vypočítaný celkový ztrátový výkon

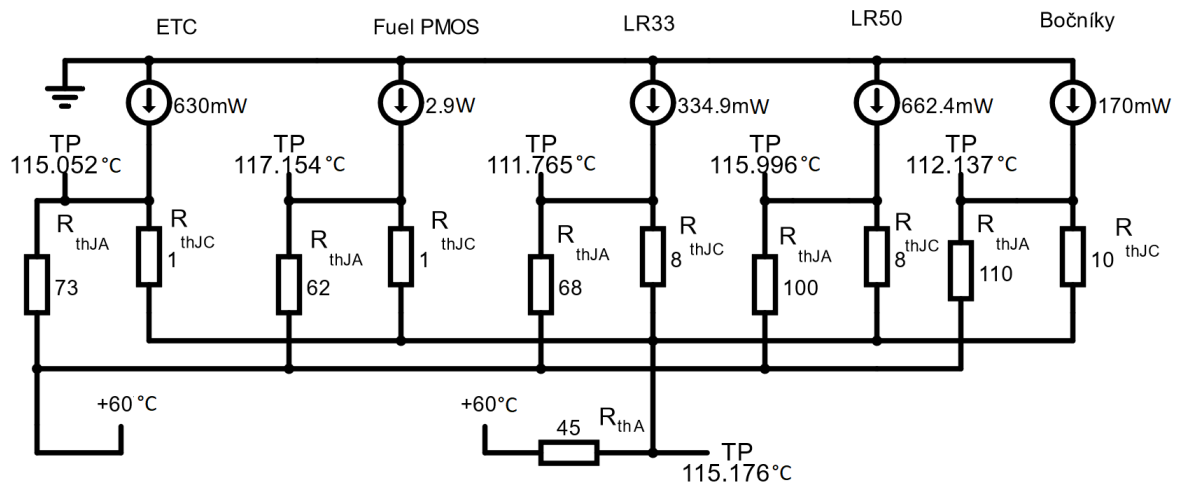
Výpočet chlazení: Protože jsou teplo generující součásti blízko u sebe, musím výpočtem pokrýt i přenos tepla mezi nimi. Výpočet provádím s pomocí tepelných odporů $R_{th,JA}$ a $R_{th,JC}$. Počítám, že každé pouzdro se svým povrchem zbavuje určité části tepla, což tvoří většinu chlazení. Přebytné teplo pak postupně ohřívá PCB, ve kterém je poté měděnými vrstvami vedeno dál od místa vzniku, až se opět ztratí v okolním vzduchu.

Do prostoru PCB ohraničující součásti produkující nejvíce tepla lze vepsat kruh průměru 75mm obsahu 4415mm². Tepelný odpor PCB vůči vzduchu je pak stanoven integrálem, výsledkem je hyperbolická funkce. Pro takový kruh dostanu přibližný tepelný odpor na vzduch 45 K/W. [6]

$R_{th,JA}$ Tepelný odpor přechodu vůči okolnímu vzduchu [K/W]

$R_{th,JC}$ Tepelný odpor přechodu vůči pouzdru [K/W]

$R_{th,A}$ Tepelný odpor účinné plochy plošného spoje vůči vzduchu [K/W]



Obr. 10: Teplotný obvod

Výsledné teploty přechodů a PCB jsem počítal s pomocí elektronického simulačního software. Ztrátový výkon je reprezentován zdrojem konstantního proudu, klasický odpor reprezentuje teplotní odpor a zdroje napětí reprezentují konstantní teplotu.

Teplota PCB vyšla 115°C. To je velice blízko limitní teplotě lineárních regulátorů ($T_j = 125^\circ\text{C}$). Tuto teplotu ale lineární regulátor v simulaci nepřekročí a ustálí se na teplotě 116°C. Tím, že výpočet vychází z nejhorších možných proudů všemi kanály i lineárními regulátory by mohl skutečný výsledek dopadnout lépe, než dopadla simulace.

V případě špatného výsledku na skutečném výrobku je možnost nahradit použité PMOS modely jinými, dimenzovanými na nižší U_{DS} . Takové PMOS mají obvykle lepší $R_{DS(on)}$. Další varianta jak snížit ztráty by byla snížení frekvence motoru, případně snížení hodnoty rezistorů chránících hradlo PMOS palivové pumpy.

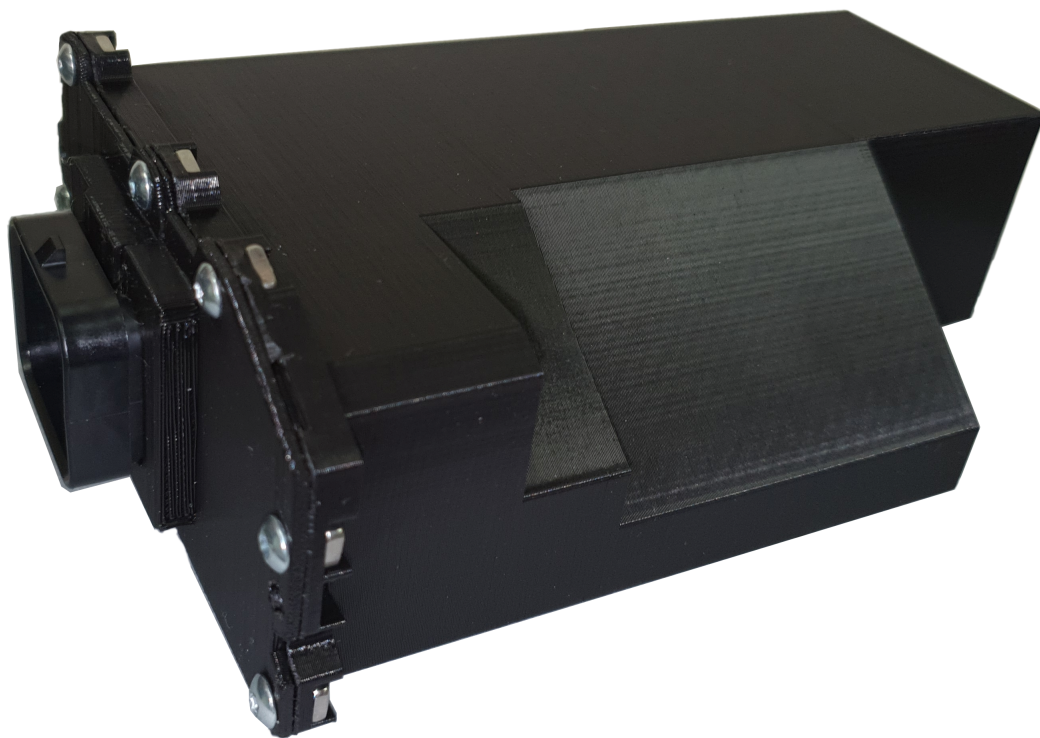
3.4.5 Krabíčka

Pro usazení jednotky byla zvolena tištěná krabíčka z plastu. Výhodami jsou jednoduchá výroba a možnosti složitých tvarů. PCB přední pojistkové skříně se dostane až na 110°C, proto jsem zvolil materiál PC blend.

Zadní pojistková skříně je umístěna přímo na motoru, kde se při běhu teplota vystoupá až k 120 stupňům, proto zde také volím PC blend, který má lepší odolnost vůči vysokým teplotám.

3.4.6 Změny

Na plošných spojích se vyskytlo pár chyb, které bylo nutné manuálně opravit. Největší chyba se stala u mikrokontroleru, v návrhu totiž nebyl vůbec zapojený pin přivádějící do mikrokontroleru referenční napětí pro ADC, výsledek každé konverze tak byl samé jedničky. Po zapojení tohoto pinu na 3V začalo ADC měřit správně.



Obr. 11: Krabice s pojistkovou skříní

Další problém byl s vývodem referenčního napětí pro externí proudové senzory, původní návrh počítal se senzory stavěnými na referenční napětí 3.3V, ty ale nakonec nebyly k sehnání, proto bylo potřeba na plošném spoji změnit referenční napětí pro tyto senzory z 3.3V na 5V.

U zadní pojistkové skříně se nemyslelo na vstup referenčního napětí pro relé ventilátorů, které musí být připojeno na větev napájecí jednotky motoru, protože po vypnutí větve napájecí řídicí jednotky motoru získají výstupy řídicí jednotky schopnost přijímat proud, tudíž bez referenčního napětí se zadní ventilátory zapnuly vždy, když byla řídicí jednotka pilotem vypnuta.

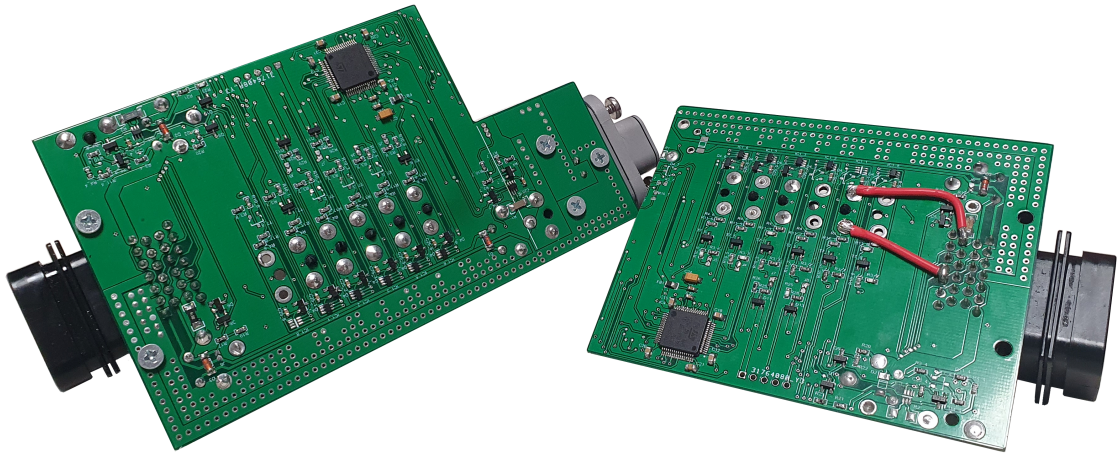
3.5 Software

3.5.1 Programování mikrokontrolerů

Při programování mikrokontrolerů je podobně jako u počítačů možnost použít vyšší programovací jazyky a tím celý vývoj urychlit.

Mezi zjednodušující nástroje patří například CircuitPython, mbed, Arduino atd.

Nevýhodou těchto nástrojů je horší konfigurovatelnost přesných parametrů různých periférií, ať už se jedná o časování CAN bitů nebo rychlosti konverze analogově digitálního



Obr. 12: Vyrobený přední a zadní fusebox

převodníku.

Úplně nejbližší k hardwaru se programátor dostane při programování s pomocí registrů. V tom případě se každá periferie mikrokontroleru musí manuálně zapnout s pomocí nastavení správných konfiguračních bitů do ovládacích registrů podle referenčního manuálu[19].

Řešení někde mezi těmito dvěma je použití knihoven HAL od výrobce. Ty převážně sjednocují nastavování, zapínání a interakci s periferiemi do větších funkcí. Přitom se ale zachová plná nastavitelnost všech parametrů periferií mikrokontroleru.

3.5.2 Použité nástroje

Vývojové prostředí Pro vývoj softwaru jsem použil vývojové prostředí Keil. To je dostupné zdarma s limitací velikosti kódu.

Keil urychluje vývoj softwaru možností ve stejném programu stavět, nahrávat a ladit napsaný kód. Mezi další hojně využívané funkce patří hledání definic funkcí a automatické doplňování textu při programování.

Verzování Při vývoji jsem použil nástroj git. Pomocí něj je možné po každé změně v kódu vytvořit commit, do kterého je možné napsat, za jakým účelem byla daná změna provedena. V případě problémů s některou funkcí se pak lze jednoduše vrátit zpět na původní verzi nebo dohledat, v jaké části kódu nastala chyba. Další výhodou je, že tímto přístupem k vývoji kódu je možné, aby na projektu spolupracovalo více lidí. Každý přispěvatel do git repozitáře může pracovat na různých nezávislých částech, ale výsledkem bude kompletní program.

Lazení kódu Programování se velice urychlí, má-li programátor možnost přímo nahlédnout do paměti a ovládat běh programu, když už je mikrokontroler v obvodu. STM32 používají pro tento účel rozhraní SWD (serial wire debug). Jeho dva signálové vodiče,

napájení a zem je ve formuli přístupná bez nutnosti cokoliv rozebírat, což umožňuje nahrát nový software nebo diagnostikovat závady v jakémkoliv stavu auta.

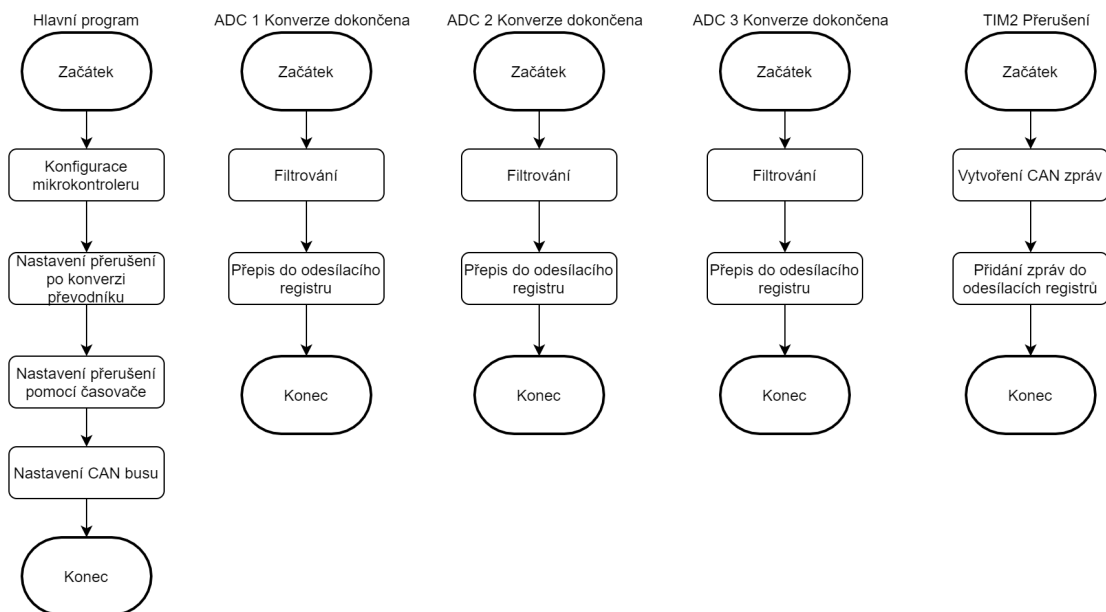
3.5.3 Vlastní software

Nastavení periférií Software pro měření dat musí shromáždit data ze všech senzorů, data zpracovat a poté vyslat po sběrnici CAN do zaznamenávající jednotky. Protože mikrokontroler měří napětí pomocí analogově digitálního převodníku na 16 kanálech, není účinné používat pro každý kanál blokující kód, je lepší používat přerušeni.

Dalšího zjednodušení softwaru dosáhneme s použitím DMA (přímého přístupu do paměti). STM32 mikrokontrolery umožňují, aby analogově digitální převodník po dokončení převodu sám do operační paměti zapsal výsledek činnosti procesoru.

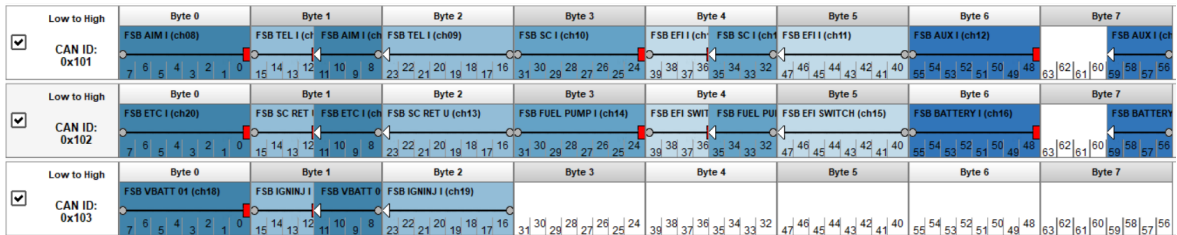
Protože používaná zaznamenávající jednotka umožňuje ze sběrnice ukládat pouze s vzorkovací frekvencí 100Hz, není nutné odesílat zprávy po každé konverzi, pro zvýšení přesnosti lze měřit hodnotu kanálu víckrát, naměřené hodnoty zprůměrovat a odeslat pouze s danou frekvencí.

Pro uchování informací o čase při odesílání zpráv je vhodné použít časovač v módu přerušeni. Časovač jsem nastavil tak, aby se každých 10 ms přerušil běžící kód a odeslal přes CAN bus zprávu s nejnovějšími naměřenými hodnotami. Tím pádem se program vždy věnuje buď právě dokončenému převodu z převodníku nebo odesílá zprávy. V případě, že konverze ještě nejsou dokončeny a zpráva byla odeslána nedávno, mikrokontroler pouze čeká, což je výhodné pro spotřebu.



Obr. 13: Diagram softwaru

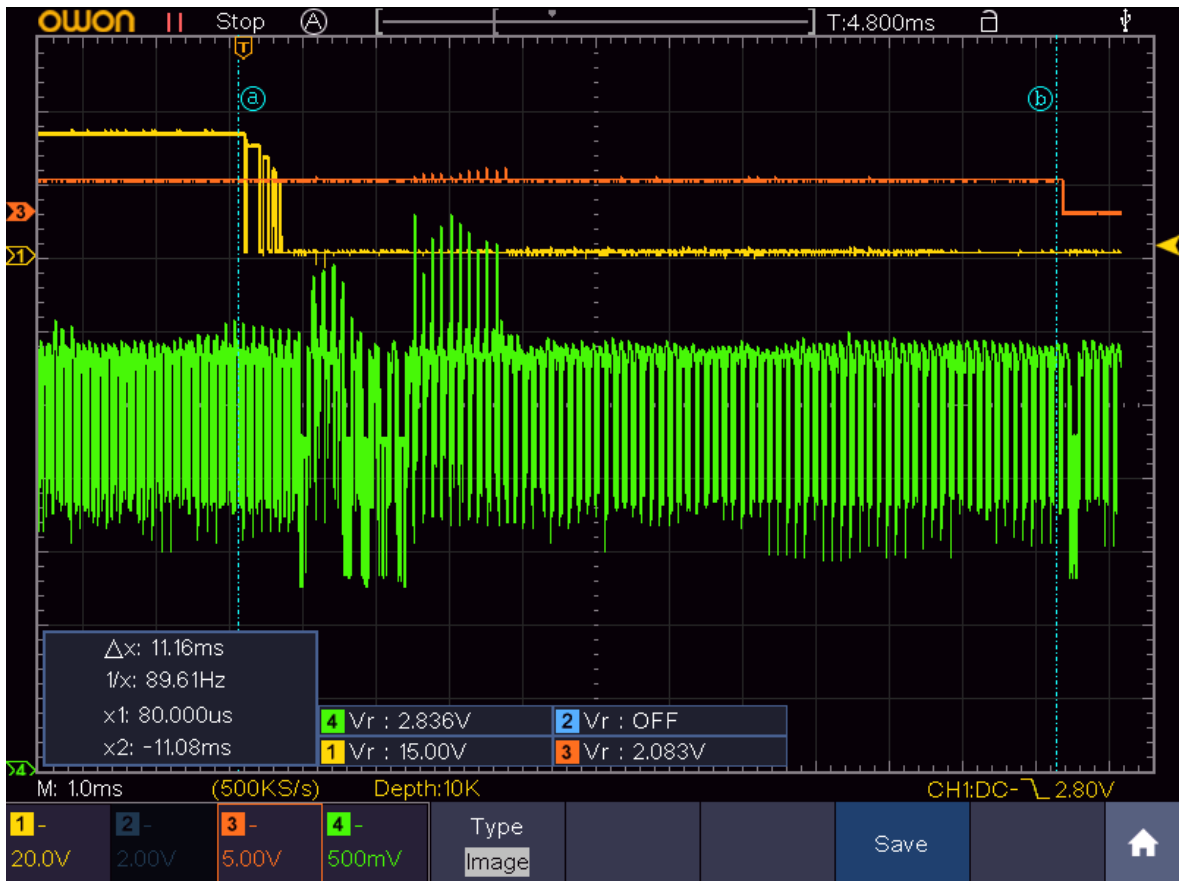
Nastavení a validace komunikace Použitý mikrokontroler měří s rozlišením 12 bitů. Dorazí-li přerušení z časovače, program vytvoří 3 CAN rámce se strukturou viz Obr. 14



Obr. 14: Odesílané rámce

Do každého rámce lze umístit pět 12 bitových hodnot. Pro naskládání informací do správných bajtů v CAN rámci byly použity bitové operace.

Po nastavení sběrnice CAN bylo nutné se ujistit, že rámce z volantu mají skutečně prioritu před rámci z pojistkové skříně.



Obr. 15: Výstup z osciloskopu

Při měření byl 4. kanál osciloskopu připojený na CAN_H, 1. kanál na tlačítku volantu a 3. kanál na výstupu řadič jednotky.

V softwaru pojistkové skříně nebyl nastavený časovač zpráv, registr odchozích zpráv se plnil rychleji než je CAN controller stíhal odesílat, sběrnice tedy byla plně vytížena. Po stisknutí

tlačítka a jeho ustálení je vidět, že jednotka volantu vyhrála arbitraci odeslala 4 rámce, tak jak je naprogramovaná. Rámce lze z obrázku rozpoznat podle napěťových úrovní, jednotka volantu totiž používá transceiver napájený napětím 3.3V. Identifikátor rámce z pojistkové skříně byl 0x100, identifikátor rámce volantu je 0x11.

3.6 Naměřená data

Nakonec jsem plně zprovoznil pouze přední pojistkovou skřín, díky měření proudu na baterii je ale možné spočítat spotřeby i bez přímého snímání proudu do ventilátorů, z regulátoru a z aktivních prvků aerodynamiky.

V této tabulce uvádím vždy předpokládanou spotřebu daného kanálu a konečnou spotřebu odečtenou z naměřených dat.

Měřitelný rozsah

$$I_{range} = \frac{\Delta U_{SH}}{R_{ch}} = \frac{U_{max}}{R_{ch} \cdot \alpha} \quad (9)$$

I_{range}	Maximální hodnota proudu, kterou může navržený obvod naměřit [A]
ΔU_{SH}	Nejvyšší možný úbytek napětí na bočniku, který je stále měřitelný [mV]
R_{ch}	Vybraný bočník ze standardní řady rezistorů [$m\Omega$]
α	Zesílení zvoleného proud snímajícího zesilovače[-]
U_{max}	Měřicí rozsah A/D převodníku [mV]

$$I_{res} = \frac{\Delta U_{adc}}{R_{ch}} = \frac{U_{max}}{N_{adc} \cdot R_{ch} \cdot \alpha} \quad (10)$$

I_{res}	Nejmenší hodnota proudu, kterou může navržený obvod měřit [A]
U_{max}	Měřicí rozsah A/D převodníku [mV]
N_{adc}	Počet možných výsledků konverze A/D převodníku [-]
R_{ch}	Vybraný bočník ze standardní řady rezistorů [$m\Omega$]
α	Zesílení zvoleného proud snímajícího zesilovače [-]

Analýzu naměřených dat je možné provádět v programu Race Studio, kde je možné naměřené hodnoty z pojistkové skříně zobrazit v souvislosti s ostatními jízdními daty. Jako příklad uvedu možnost změřit, při jakém tlaku brzdové kapaliny se už rozsvěčí brzdové světlo, jestli se při stisknutí tlačítka řazení sepnul pneumatický ventil a podobné. Informace o proudu z akumulátoru je užitečná pro výpočet dojezdu v případě, že by alternátor nestačil na

Kanál	Rozlišení [mA]	Rozsah [A]	Očekávaný I [A]	Nej. Skut. I [A]
Datalogger	1	4.125	2	0.640
Telemetrie	0.4	1.65	2	0.930
Shutdown circuit	0.1	0.5	1	0.087
Jednotka motoru	1	4.125	2	1.47
Malé spotřebiče	1	4.125	1	2.820
Elektronická klapka	4	16.5	5	0
Zapalování	1	4.125	2	3.2
Palivová pumpa	4	16.5	10	12.3
Akumulátor	30	±50	> 50	-50

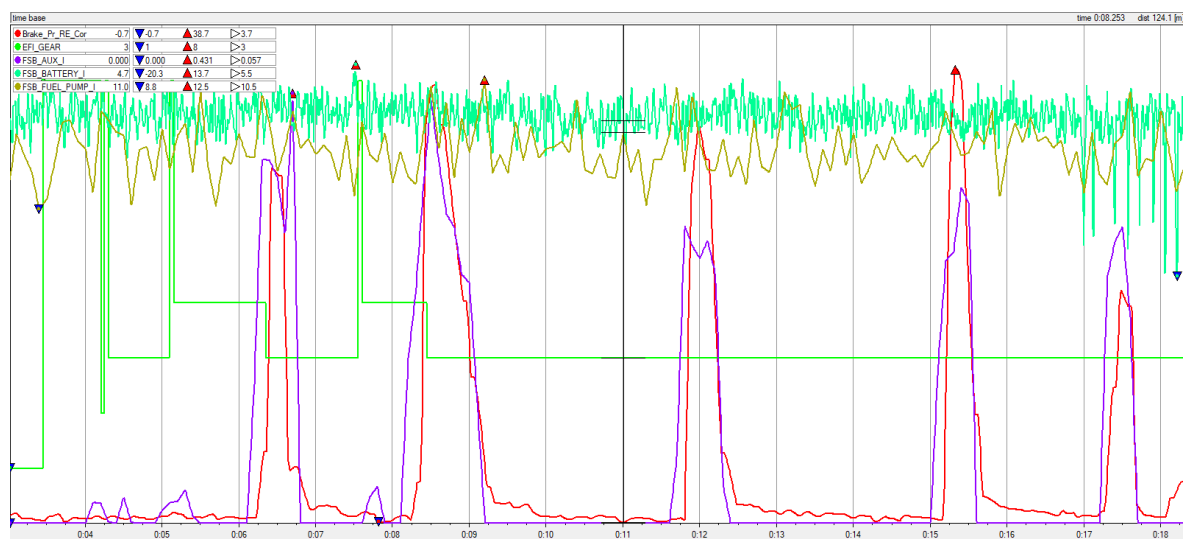
Tab. 4: Naměřené proudy oproti očekávaným

Spotřebič	Nejnižší proud	Nejvyšší proud
Startér	0	>50
Palivová pumpa	7.4	13.4
Chladící ventilátory	6.3	8
Cívky a vstřikovače	0	3.3
Řídící jednotka motoru	1	1.8
Startovací relé	0	2.4
Datalogger	0.220	0.450
Brzdové světlo	0	0.350
Systém řazení	0.040	0.150
Bezpečnostní relé	0.045	0.085
Usměrňovač	-27	-21

Tab. 5: Spotřebiče ve formuli podle proudu

odběr formule, například kvůli používaným aktivním prvkům aerodynamiky. Jejich výkon pak může řidič nastavit tak, aby se baterie do konce závodu nevybila.

Graf 1: Naměřené proudy v průběhu jednoho kola



4 Závěr

Výsledkem této práce je vyzkoušená pojistková skříň, splňující požadavky vytyčené v úvodu práce.

Prvním požadavkem byla ochrana svazků vozidla. Tento požadavek pojistková skříň splnila, pro každý obvod vychází nižší pojistka, než je proudová kapacita použitých vodičů, zkrat tedy nemůže zničit svazky. Zkoušku funkčnosti jsem provedl při prvním zapojování, do obvodu pro malé odběry jsem nejdřív dal 1 A pojistku, bez uvažování odběru startovacího relé. Po pokusu startovat tím pádem shořela a ochránila svazky.

Dalším požadavkem bylo umístění všech relé do pojistkové skříně. To považuji za silnou stránku práce, navržené řešení totiž významně zjednodušilo svazky v oblasti u ECU a akumulátoru. Zapojením jediného konektoru se vyřeší vedení proudu k palivové pumpě a připojí se všechna relé. Veškeré tyto funkce potřebovaly před využitím pojistkové skříně vlastní konektory a vodiče, které pak omezovaly prostor nutný pro manipulaci s akumulátorem. Se spolehlivostí a bezpečností nebyl problém, systém prošel na vstupních kontrolách závodů. Tím že se jedná o řešení vyvíjené na míru, bylo možné hlavní konektor a konektor pumpy umístit proti sobě tak, aby byly nutné délky vodičů co nejmenší. Přitom byla zachována jednoduchá rozebíratelnost krabičky a vodotěsnost.

Další splněný bod práce je měření proudů a napětí na různých obvodech v autě, to také po prvním nastavení fungovalo bezchybně. Nejvíce využívaný výstup z měření bylo napětí shutdown circuitu. Jako diagnostický signál je užitečné, protože se často stává, že je některý z vypínačů omylem zmáčknut. Další zajímavý měřený výstup je proud kanálem pro malé odběry, na kterém lze ověřit otevírání řadících válců a funkci brzdového světla.

Komunikace na sběrnici CAN také fungovala spolehlivě. Pro zrychlení řazení jsem nastavil rychlost 1Mbit/s, kvůli většímu objemu dat na sběrnici bylo ještě potřeba u ostatních jednotek nastavit filtr zpráv, aby se jejich procesor nemusel zabývat informacemi z pojistkové skříně. Správné fungování arbitráže jsem poté validoval měřením.

Tyto nabyté znalosti jsou nejspíš největší přínos celého systému. Možnost rozmístit po autě menší jednotky, pracující podobně jako pojistková skříň, pro dočasné či trvalé měření některé další veličiny může ulehčit vývoj ostatním skupinám.

Další splněný požadavek byla přizpůsobitelnost návrhu pro použití na rámu. Plošný spoj je navržený tak, aby bylo možné odlomit část PCB pro konektor palivové pumpy a používat pouze hlavní konektor. Zadní pojistková skříň byla také používána, zatím ale pouze v analogovém režimu k ochraně vodičů a spínání ventilátorů s pomocí relé.

Další přínos práce je ozkoušení nových komponentů. Otestované komponenty jsou novější mikrokontrolery, které mají více možností komunikace a jsou rychlejší, a pro tým nové konektory AMP superseal 1.0.

V softwaru jednotky ještě chybí funkce řízení palivové pumpy, systém digitální pojistky, ochrana baterie proti přílišnému vybití a sbírání informací z akcelerometru. Tato funkcionality proto nebyla zatím validována.

Pro přesnější výpočet všech odběrů je vhodné navíc vyměnit některé bočníky za větší v přední pojistkové skříni, aby bylo možné změřit například i malý proud volantu.

Možnosti vylepšení navržené pojistkové skříně vidím v miniaturizaci celého systému přechodem na vícevrstvý plošný spoj a digitální pojistky ovládané softwarem.

Seznam použitých značek a symbolů

- α Zesílení proud snímajícího zesilovače [-]
- ΔP_{SH} Ztrátový výkon na bočníku při nejvyšším očekávaném proudu [W]
- ΔU_{SH} Nejvyšší možný úbytek napětí na bočníku, který je stále měřitelný [mV]
- I_D Nejvyšší možný proud tekoucí skrz drain u tranzistoru MOSFET [A]
- $I_{M_{SH}}$ Nejvyšší proud, který je na daném kanálu možno naměřit [A]
- I_{range} Maximální hodnota proudu, kterou může navržený obvod naměřit [A]
- I_{res} Nejmenší hodnota proudu, kterou může navržený obvod měřit [A]
- Q_g Celkový náboj hradla tranzistoru MOSFET [nC]
- R_{calc} Vypočítaná hodnota bočníku pro zvolený měřicí rozsah [$m\Omega$]
- R_{ch} Vybraný bočník ze standardní řady rezistorů [$m\Omega$]
- R_{DSON} Odpor v sepnutém stavu u tranzistoru MOSFET [$m\Omega$]
- R_{thA} Tepelný odpor účinné plochy plošného spoje vůči vzduchu [K/W]
- R_{thJA} Tepelný odpor přechodu vůči okolnímu vzduchu [K/W]
- R_{thJC} Tepelný odpor přechodu vůči pouzdru [K/W]
- T_J Nejvyšší možná teplota přechodu polovodičové součástky [$^{\circ}C$]
- U_{batt} Napětí akumulátoru ve voze [V]
- U_{DS} Nejvyšší možné napětí mezi drain a source [V]
- $U_{GS(th)}$ Napětí mezi hradlem a source, při kterém se už vytvoří vodivý kanál [V]
- ACK Acknowledge slot, část rámce CAN
- ADC Analog-to-digital converter, převodník A/D, převádí analogové napětí na digitální číslo
- CAN Controller area network
- CRC Cyclic redundancy check, česky cyklický redundantní součet, hashovací funkce používané k nalezení chyb přenosu
- CSA Current sense amplifier, česky proud snímající zesilovač
- DAC Digital-to-analog converter, převodník D/A, vytváří z digitálního čísla analogové napětí
- DTM Řada konektorů DTM, hojně používaná v střední třídě motorsportových svazků
- ECU Engine control unit, řídicí jednotka motoru

Eq Equation, rovnice

ETC Zkratka používaná pro označení celého systému elektronické klapky sání

FS.13 13. závodní monopost týmu CTU Cartech, vyrobený v roce 2021

HAL Hardware abstraction layer, knihovny od ST, díky kterým je možné mikrokontroler ovládat funkcemi

HS High side, umístění prvku mezi napájecí napětí a zátěž

I2C Inter-Integrated circuit, nízkorychlostní sběrnice pro připojování periférií k mikropočítačům

LiFePo4 Chemická součinnina lithia, železa a fosoru, používaná na katody akumulátorů

LQFP64 Low profile quad flat package, pouzdro s 64 vývody

LR33 Zkratka označující lineární regulátor s výstupním napětím 3.3V

LR50 Zkratka označující lineární regulátor s výstupním napětím 5V

LS Low side, umístění prvku mezi zátěž a zem

MCP(DOM) Zkratka pro transceiver MCP2542 v dominantním stavu, ve kterém je vyšší spotřeba

MCP(REC) Zkratka pro druhý transceiver MCP2542, pracující na druhé sběrnici CAN převážně v recesivním stavu

NMOS Tranzistor MOSFET typu N

P Elektrický výkon

PCB Printed circuit board, česky deska plošných spojů

PDM Power delivery module, česky jednotka napájení, distribuuje el. energii ve vozidle

PMOS Tranzistor MOSFET typu P

PWM Pulse width modulation, pulzně šířková modulace

SAE Society of automotive engineers, americká profesionální asociace, která poskytuje fórum pro standardizaci v oblasti přepravy

SPI Serial peripheral interface, sériová synchronní sběrnice používaná uvnitř zařízení

ST STMicroelectronics, firma vyrábějící polovodičové součástky

STM32 Řada 32 bitových mikrokontrolerů od výrobce STMicroelectronics

SWD Serial wire debug, rozhraní pro lazení mikrokontrolerů v obvodu

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ACS773: 100 $\mu\Omega$ Internal Resistance Current Sensor. URL: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/fifty-to-two-hundred-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs773> (visited on 08/15/2021).
- [2] Steve Arar. “Hall Effect Current Sensing: Open-Loop and Closed-Loop Configurations”. In: *All about circuits* (July 2021). URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/hall-effect-current-sensing-open-loop-and-closed-loop-configurations/>.
- [3] ATSAM4SD32B. Jan. 2021. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATSAM4SD32B>.
- [4] *Automotive Fuses: Car Fuses*. Feb. 2021. URL: <https://www.mta.it/en/fuses>.
- [5] David Barbagallo and Pierre Turpin. “NEW CURRENT SENSORS MEASURE HIGHER CURRENTS WHILE STAYING THE SAME SIZE”. In: *LEM* (May 2019). URL: <https://www.lem.com/en/hlsr-series>.
- [6] Paul Bryson. May 2018. URL: [http://www.brysonics.com/pcb-thermal-resistance-some-unexpected-results/..](http://www.brysonics.com/pcb-thermal-resistance-some-unexpected-results/)
- [7] *CAN Bus Transceivers*. Jan. 2017. URL: <https://www.kvaser.com/about-can/can-controllers-transceivers/can-bus-transceivers/>.
- [8] Tomáš Cetl et al. *Konstrukce a realizace elektronických obvodů*. Czech. OCLC: 51189624. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN: 9788001024638.
- [9] *Fuel Pump*. Sept. 2020. URL: <https://support.haltech.com/portal/en/kb/articles/fuel-pump>.
- [10] *HCT-0010 Hall Effect Split-Core Current Transducer Magnelab*. July 2021. URL: <https://www.magnelab.com/products/hall-effect-split-core-current-transducer-hct-0010/>.
- [11] “IPB120P04P4-04”. In: *IPB120P04P404ATMA1 - Infineon - Výkonový MOSFET, P Kanál, 40 V* (May 2015). URL: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/INFN/INFN-S-A0001299314/INFN-S-A0001299314-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>.
- [12] George Lakkas. “MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency”. In: *Analog Applications Journal* (Feb. 2016), pp. 1–7. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf>.
- [13] Peter Markowski. *Estimating MOSFET switching losses means higher performance buck converters*. Nov. 2002. URL: <https://www.eetimes.com/>

- estimating - mosfet - switching - losses - means - higher - performance-buck-converters/.
- [14] *Microprocessor vs Microcontroller vs Microcomputer: Jaycon Systems*. Aug. 2019. URL: <https://jayconsystems.com/blog/microprocessor-vs-microcontroller-vs-microcomputer>.
- [15] *MoTeC - PDM15 - Overview*. URL: <https://www.motec.com.au/pdm15/pdm15overview> (visited on 08/15/2021).
- [16] Art Pini. *Select and Apply Current Sense Amplifiers Effectively to Better Manage Power*. Aug. 2018. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/select-apply-current-sense-amplifiers-effectively-manage-power>.
- [17] William Ribbens. *Understanding automotive electronics : an engineering perspective*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN: 9780128104354.
- [18] Giorgio Rizzoni and T. T. Hartley. *Principles and applications of electrical engineering*. 5th ed. OCLC: ocm61228771. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2007. ISBN: 9780072962987.
- [19] *RM0440 Reference manual*. English. Apr. 2020. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g4-series.html#documentation>.
- [20] “Simplifying Current Sensing”. In: *Current Sense Amplifiers — Support & training — Amplifiers — TI.com* (Oct. 2020). URL: <https://www.ti.com/lit/eb/slyy154a/slyy154a.pdf?ts=162762196896>.
- [21] “SQM40022E”. In: *SQM40022E_GE3 - Vishay - Výkonový MOSFET, N Kanál, 40 V* (Oct. 2018). URL: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/INFN/INFN-S-A0001299314/INFN-S-A0001299314-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>.
- [22] *STD110N8F6 - Výkonový MOSFET, N Kanál, 80 V, 80 A, 0.0056 ohm, TO-252 (DPAK), Povrchová Montáž*. Feb. 2013. URL: <https://cz.farnell.com/stmicroelectronics/std110n8f6/mosfet-n-ch-80v-80a-175deg-c-167w/dp/3132718?st=mosfet>.
- [23] *STM32G484xE Product specification*. Angličtina. 2020. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g484re.html#documentation>.
- [24] *SUD50P08-25L-E3 - Výkonový MOSFET, P Kanál, 80 V, 50 A, 0.021 ohm, TO-252 (DPAK), Povrchová Montáž*. Sept. 2009. URL: <https://cz.farnell.com/vishay/sud50p08-25l-e3/mosfet-p-ch-80v-50a-to-252/dp/2646408>.

- [25] *TMS320F28386D-Q1 data sheet, product information and support TI.com*. publisher: Texas instruments. May 2021. URL: <https://www.ti.com/product/TMS320F28386D-Q1#product-details#pps> (visited on 08/04/2021).
- [26] Ivan Uhlř, České vysoké učení technické v Praze, and Strojní fakulta. *Elektrické obvody a elektronika*. Czech. OCLC: 228669029. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN: 9788001039328.
- [27] “Using MOSFETs in Load Switch Applications”. In: *Intelligent Power and Sensing Technologies — onsemi* (Aug. 2021). URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9093-D.PDF>.

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1	Elektronika ve voze FS.13	7
Obrázek 2	Využití sběrnic CAN v FS.13	7
Obrázek 3	PDM15	9
Obrázek 4	Diagram hallového senzoru proudu	10
Obrázek 5	Umístění bočnicku a spínacího prvku vzhledem k zátěži	12
Obrázek 6	Použitý zesilovač	23
Obrázek 7	Uchycení senzoru proudu na baterii	24
Obrázek 8	Externí senzor proudu	24
Obrázek 9	Hotové PCB	27
Obrázek 10	Tepelný obvod	29
Obrázek 11	Krabička s pojistkovou skříní	30
Obrázek 12	Vyrobený přední a zadní fusebox	31
Obrázek 13	Diagram softwaru	32
Obrázek 14	Odesílané rámce	33
Obrázek 15	Výstup z osciloskopu	33

Seznam grafů

Graf 1	Naměřené proudy v průběhu jednoho kola	35
--------	--	----

Seznam tabulek

Tabulka 1	Srovnání PMOS a NMOS s podobnými parametry	21
Tabulka 2	Zvolené hodnoty bočníků	26
Tabulka 3	Vypočítaný celkový ztrátový výkon	28
Tabulka 4	Naměřené proudy oproti očekávaným	35
Tabulka 5	Spotřebiče ve formuli podle proudu	35

Seznam příloh

Příloha 1: Schéma logické části

Příloha 2: Schéma silové části obvodu

Příloha 3: Schéma zesilovačů

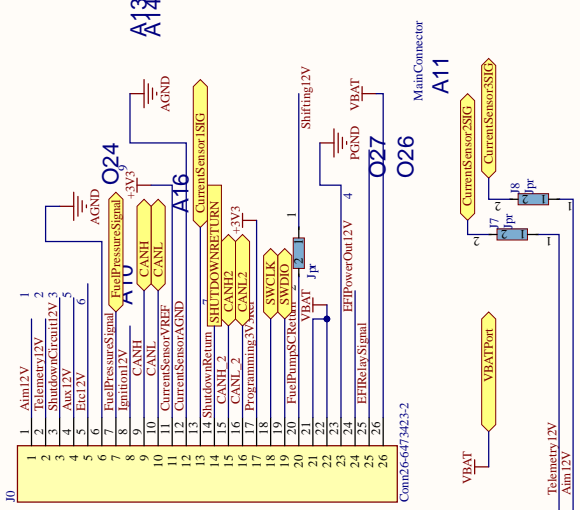
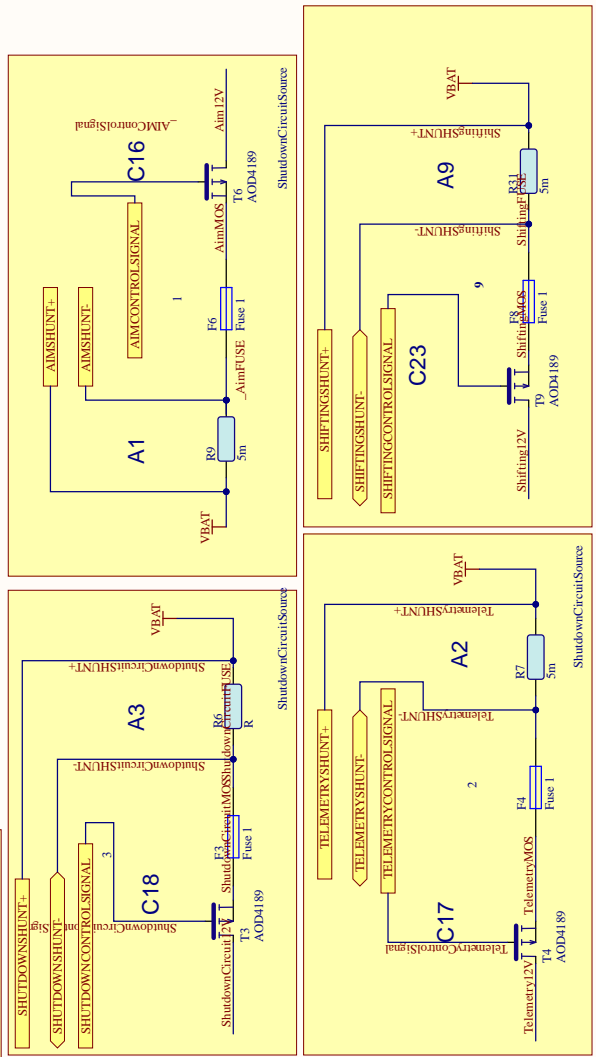
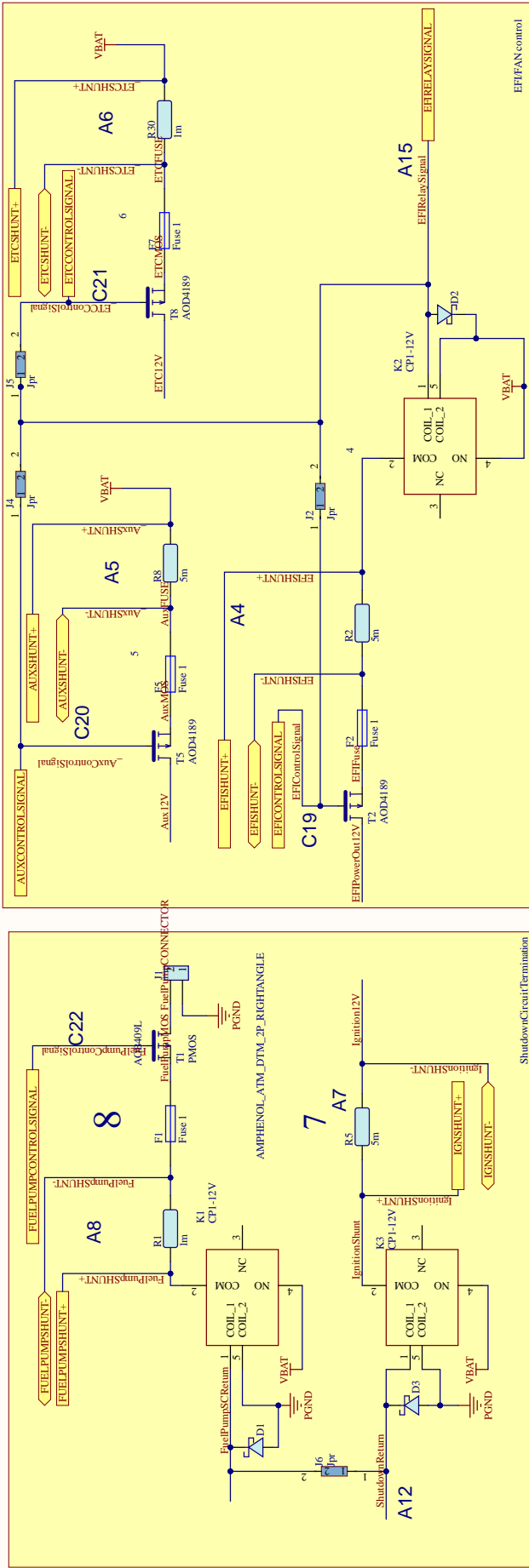
Příloha 4: Přední strana tištěného spoje

Příloha 5: Zadní strana tištěného spoje

Obsah přiloženého CD

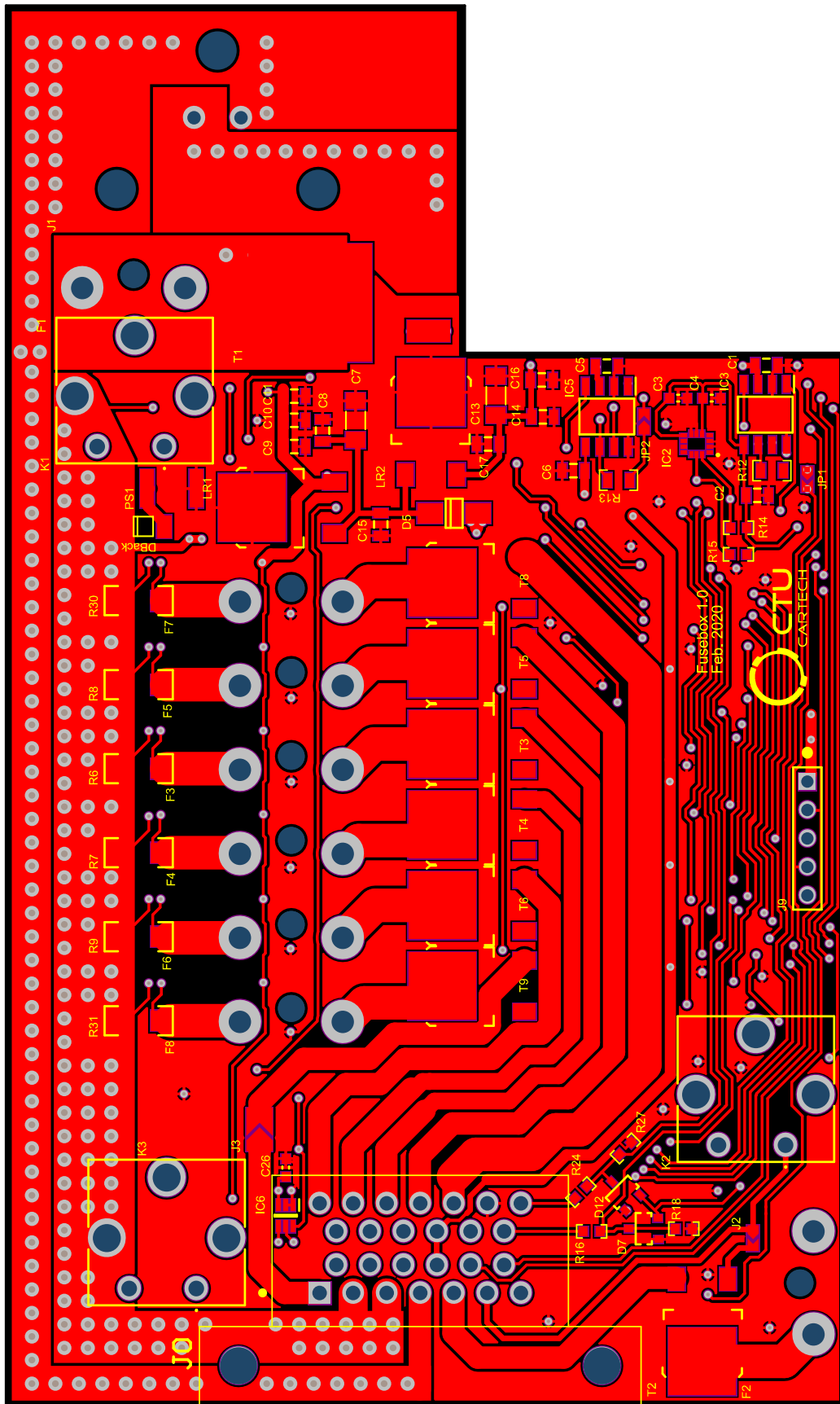
- Elektronické schéma
- Navržené PCB
- Systémem zaznamenaná data
- Vyvinutý software
- Celé znění práce v pdf

Příloha 2



Title	
Size	Number
A3	
Date	Revision
3. 12. 2021	
File:	Sheet of
C:\Users\...PowerElectronics\ProjDoc	Drawn By:

Příloha 4 - Přední strana tištěného spoje



Příloha 5 - Zadní strana tištěného spoje

