



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ŘÍZENÍ NAPÁJENÍ PRO MONOPOST FORMULA STUDENT

POWER CONTROLLER FOR FORMULA STUDENT MONOPOST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štefan Sanetrik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Štefan Sanetrik

ID: 186178

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Řízení napájení pro monopost Formula Student

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte zařízení, které bude umožňovat komunikaci pomocí sběrnice CAN, spínání napájecí větve na základě příkazů z diskretních vstupních signálů, měření proudů jednotlivých větví a realizaci nadproudové ochrany. S přihlédnutím k zamýšlenému použití v monopostu formule kladte důraz na spolehlivost navrženého zařízení.

Na základě dat získaných v semestrálním projektu v rámci bakalářské práce proveďte:

- aktualizaci konceptu elektronické nadproudové ochrany,
- návrh obvodového schématu zařízení,
- návrh a vytvoření testovací desky pro ověření dílčích funkcí,
- vytvořte programové vybavení,
- proveďte analýzu spolehlivosti elektronických komponent,
- proveďte mechanický návrh zařízení s ohledem na integraci do monopostu,
- zrealizujte prototyp elektroniky,
- ověřte dosažené parametry vůči požadavkům uvedeným v zadání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

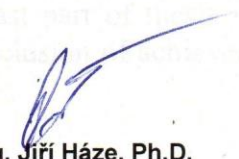
Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 31. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Marek Bohm, Ph.D.




doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá návrhom jednotky riadenia napájania pre monopost *Formule Student*. Prvá časť práce sa zaoberá definovaním požiadaviek na jednotku riadenia napájania. Následne je predstavený komunikačný protokol CAN, ktorý bude využitý ku komunikácii so systémom monopostu. Tretia časť práce sa zaoberá návrhom celkového obvodového riešenia. Následne je riešený mechanický návrh zariadenia. Následne je predstavený koncept softvérovej výbavy. V poslednej časti sa práca zaoberá porovnaním dosiahnutých a požadovaných parametrov a zhodnoteniu dosiahnutých výsledkov

KLÚČOVÉ SLOVÁ

CAN, riadenie napájania, meranie prúdu, Formula Student

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with design of power management unit for single seater Formula Student car. In first part are defined requirements for power management unit. In next part CAN protocol which, will be used for communication with system of the car, is introduced. Third part of thesis deals with circuit design. Mechanical design of device is introduced in next part followed by introduction of software. Last part of thesis is focused on comparison of wanted and achieved parameters and conclusion of achieved results.

KEYWORDS

CAN, power management, current measurement, Formula Student

SANETRIK, Š. *Řízení napájení pro monopost formula student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2018. 42 s.. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Řízení napájení pro monopost formula student som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Marek Bohrn, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

Zoznam obrázkov	8
Zoznam tabuliek	9
Úvod	9
1 Požiadavky na jednotku riadenia napájania	10
1.1 Všeobecné požiadavky	10
1.2 Popis vstupov	10
1.2 Popis výstupov	11
1.3 Popis vnútorných funkcií	12
1.4 Popis požadovaných CAN správ	12
2 Popis komunikačného protokolu CAN	13
2.1 Fyzická vrstva	13
2.2 Linková vrstva	14
2.2.1 Dátový rámec protokolu CAN2.0B	14
3 Popis obvodového riešenia	16
3.1 Bloková schéma	16
3.2 FMEA	17
3.3 Možnosti merania prúdu	18
3.3.1 Prúdový bočník	18
3.3.2 Hallov senzor	19
3.4 Nadprúdová ochrana	19
3.4.1 Integrovaný obvod TLI4970-D025T4	20
3.5 Zdroj	21
3.6 Vstupné obvody	23
3.7 Mikrokontrolér a CAN vysielateľ	24
3.8 Doska plošných spojov	25
4 Návrh mechanického riešenia	26
4.1 Konektory	26
4.2 Mechanický návrh	26
4.3 Termálna analýza	28

5	Popis softvérovej výbavy	30
5.1	Hlavná programová slučka	30
5.2	Kód obsluhujúci prerušenie	32
6	Zhrnutie dosiahnutých výsledkov	34
7	Záver	36
	Literatura	37
	Zoznam skratiek	38
	Zoznam príloh	39

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2.1 Prenos na zbernici CAN.....	13
Obrázok 2.2 Dátový rámec protokolu CAN2.0B	15
Obrázok 3.1 Bloková schéma jednotky riadenia napájania	17
Obrázok 3.2 Schéma zapojenia prúdovej ochrany.....	20
Obrázok 3.3 Bloková schéma obvodu TLI4970-D025T4 (prevzaté z [3]).....	21
Obrázok 3.4 Filter napájacieho napätia	21
Obrázok 3.5 Zdroj napätia pre spínanie výstupných tranzistorov	22
Obrázok 3.6 Zdroje napätí 5 V a 3,3 V	23
Obrázok 3.7. Vstupný obvod	23
Obrázok 3.8 Obvod povoľovania zdroja pre spínanie výstupných tranzistorov.....	24
Obrázok 4.1 Rez obalom jednotky riadenia napájania 1	27
Obrázok 4.2 Rez obalom jednotky riadenia napájania 2	27
Obrázok 4.3 Simulácia prestupu, tepla vrchná časť zariadenia	28
Obrázok 4.4 Simulácia prestupu tepla, spodná časť zariadenia.....	29
Obrázok 5.1 Vývojový diagram hlavnej slučky softvéru	31
Obrázok 5.2 Vývojový diagram kódu obsluhujúceho prerušenie.....	32
Obrázok 6.1 Odozva na zmenu na diskretnom vstupe.....	35

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1.1 Zoznam vstupov	11
Tabuľka 1.2 Zoznam výstupov	11
Tabuľka 1.3 Zoznam vnútorných funkcií	12
Tabuľka 2.1 Súčasne vysielanie dvoch rámcov	14
Tabuľka 3.1 Prehľad chybových módov	18
Tabuľka 3.2 Prehľad parametrov obvodu TLI4970-D025T4 (prevzaté z [3])	21
Tabuľka 6.1 Prehľad dosiahnutých parametrov	35

ÚVOD

V dnešnej dobe je v závodných autách bežným štandardom používanie jednotiek riadenia napájania namiesto klasických poistiek a relé. Jednotka riadenia napájania sa v závodných autách stará o ochranu voči nadprúdu v jednotlivých napájacích vetvách, komunikuje s ostatnými riadiacimi jednotkami v aute a vykonáva ich požiadavky. Jednotky riadenia napájania vykonávajú aj jednoduché funkcie ako je napríklad cyklické spínanie a rozopínanie výstupov. Nezriedka kedy je možné ich vidieť vykonávať aj komplexné úlohy ako napríklad riadenie rôznych systémov pomocou PWM na základe dát získaných zo senzorov.

Pri návrhu automobilovej elektroniky je všeobecne nutné brať zvýšený ohľad na spoľahlivosť navrhovaného zariadenia nakoľko porucha môže znamenať v lepšom prípade výpadok niektorého systému a zastavenie vozidla alebo v horšom prípade významné škody na majetku, alebo v najhoršom prípade poranenie osôb. Z tohto dôvodu sa pri návrhu používajú rôzne druhy analýz aby bolo možné chybové stavy odhaliť a zabrániť ich vzniku. V tejto práci bude k tomuto účelu využitá spoľahlivostná analýza FMEA vďaka ktorej bolo možné odhaliť a značne znížiť počet fatálnych chýb zariadenia.

Kľúčovým parametrom pri návrhu závodných automobilov je aj hmotnosť. Preto je aj elektronika pre tento účel navrhovaná s maximálnou snahou o nízku hmotnosť. V tejto práci bude k tomuto účelu využitá termálna analýza, vďaka ktorej bolo možné overiť, že obal zariadenia dokáže spoľahlivo uchladiť zariadenie aj pri svojej nízkej hmotnosti.

V tejto práci bude popísaný návrh jednotky riadenia napájania, spĺňajúcej pravidlá súťaže *Formula Student*, určenej pre aplikáciu do monopostu, ktorý sa zúčastňuje tejto súťaže. Jej úlohou bude nadprúdová ochrana všetkých okruhov v monoposte a zároveň poskytovanie informácii o aktuálnych hodnotách prúdov ostatným jednotkám vo vozidle. Jej úlohou bude aj ovládanie výstupov na základe požiadaviek z diskretných vstupov a zbernice CAN.

1 POŽIADAVKY NA JEDNOTKU RIADENIA NAPÁJANIA

V nasledujúcom texte sú najprv predstavené všeobecné požiadavky, požiadavky na vstupy, výstupy a vnútorné funkcie vyvíjaného zariadenia.

1.1 Všeobecné požiadavky

Predpokladané prostredie, v ktorom bude zariadenie pracovať je značne nepriaznivé. Zariadenie bude vystavené vibráciám, ktoré sú spôsobené nerovnomerným chodom jednovalcového motora, ktorý je vo vozidle. Vzhľadom k predpokladanej montáži bude zariadenie priamo prístupné prachu a vode a zároveň môže dôjsť k prevádzke zariadenia ponoreného pod hladinou vody po dobu maximálne jednej hodiny. V priestore predpokladanej montáže bude minimálne prúdenie vzduchu a teploty pri prevádzke budú dosahovať až 60 °C

Ďalším dôležitým faktorom, ktorý je nutné pri návrhu zohľadniť je rušenie spôsobené zapalovacou sústavou vozidla. Rovnako je dôležité pri návrhu zohľadniť pokles napájacieho napätia pri štartovaní až na 6 V.

Rovnako je pri návrhu nutné zohľadniť bezpečnostný vypínací okruh, ktorý na vozidle požadujú pravidlá súťaže. Tento okruh bude v bezporuchovom stave držať uzemnený jeden z výstupov. Okruh sa skladá z troch vypínačov zapojených v sérii, jeden slúži na vypnutie vozidla v prípade poruchy brzd, jeden na vypnutie vozidla v prípade nárazu a jede ako bezpečnostný vypínač pre vodiča v prípade nejakej poruchy. V prípade rozpojenia niektorého z vypínačov musí dôjsť k odpojeniu napájania zapalovania, vstrekovania, palivovej pumpy a zastaveniu motora [5].

Z týchto požiadaviek na odolnosť voči okolitému prostrediu vyplýva, že ideálnym riešením bude vytvorenie krabice, v ktorej bude zariadenie umiestnené z kovu a na prepojenie s prostredím použiť konektory odolné voči vode. Táto krabica bude zároveň slúžiť k pasívnemu vedeniu komponentov zariadenia.

1.2 Popis vstupov

V zariadení sa budú vyskytovať tri druhy vstupov a to vstupy určené ku komunikácii pomocou protokolu CAN 2.0B a komunikačnej zbernice USART, ktorá bude v budúcnosti použitá ku zmene nastavenia hodnoty prúdových poistiek a nastavenia CAN správ bez nutnosti zmeny firmvéru v zariadení. Druhým typom vstupov budú vstupy určené k pripojeniu prepínačov určených k ovládaniu funkcií tohoto zariadenia vodičom, napríklad zapínanie palivového čerpadla, vyresetovaniu vypnutých výstupov. Jeden z týchto vstupov bude použitý k pripojeniu bezpečnostného okruhu. V súčasnosti budú využité tri vstupy a jeden je voľný pre prípadne budúce rozšírenie požadované pre budúce rozšírenie.

Tabuľka 1.1 Zoznam vstupov

Číslo	Názov vstupu	Popis
1.	CANH	Vstup pre protokol CAN 2.0B
2.	CANL	Vstup pre protokol CAN 2.0B
3.	USART Tx	Výstup pre zbernicu USART
4.	USART Rx	Vstup pre zbernicu USART
5.	Vstup 1	Vstup pre prepínač
6.	Vstup 2	Vstup pre prepínač
7.	Vstup 3	Vstup pre prepínač
8.	Vstup 4	Vstup pre bezpečnostný okruh

1.2 Popis výstupov

Požiadavky na vstupy a výstupy vyplývajú z celkového konceptu elektroniky monopostu *Formula Student*. Celkovo je požadovaných osem nezávislých výstupov. Každý z týchto výstupov musí mať nezávislú, softwarovo nastaviteľnú nadprúdovú ochranu. A pevnú ochranu, ktorá daný výstup vypne pri limitnej hodnote prúdu, ktorá by ten výstup nenávratne poškodila.

Každý z výstupov musí byť možné vypnúť alebo zapnúť na základe vonkajšej požiadavky, ktorá môže byť realizovaná buď pomocou protokolu CAN, alebo zmenou stavu niektorého z troch vstupov pre prepínač. Taktiež musí byť zabránené zapnutiu výstupu ktorý bol vypnutý pre prekročenie prúdu inak než aktiváciou resetovacieho vstupu, alebo vypnutia a zapnutia zariadenia.

Tabuľka 1.2 Zoznam výstupov

Číslo	Napájaný okruh	Maximálny prúd
1.	Vstrekovače	10 A
2.	Palivová pumpa	10 A
3.	Zapaľovacia cievka	10 A
4.	Ventilátor	10 A
5.	Riadiaca jednotka motora	10 A
6.	Datalogger, volant, telemetria	5 A
7.	Napájanie aktuátorov	5 A
8.	Napájanie senzorov	5 A

1.3 Popis vnútorných funkcií

Navrhovaná jednotka riadenia napájania bude mať 5 základných vnútorných funkcií, ktoré sú uvedené v tabuľke nižšie. Funkcie majú rôznu prioritu z dôvodu zachovania bezpečnosti, pričom najvyššia priorita je 1 a je priradená núdzovému zastaveniu, ktoré môže nastať pri poruche ovládania elektronickej klapky, alebo aktivácii bezpečnostného okruhu, a zároveň je priorita 1 priradená aj odpojeniu výstupu v prípade prekročenia nastaveného prúdu.

Tabuľka 1.3 Zoznam vnútorných funkcií

č.	Funkcia	Priorita
1	Vypnutie výstupu číslo 1,2,3 v prípade požiadavky na núdzové zastavenie motora priatej pomocou protokolu CAN	1
2	Vypnutie výstupu pri prekročení nastaveného maximálneho prúdu	1
3	Zapnutie/vypnutie výstupu číslo 2 podľa stavu na vstupe číslo 1	2
4	Zapnutie/vypnutie výstupu číslo 4 podľa požiadavku prijatého cez CAN	3
5	Vysielanie aktuálnych hodnôt prúdu, stavov výstupov, napätia a teploty cez CAN s periódou 0,1s	4

1.4 Popis požadovaných CAN správ

Na komunikáciu zariadenia zo systémom vozidla budú použité tri základné správy, ktoré sú uvedené v prílohe.

Jedna správa slúži na príjem príkazov z jednotky motora. Konkrétne príkazu na ovládanie výstupu pre ventilátor s príkazu na bezpečnostné vypnutie výstupov pre vstrekovače, palivovú pumpu a zapalovaciu cievku. Jej zloženie je dané jednotkou motora. Skladá sa z ôsmich bajtov dát pričom prvý bajt obsahuje informáciu o stave ventilátora a druhý bajt požiadavku na bezpečnostné vypnutie. Zvyšných šesť bajtov nie je pre túto aplikáciu podstatných.

Zvyšné dve správy slúžia k poskytovaniu informácii o aktuálnom stave zariadenia. Tieto správy sú vysielané s frekvenciou 10 Hz. Prvá správa sa skladá z troch bajtov dát, v ktorých sa nachádzajú, v prvom bajte informácia o aktuálnej teplote zariadenia, v druhom bajte informácie o aktuálnom stave výstupov a v treťom bajte informácie o chybnom stave jednotlivých výstupov. Zvyšných 5 bajtov je v tejto správe nevyužitých. Druhá správa sa skladá z ôsmich bajtov pričom každý bajt obsahuje aktuálnu hodnotu prúdu jedného z výstupov.

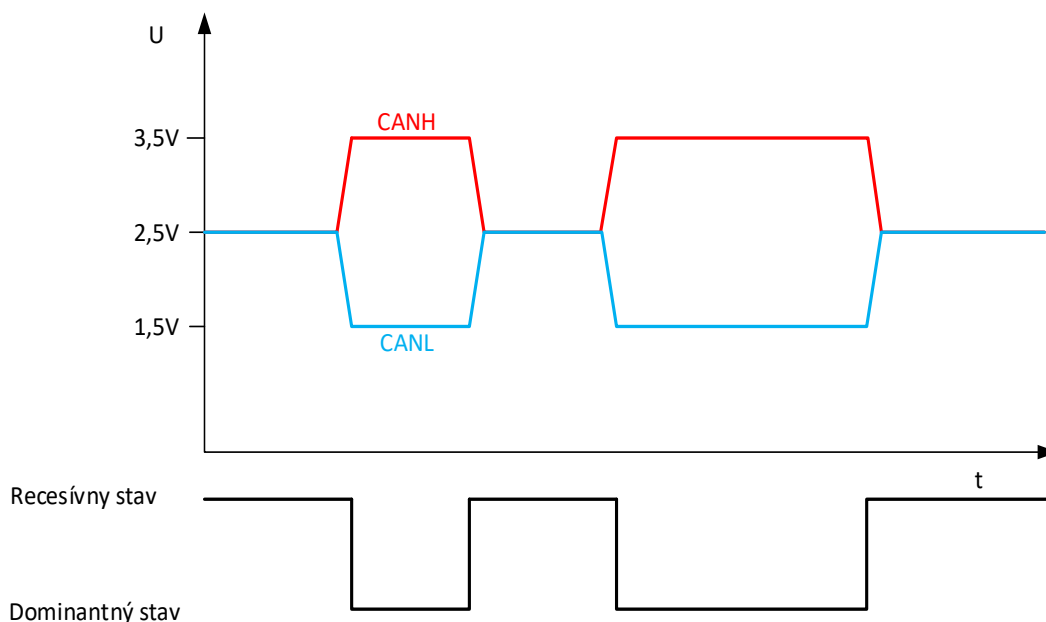
2 POPIS KOMUNIKAČNÉHO PROTOKOLU CAN

Protokol CAN (z angl. *Controller Area Network*) bol vyvinutý v roku 1983 firmou BOSCH. Je typický vysokou imunitou voči rušeniu, aj vďaka tomu sa rozšíril a je jeden z najpoužívanejších komunikačných protokolov v automobilovom priemysle. V súčasnej dobe sú najpoužívanejšie štandardy CAN 2.0A a CAN 2.0B, ktoré sa navzájom líšia dĺžkou identifikátora. CAN2.0B má 29-bitový identifikátor a CAN2.0A má 11-bitový identifikátor. Tento protokol popisuje norma ISO 11898 [1].

Jedná sa o sériový multimaster a multicast protokol, čo znamená, že nie je predom určený vysielací uzol, ale uzol, ktorý chce vyslať, tak vyšle správu a následne uvoľní linku. V prípade, že by začali vyslať dva uzly zároveň, tak uzol, ktorý vysla správu s nižšou prioritou tak vysielanie automaticky preruší.

2.1 Fyzická vrstva

Protokol CAN má definované dva stavy zbernice a to: *dominantný* a *recesívny*. Ako prenosové médium sa využíva diferenciálna zbernica, ktorú tvoria dva vodiče označované *CANH* a *CANL*. Výsledný stav zodpovedá rozdielu napätí na týchto vodičoch. Pre dominantný stav $V_{\text{dif}}=2\text{ V}$ a pre recesívny stav $V_{\text{dif}}=0\text{ V}$. V prípade, že by všetky uzly vysielali recesívny stav, ale jeden by vysielal dominantný stav, tak stav celej zbernice by bol dominantný.



Obrázok 2.1 Prenos na zbernici CAN

2.2 Linková vrstva

Vzhľadom k tomu, že CAN je multimaster a multicast protokol, tak nie je predom určený vysielací uzol. Ak je zbernica voľná tak môže akýkoľvek uzol zahájiť vysielanie. Ak uzol zahájil vysielanie ako prvý tak má zbernicu len pre seba a ostatné uzly čakajú kým dôjde k ukončeniu vysielania.

Ak zahája dva uzly vysielanie zároveň, tak zbernicu získa ten uzol, ktorý vysielá správu s najvyššou prioritou, ktorú udáva identifikátor. Uzol vždy porovnáva vyslané dáta s aktuálnymi dátami na zbernici, vďaka čomu dokáže v prípade, že sa odoslané a aktuálne dáta líšia rozoznať, že je zároveň prenášaná aj správa s vyššou prioritou a ukončiť vysielanie.

Na nasledujúcom obrázku môžeme vidieť ako by vyzerali dáta na zbernici v prípade, že by zároveň vysielali dva uzly, jeden s identifikátorom 603 a druhý s identifikátorom 604. Pre zjednodušenie je použitý krátky 11b identifikátor. Môžeme vidieť, že u štvrtého bitu identifikátora dôjde k vyslaniu recesívneho bytu uzlom 2, ale na zbernici je byť dominantný čo značí vysielanie správy z vyššou prioritou iným uzlom. Uzol 2 ukončí vysielanie. Táto udalosť je v tabuľke vyznačená šedou.

Tabuľka 2.1 Súčasne vysielanie dvoch rámcov

	S O F	Identifikátor											Zvyšok rámca
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
Uzol 1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	Zastavenie vysielania
Uzol 2	0	0	0	0	1	1	0	1					
CAN zbernica	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	Zvyšok rámca

Protokol CAN využíva 4 druhy rámcov:

Data Frame – rámec obsahujúci dáta

Remote Frame – rámec pre vyžiadanie odozvy

Error Frame – rámec vysielaný pri detegovanej chybe na zbernici

Overload Frame – rámec vysielaný pri preťažení

2.2.1 Dátový rámec protokolu CAN2.0B

Dátový rámec sa delí na 14 častí s rôznou dĺžkou a funkciou. Dátový rámec protokolu CAN2.0A, ktorý sa môže vyskytnúť v rovnakej sieti ako rámec CAN2.0B, sa líši dĺžkou identifikátora 11b a neobsahuje bit SRR a rezervovaný bit r1. Štruktúra dátového rámca je zobrazená na nasledujúcom obrázku. V prvom riadku sa nachádza názov poľa a v druhom sa nachádza jeho dĺžka v bitoch [1].

S O F	Identifier	S R R	I D E	Identifier	R T R	r 1	r 0	DLC	Data	CRC	A C K	EOF	I F S
1	11	1	1	18	1	1	1	4	0-8 x 8	15+1	1+1	7	3

Obrázok 2.2 Dátový rámec protokolu CAN2.0B

- SOF – začiatok dátového rámca (z angl. Start of Frame)
Označuje začiatok dátového rámca a zároveň slúži k synchronizácii zariadení pripojených na zbernicu.
- Rozhodovacie pole
 - Identifier - identifikátor
Najvýznamnejších 11b identifikátora dátového rámca, zároveň označuje prioritu rámca
 - SRR – (z angl. Substitute Remote Request bit)
Odlišuje dátové a požiadavkové rámce
 - IDE – (z angl. Identifier Extension bit)
 - Identifier – identifikátor
Najmenej významných 18b identifikátora dátového rámca
 - RTR – (z angl. Remote Transmission Request)
Určuje či ide o dátovú správu, alebo o žiadosť o prístup na zbernicu.
- Kontrolné pole
 - r1, r0
Rezervované bity, vždy musia byť dominantné
 - DLC – (z angl. Data Length Code)
Počet prenášaných dátových bajtov (0-8)
- Dátové pole
Prenášané dáta (0-8bajtov)
- CRC – (z angl. Cyclic redundancy check)
Kontrolný súčet pre kontrolu správnosti prenosu.
- ACK
Potvrdenie úspešného prijatia správy.
- EOF – (z angl. End of Frame)
Označuje koniec prenášanej správy.
- IFS – (z angl. Inter Frame Space)

3 POPIS OBVODOVÉHO RIEŠENIA

V nasledujúcej kapitole bude popísané zvolené obvodové riešenie. Najprv bude uvedená bloková schéma celého zariadenia so stručný popisom funkcie a následne budú podrobnejšie popísané jednotlivé bloky dôvody voľby daného zapojenia a komponentov a to ako fungujú.

3.1 Bloková schéma

Bloková schéma je na obrázku 3.1. Zariadenie sa skladá zo 7 základných funkčných blokov.

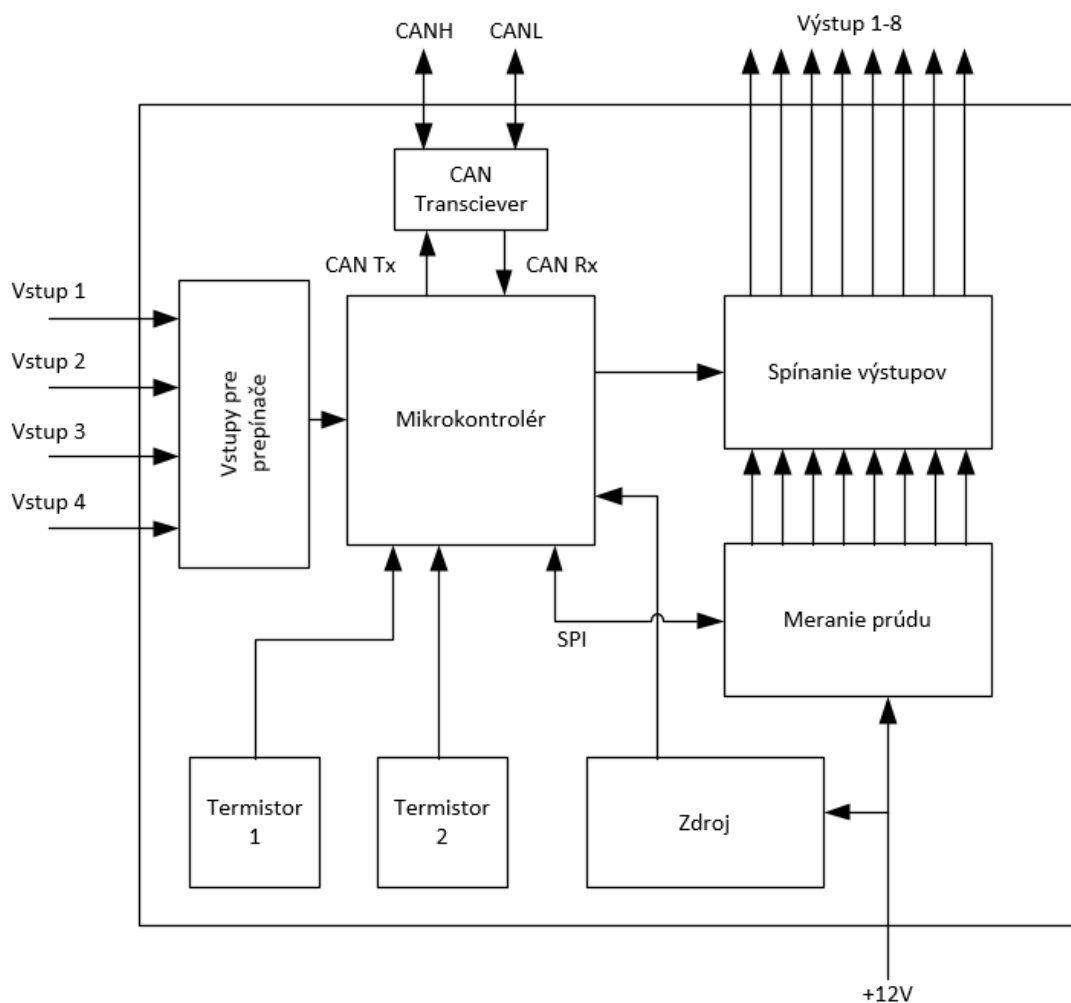
Blok spínanie výstupov sa skladá z výkonových tranzistorov typu MOSFET pre každý výstup, ktoré sú ovládané mikrokontrolérom a . V blízkosti tranzistorov sú umiestnené aj dva termistory, ktoré poskytujú mikrokontroléru informáciu o aktuálnej teplote chladiča výkonových tranzistorov a senzorov prúdu pre prípadné vypnutie výstupov pri prekročení teploty, ktorá by mohla nenávratne poškodiť zariadenie.

Blok meranie prúdu ma na starosti meranie prúdu a poskytovanie nameraných hodnôt mikrokontroléru pomocou komunikačnej zbernice SPI. V prípade prekročenia limitnej hodnoty prúdu, ktorá by zničila výstup, dochádza navyše k uzemneniu jedného zo vstupov mikrokontroléra a tým generovaniu externého prerušenia, ktoré daný výstup vypne.

Blok vstupov pre vypínače obsahuje ochrany a odrušenie vstupov pre externé prepínače z ktorých dva slúžia k ovládaniu výstupov zariadenia a jeden slúži k prípadnému vyresetovaniu výstupov, ktoré boli vypnuté pre nadprúd. Posledný vstup slúži k vypnutiu napájania k zapalovaniu vstrekovaniu a k palivovej pumpe v prípade aktivácie niektorého z bezpečnostných vypínačov na vozidle.

Zdroj sa skladá zo vstupného filtra, ktorý ma na starosti odrušenie napájacieho napätia od rušenia vzniknutého primárne od zapalovacej sústavy. Zdroj poskytuje tri výstupné napätia a to 5 V, 3,3 V a napätie pre spínanie výstupných NMOS tranzistorov, ktoré je udržiavané o 10 V vyššie než je napájacie napätie. Tento zdroj je povolený pulzujúcim výstupom z mikrokontroléra, ktorý vypne tento zdroj a zároveň všetky výstupné tranzistory v prípade, že výstup z mikrokontroléra prestane pulzovať

Mikrokontrolér ma na starosti vypínanie výstupov pri prekročení nastavenej hodnoty prúdovej poistky, vykonávanie príkazov, ktoré dostane cez CAN a zo vstupov pre prepínače. Zároveň vytvára a odosiela cez CAN pomocou CAN vysielača / prijímača správy, ktoré obsahujú informácie o aktuálnych stavoch výstupov, prúdoch, napäti, a teplote.



Obrázok 3.1 Bloková schéma jednotky riadenia napájania

3.2 FMEA

Vzhľadom k aplikácii, ku ktorej je zariadenie určené a požiadavke na vysokú spoľahlivosť bolo nutné obvodový návrh zanalyzovať a na základe výsledkov tejto analýzy upraviť tak aby bola dosiahnutá vyššia spoľahlivosť. Pre tento účel bola zvolená analýza FMEA (z angl. *Failure Mode and Effect Analysis*) teda analýza možných chýb a ich následkov.

V prvej fáze analýzy boli určené možné chybové módy pre jednotlivé komponenty. Pri určovaní týchto módov sa primárne prihliadalo k mechanickému namáhaniu spôsobenému vibráciami, ktoré môže spôsobiť odpadnutie súčiastky z dosky plošných spojov, alebo k nenávratnému mechanickému poškodeniu súčiastky ako je napríklad prasknutie. Prehľad týchto chybových módov je uvedený v tabuľke 3.1.

V druhej fáze bol určený dopad týchto chýb u jednotlivých komponent na celý systém. Následne bola navrhnutá úprava zapojenia tak aby chyba nemala fatálny dopad na funkčnosť zariadenia. V niektorých prípadoch nebolo zabránené tomu aby chyba

nastala buď z dôvodu malej závažnosti chyby, alebo preto, že danej chybe by bolo príliš náročné zabrániť. Tento prípad je typický pre poškodenie mikrokontroléra.

Tabuľka 3.1 Prehľad chybových módov

Komponent	Chybový stav	Vplyv na obvod
Rezistor	Odpadnutie	Rozpojenie
Rezistor	Prasknutie	Rozpojenie
Kondenzátor	Odpadnutie	Rozpojenie
Kondenzátor	Prasknutie	Skrat

Chybové módy spôsobujúce rozpojenie boli v kritických prípadoch ošetrené doplnením ďalšej rovnakej súčiastky paralelne takže v prípade, že dôjde k odpadnutiu jednej súčiastky tak síce dôjde k zmene hodnoty, ale zariadenie ostáva stále funkčné. V prípade skratu u kondenzátorov bol doplnený v kritických prípadoch ďalší kondenzátor do série, takže v prípade skratu jedného z nich dôjde ku zmene hodnoty, ale funkčnosť obvodu ostáva zachovaná.

Analýza bola realizovaná celkovo tri krát než bol dosiahnutý uspokojivý výsledok. Po každom vykonaní analýzy boli odstránené chyby a realizovaná nová analýza. V prvom kole boli odstránené chyby spôsobujúce rozpojenie a následne v druhom kole chyby spôsobujúce skrat. V analýze neboli zahrnuté chyby spôsobené poškodením senzorov prúdu, nakoľko tie budú ošetrené softvérovo.

3.3 Možnosti merania prúdu

Metódy merania prúdu môžeme rozdeliť na dva základné druhy a to kontaktné, pri ktorých meraný prúd prechádza priamo meracím obvodom, a bezkontaktné, pri ktorých je využité magnetické pole okolo vodiča, ktorým prechádza prúd. Vzhľadom k požiadavkám na výsledné zariadenie do úvahy prichádzajú dve metódy merania prúdu jedna kontaktná pomocou odporového bočníka a jedna bezkontaktná pomocou Halloveho senzoru.

3.3.1 Prúdový bočník

Prúdový bočník je založený na aplikácii Ohmového zákona. Do meraného obvodu sa umiestni rezistor so známou hodnotou, na ktorom sa meria úbytok napätia. Z nameraného napätia a známej hodnoty odporu sa následne pomocou Ohmového zákona dopočíta prúd pretekajúci rezistorom [2].

Nevýhody tohto riešenia sú zrejmé. Všetok meraný prúd musí prechádzať bočníkom čo spôsobuje značný stratový výkon, ktorý je následne nutné chladiť. Všeobecne je odporúčané aby pokles napätia na bočníku bol aspoň 100 mV čo by v tomto prípade podľa vzorca

$$P = U * I$$

pri meranom prúde 10 A a strate na bočníku 100 mV znamenalo stratový výkon 1 W pre jeden výstup. Zariadenie je navrhované s piatimi 10 A vstupmi a tromi 5 A vstupmi čo znamená, že celkové straty na bočníkoch by boli 6,5 W.

Jedná sa o jednoduché, odolné a lacné riešenie. Je vhodné všade tam kde sú kladené požiadavky na nízku cenu a nie je problém stratové teplo, ktoré bočník produkuje. Vzhľadom k požiadavkám na minimálne rozmery a hmotnosť výsledného zariadenia toto riešenie nie je vhodné nakoľko 6,5 W stratového výkonu vyžaduje chladenie, ktoré by zvýšilo celkovú hmotnosť a rozmery.

3.3.2 Hallov senzor

Jedná so o súčiastku, ktorá sa používa na meranie magnetického poľa. Funguje na základe Hallovho javu. Tvorí ho úzka polovodičová doštička, cez ktorú prechádza prúd. Pri vložení doštičky do magnetického poľa cez ňu prechádza indukčný tok, ktorý spôsobí vznik Hallovho napätia kolmo na smer indukčného toku.

Pri prechode prúdu vodičom vzniká v jeho okolí magnetické, ktoré je závislé na veľkosti prúdu, ktorý vodičom preteká. Tento jav sa využíva pri meraní prúdu pomocou Hallovej sondy. Okolo vodiča sa umiestni jadro, do ktorého medzery sa umiestni Hallova sonda. Magnetické pole v okolí vodiča indukuje v jadre magnetický tok, ktorý prechádza aj Hallovou sondou a vytvára tak Hallove napätie, ktorého veľkosť je následne úmerná prúdu, ktorý preteká vodičom [2].

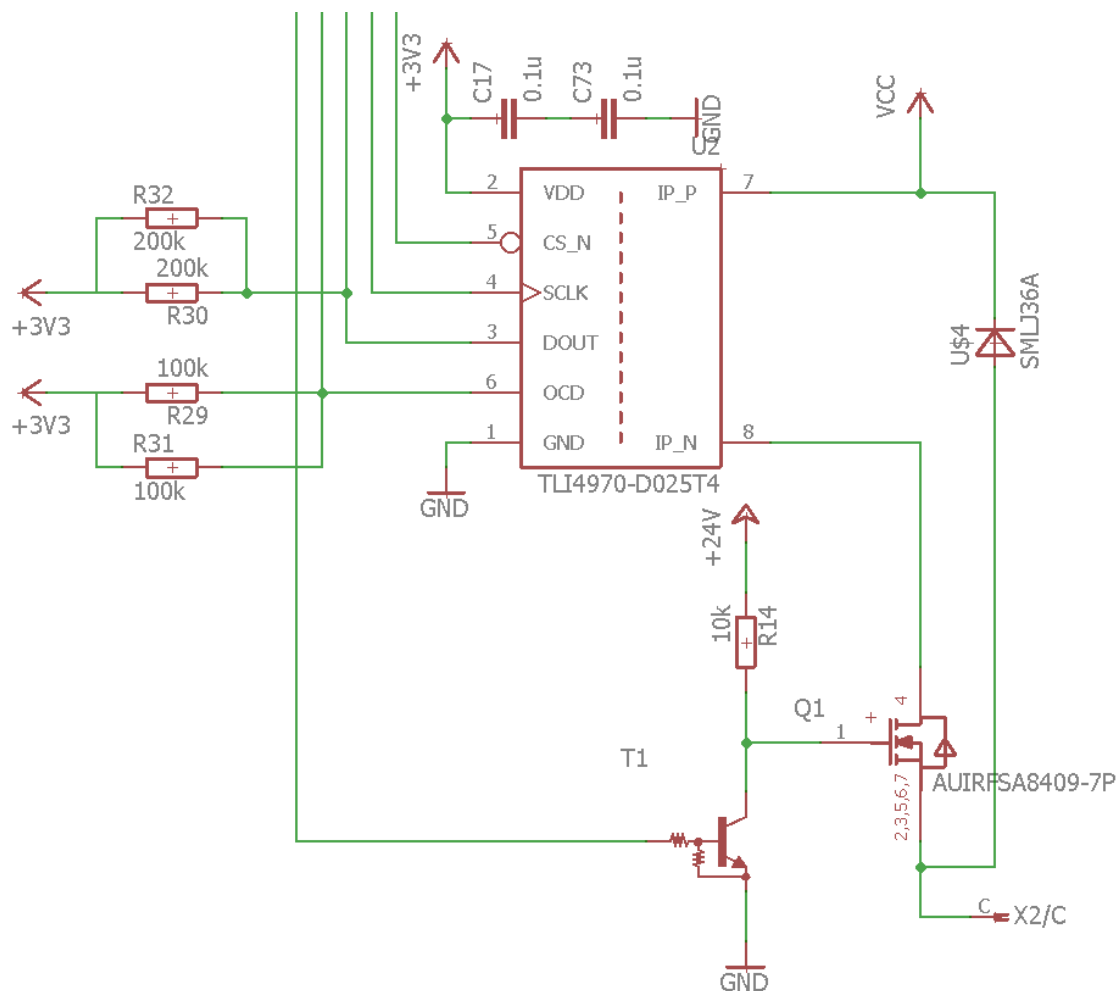
3.4 Nadprúdová ochrana

Nadprúdová ochrana spája dva funkčné bloky a to meranie prúdu a spínanie výstupov. Nadprúdová ochrana má na starosti meranie prúdu, a poskytovanie nameranej hodnoty prúdu mikrokontroléru na vyhodnocovanie a prípadne vypnutie daného výstupu. V prípade prekročenia limitnej hodnoty prúdu má ďalej za úlohu uzemniť jeden pinov mikrokontroléra a tým vyvolať externé prerušenie, ktoré ďalej mikrokontrolér vyhodnocuje.

Ako základ nadprúdovej ochrany bol zvolený integrovaný obvod TLI4970-D025T4 do firmy Infineon, ktorý má za úlohu meranie prúdu pretekajúceho obvodom a vďaka jeho funkcii programovateľnej nadprúdovej ochrany priamo uzemňuje pin mikrokontroléra v prípade prekročenia limitnej hodnoty prúdu. Tento výstup je označený ako OCD. Výstup CS_N slúži k výberu senzoru, s ktorým mikrokontrolér komunikuje, vstup SCLK slúži ako zdroj hodinovej frekvencie pre SPI a výstup DOUT slúži ako dátový výstup senzoru.

MOSFET typu N slúži ako výkonový spínač, ktorý má na starosti spínanie výstupu. Tento tranzistor je udržiavaný v zopnutom stave rezistorom R14, ktorý na jeho gate privádza napätie o 10 V vyššie než je napájacie. V prípade potreby vypnúť výstup mikrokontrolér zopne tranzistor T1, ktorý následne uzemní gate tranzistoru MOSFET a tým ho rozopne.

Vzhľadom k tomu, že väčšina záťaží bude mať induktívny charakter je antiparalelne k výstupu zapojená ochranná dióda typu SMLJ36A, ktorá chráni výkonový MOSFET pred napäťovou špičkou vznikajúcou pri odpájaní induktívnych záťaží.



Obrázok 3.2 Schéma zapojenia prúdovej ochrany

3.4.1 Integrovaný obvod TLI4970-D025T4

Jedná sa o bezjadrový magnetický snímač prúdu založený na princípe Hallovho javu. Diferenciálne meranie umožňuje efektívne potlačiť pôsobenie vonkajších magnetických polí. Bezjadrový princíp merania značnú miniaturizáciu a vyššiu linearitu výstupného signálu bez hysterézie.

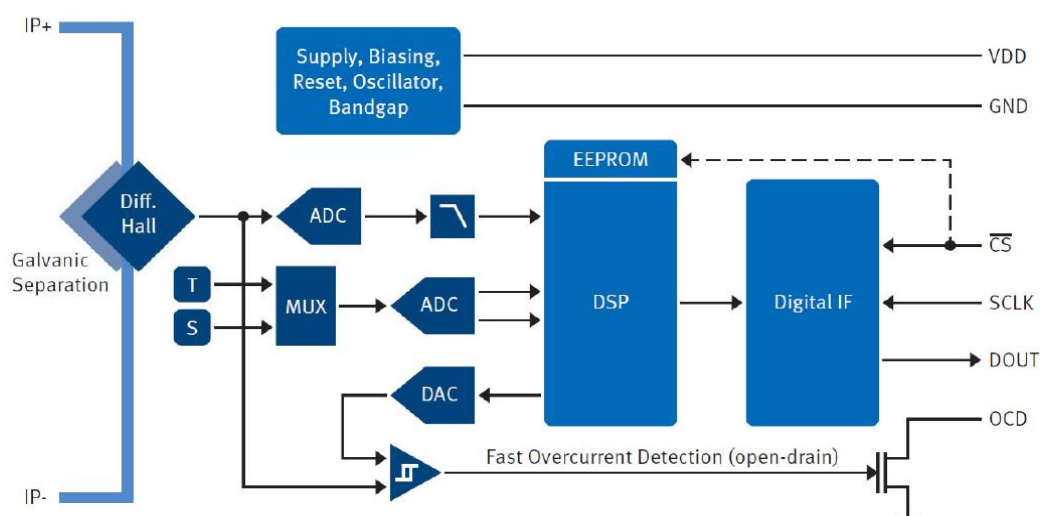
Senzor obsahuje integrovaný AD prevodník s nastaviteľným filtrom čo umožňuje značné zníženie vplyvu rušenia. Ďalej obvod obsahuje indikáciu nadprúdu, ktorú je možné nastaviť zápisom do pamäte EEPROM. To všetko pomáha značnému zmenšeniu výsledného zariadenia.

Okrem informácie o prúde tento senzor vysiela v prípade poruchy, chyby v komunikácii, alebo prekročenia maximálnej povolenej teploty aj správu o tejto udalosti. Softvérové vyhodnocovanie tejto správy umožňuje vypnúť poškodený výstup čo umožňuje zvýšiť bezpečnosť zariadenia.

Nasleduje výpis základných parametrov a bloková schéma obvodu.

Tabuľka 3.2 Prehľad parametrov obvodu TLI4970-D025T4 (prevzaté z [3])

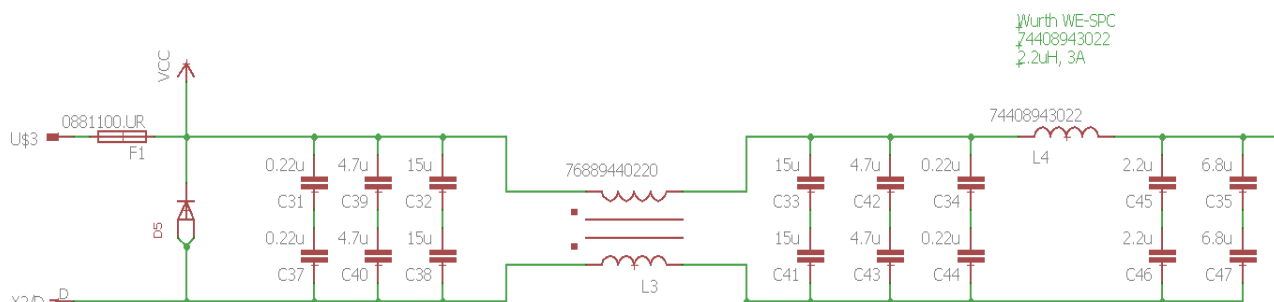
Parameter	Minimálna hodnota	Maximálna hodnota	Jednotka
Napájacie napätie	3,1	3,5	V
Merací rozsah	-25	+25	A
Čas odozvy na prekročenie prúdu	1,5	3,5	μ s
Odpor	0,6	1	m Ω
Presnosť	-1,6	+1,6	% z hodnoty



Obrázok 3.3 Bloková schéma obvodu TLI4970-D025T4 (prevzaté z [3])

3.5 Zdroj

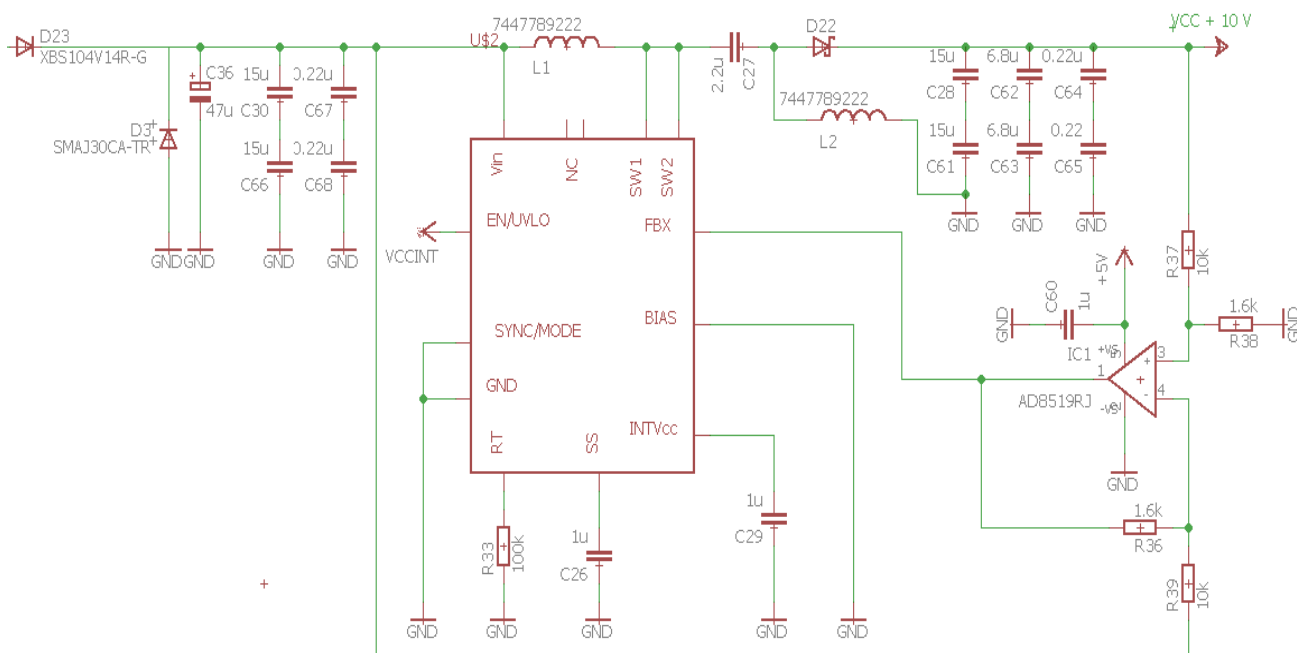
Napájací zdroj zariadenia sa dá rozdeliť na tri základné časti a to na vstupný filter, zdroje 5 V a 3,3 V a zdroj pre spínanie výstupných tranzistorov.



Obrázok 3.4 Filter napájacieho napätia

Prvým blokom zdroja je filter napájacieho napätia. Na vstupe filtra sa nachádza poistka F1 s hodnotou 100 A ktorá chráni elektroniku a aj všetky výstupy v prípade skratu, alebo zlyhania elektronickej nadprúdovej ochrany. Za poistkou sa nachádza paralelne zapojená dióda, ktorej úlohou je chrániť zariadenie pred prepätím, ktoré sa môže v napájaní vozidla vyskytnúť. V tomto bode sa oddeľuje napätie, ktoré pokračuje na výstupy zariadenia.

Ďalej nasleduje skupina filtračných kondenzátorov nasledované tlmivkou na potlačenie súhlasného rušenia a ďalšou skupinou filtračných kondenzátorov. Na konci filtra sa nachádza dolnopriepustný LC filter určený k potlačeniu vysokofrekvenčného rušenia.

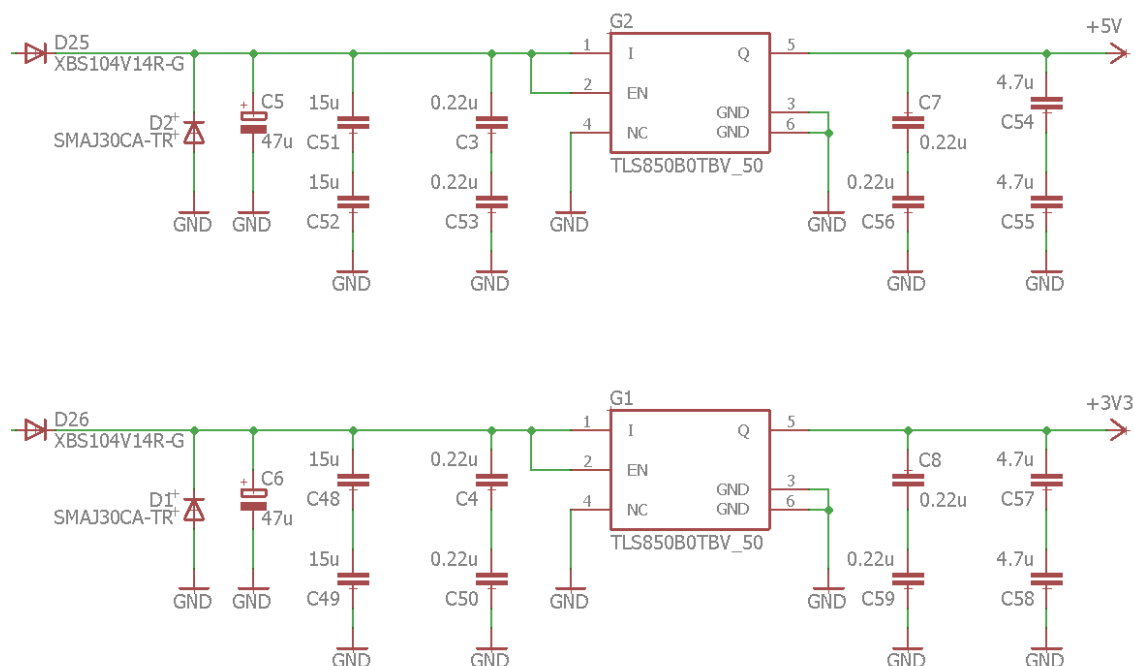


Obrázok 3.5 Zdroj napätia pre spínanie výstupných tranzistorov

Ďalším blokom v zdroji je zdroj napätia pre spínanie výstupných tranzistorov. Základ tohto zdroja tvorí integrovaný obvod LT8331. Na vstupe zdroja sa nachádza dióda D23, ktorej úlohou je chrániť zdroj v prípade prepólovania napájacieho napätia. Nasleduje paralelne zapojená dióda, ktorá chráni zdroj v prípade prepätia. Nasleduje katalógové zapojenie obvodu LT8331 ako zvyšujúceho meniča [6].

Výstupné napätie tohto meniča je určované rozdielovým zosilňovačom IC1 so zosilnením v oboch vetvách nastaveným na 0,16. Obvod LT8331 zvyšuje výstupné napätie kým nedosiahne na vstupe FBX 1,6 V. Táto podmienka sa splní v momente keď bude rozdiel napätí na vstupoch operačného zosilňovača 10 V. To znamená, že tento obvod udržiava na výstupe napätie o 10 V vyššie než napätie vstupné. Maximálne výstupné napätie tohto obvodu je 36 V.

Ďalší pomyselný blok zdroja tvoria zdroje napätí 5 V a 3,3 V, ktoré slúžia k napájaniu mikrokontroléra a senzorov prúdu. Základom týchto zdrojov je integrovaný obvod TLS850B0TB vo variante V50 pre výstupné napätie 5 V a vo variante V33 pre výstupné napätie 3,3 V.

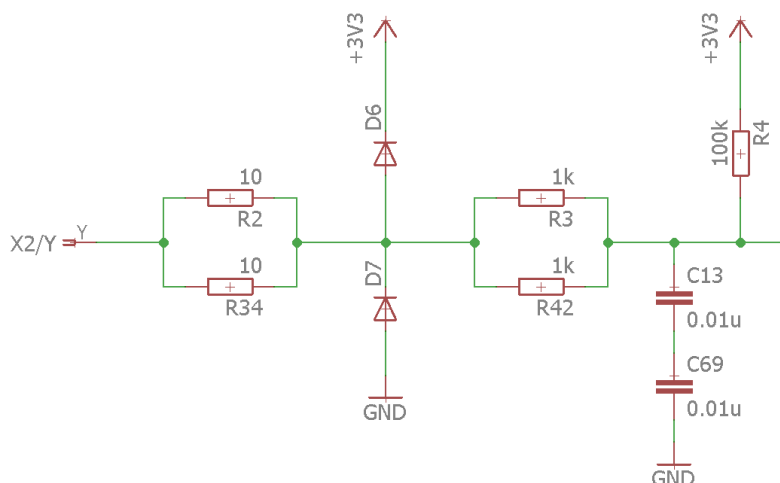


Obrázok 3.6 Zdroje napätí 5 V a 3,3 V

Zapojenie oboch zdroj je v podstate identické, líši sa len použitou verziou regulátora. Rovnako ako pri predchádzajúcom zdroji sa nachádza na vstupe dióda ktorej úlohou je ochrana pred prepólovaním napájacieho napätia. Nasleduje dióda ktorej úlohou je ochrana pred prepätím. Nasleduje filtračný kondenzátor a za ním je katalógové zapojenie obvodu TLS850B0TB.

3.6 Vstupné obvody

Primárnou úlohou vstupných obvodov je ochrana mikrokontroléra pred poškodením. Jedná sa o štyri identické obvody pre každý vstup jeden.



Obrázok 3.7. Vstupný obvod

Na vstupe sa nachádzajú dve diódy D6 a D7, ktoré chránia vstup pred prepätím. Paralelná kombinácia rezistorov R2 a R34 slúži k limitácii prúdu diódami D6 a D7 v prípade prepätia. Nasleduje dolnopriepustný filter tvorený paralelnou kombináciou rezistorov R3 a R42 a sériovou kombináciou kondenzátorov, ktorého úlohou je odstránenie vysokofrekvenčného rušenia. Posledným komponentom pred mikrokontrolérom je pull-up rezistor R4.

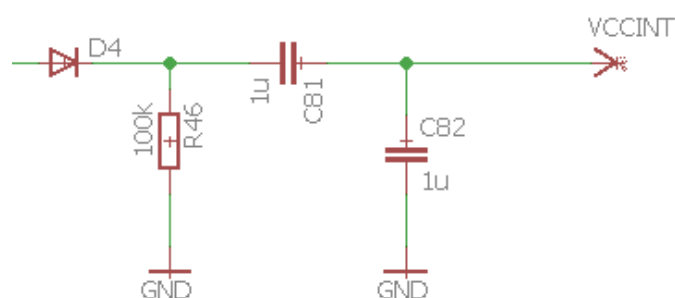
3.7 Mikrokontrolér a CAN vysielateľ

Tento blok je tvorený samotným mikrokontrolérom s pomocnými obvodmi a CAN vysielateľom.

Ako CAN vysielateľ je použitý obvod MCP2562-E/SN v katalógovom zapojení. Jediným rozdielom oproti katalógovému zapojeniu je zapojenie jedného konca terminačného rezistoru na jeden z kontaktov konektoru a linky CANH na druhý. Vďaka tomuto zapojeniu si môže užívateľ vybrať, či chce tento rezistor použiť a v prípade, že áno pre len prepojiť tieto dva kontakty v konektore.

Samotný mikrokontrolér sa nachádza v katalógovom zapojení s krištáľovým oscilátorom. Pripojené sú k nemu dva termistory určené k snímaniu teploty zariadenia. Každý z týchto termistorov je zapojený v deliči napätia s rezistorom pevnej hodnoty zapojeným jedným koncom k napätiu 3,3 V. Následne mikrokontrolér meria napätie na termistore.

Za pozornosť stojí obvod, ktorý vytvára z pulzujúceho výstupu mikrokontroléra jednosmerné napätie približne 1.8 V označené ako VCCINT. Tento obvod je na obrázku 3.8. Pulzujúci výstup spolu s týmto zapojením slúžia ako ochrana v prípade zaseknutia mikrokontroléra. V tomto prípade dôjde zastaveniu pulzovania vstupu mikrokontroléra, tým dôjde k poklesu napätia na výstupe tohto obvodu na 0 V a tým dôjde k vypnutiu zdroja pre spínanie výstupných tranzistorov.



Obrázok 3.8 Obvod povoľovania zdroja pre spínanie výstupných tranzistorov

3.8 Doska plošných spojov

Návrh dosky plošných spojov bol realizovaný v programe Eagle. Doska plošných spojov bola realizovaná ako dvojvrstvá z dôvodu ceny výroby. Pri použití dosky s vyšším počtom vrstiev by bolo možné značné zmenšenie celého návrhu. Riešenie s použitím viacvrstvej dosky by malo zmysel pri sériovej výrobe, ale cena výroby jedného kusu takejto dosky by bola značná.

Plátovanie dosky plošných spojov je zvolené 35 μ m. Hrúbka plátovania je zvolená ako kompromis medzi prúdovou únosnosťou a vyrobiteľnosťou kontaktov pre puzdrá s malou roztečou vývodov ako napríklad puzdro MSE16 integrovaného obvodu LT8331.

Poloha napájacieho a systémového konektora bola pevne daná predpokladaným umiestnením zariadenia vo vozidle. Pri návrhu bolo snahou umiestniť všetky výkonové prvky na jednu stranu dosky z dôvodu jednoduchšej realizácie chladenia a čo najbližší k sebe pre dosiahnutie čo najkratších ciest prenášajúcich vysoký prúd. Pri návrhu bola snaha umiestniť mikrokontrolér, vstupné a komunikačné obvody mimo ciest, ktoré prenášajú vysoký prúd, z dôvodu ochrany pred rušením z týchto výkonových ciest. Zdroje spolu so vstupnými filtrami napájania boli umiestnené do pravej časti dosky plošných spojov.

Hlavná napájacia cesta privádzajúca napájanie z napájacieho konektora bola realizovaná v oboch vrstvách a prepojená sieťou prekovov. tento postup bol zvolený z dôvodu dosiahnutia čo najmenších rozmerov dosky plošných spojov. Cesty od jednotlivých výstupných tranzistorov k systémovému konektoru už sú realizované len v jednej vrstve nakoľko prúd tečúci týmito cestami už nie je zďaleka tak veľký.

Pri umiestňovaní montážnych otvorov bolo brané v úvahu dobrý prítlak výkonových komponentov k obalu zariadenia a zároveň minimálne prehýbanie dosky plošných spojov, ktoré by mohlo viesť poškodeniu komponentov na tejto doske. Rovnako boli umiestnené montážne otvory v oblasti konektorov pre zníženie namáhania dosky plošných spojov pri zapájaní a odpájaní konektorov.

Výsledné rozmery navrhutej dosky plošných spojov sú dĺžka 156 mm a šírka 96 mm. Doska ďalej obsahuje celkovo osem montážnych otvorov pre šraub veľkosti M3. Výsledný návrh dosky plošných spojov je možné vidieť v prílohe.

4 NÁVRH MECHANICKÉHO RIEŠENIA

Základnými vstupnými parametrami pre návrh mechanického riešenia boli požiadavky uvedené na začiatku tejto práce. Ktorými sú odolnosť voči vode a vibráciám, minimálna hmotnosť a rozmery.

4.1 Konektory

Pri výbere konektorov sa vychádzalo z požiadaviek na vode odolnosť, odolnosť, prúdovú zaťažiteľnosť, spoľahlivosť a v neposlednej rade na kompatibilitu so systémom konektorov a rozmerom vodičov používaným vo vozidle. Zároveň bolo snahou minimalizovať počet konektorov kvôli zachovaniu najnižšej možnej hmotnosti zariadenia.

Momentálne je vo vozidle využívaný systém konektorov od spoločnosti Deutsch Autosprot, ktorý je štandardom vo svete motor športu. Tento systém je vode odolný, odolný voči mechanickému namáhaniu a disponuje zaistovaním v zapojenom stave, ktoré je odolné voči vibráciám. Z vyššie uvedených dôvodov boli zvolené konektory z tohto systému.

Pre zaradenie boli zvolené dva konektory. Jeden napájací určený k prívodu napájania k zariadeniu a druhý systémový, ktorý obsahuje vstupy, výstupy a komunikačnú zbernicu CAN.

Ako napájací konektor bol zvolený konektor ASHD214-1PN-016. Jedná sa o jedno kontaktný konektor veľkosti 14, ktorý je schopný preniesť až 200 A čo je pre plánovaný maximálny dober zariadenia 80 A viac než dostatočné.

Ako systémový konektor bol zvolený konektor AS214-19SN. Jedná sa o devätnásť kontaktný konektor veľkosti 14. Tento konektor obsahuje kontakty veľkosti 20 čo znamená, že je schopný kontinuálne preniesť 10 A každým kontaktom a zároveň je možné ho použiť aj s vodičom rozmeru AWG 24. Vďaka tomu môže tento konektor slúžiť zároveň pre výkonové výstupy a aj vstupy a komunikáciu.

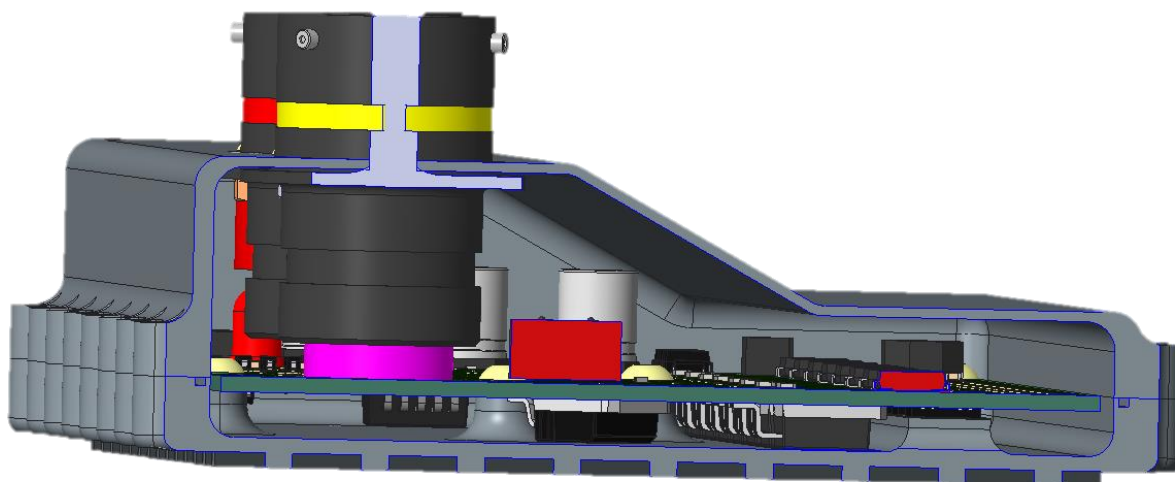
4.2 Mechanický návrh

Požiadavky na obal zariadenia sú nízka hmotnosť, odolnosť voči vode, odolnosť voči vode. Ďalej musí tento obal umožniť chladenie zariadenia, prestup konektorov a svetla z LED indikujúcej stav zariadenia.

Na základe požiadaviek na odolnosť voči vibráciám a vode vychádza ako ideálny materiál na výrobu obalu zariadenia kov. Ďalej je nutné zabezpečiť chladenie komponentov zariadenia. Pre tento účel teda volíme ako materiál obalu zariadenia hliník.

Čo sa týka konštrukčného riešenia tak obal bude z dvoch častí delený v rovine plošného spoja vyrobených frézovaním z hliníku. Plošný spoj bude prichytený v spodnej časti obalu a výkonové tranzistory a senzory prúdu sa budú priamo dotýkať obalu

a využívať ho ako chladič. Toto konštrukčné riešenie je možné vidieť na nasledujúcom obrázku.

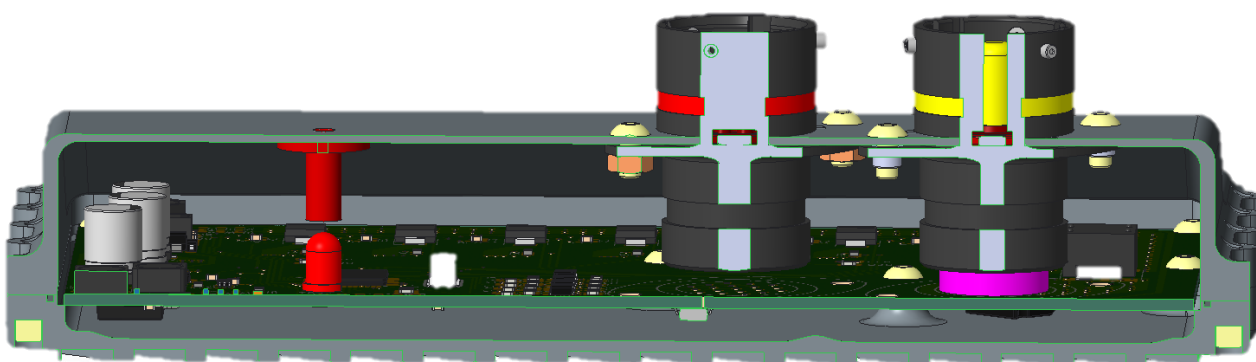


Obrázok 4.1 Rez obalom jednotky riadenia napájania 1

Spodná strana obalu je zároveň opatrená rebrovaním pre zväčšenie plochy a tým zlepšenie chladenia. K spodnej časti obalu sú ešte teplo vodivým lepidlom prilepené termistory, ktoré snímajú teplotu zariadenia.

Spoj oboch polovíc obalu je realizovaný šraubovým spojom a vodotesnosť tohto spoja je zabezpečená tesnením po celom obvode spoja. Konektory sú šraubované do vrchnej časti obalu a tesnená gumovým tesnením medzi telom konektoru a obalom zariadenia.

Poslednou funkciou, ktorú musí obal umožniť je prestup svetla z indikačnej diódy von zo zariadenia tak aby ho používateľ mohol jasne vidieť a zároveň obal ostal vodotesný. Toto je umožnený svetlovodom vlepým do vrchnej polovice obalu presne nad indikačnou diódou. Riešenie je možné vidieť na nasledujúcom obrázku.



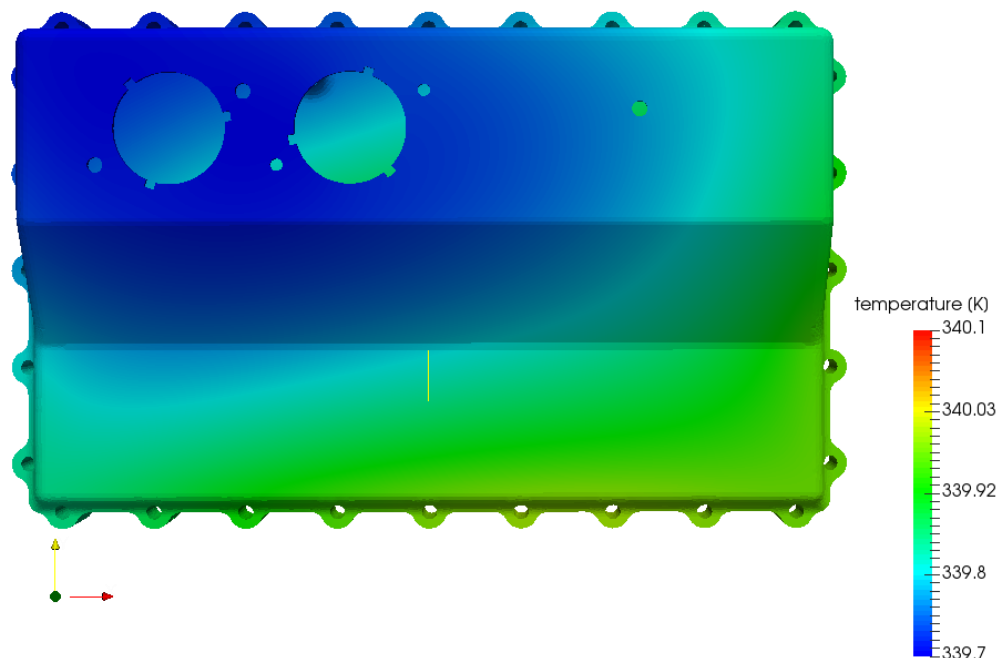
Obrázok 4.2 Rez obalom jednotky riadenia napájania 2

4.3 Termálna analýza

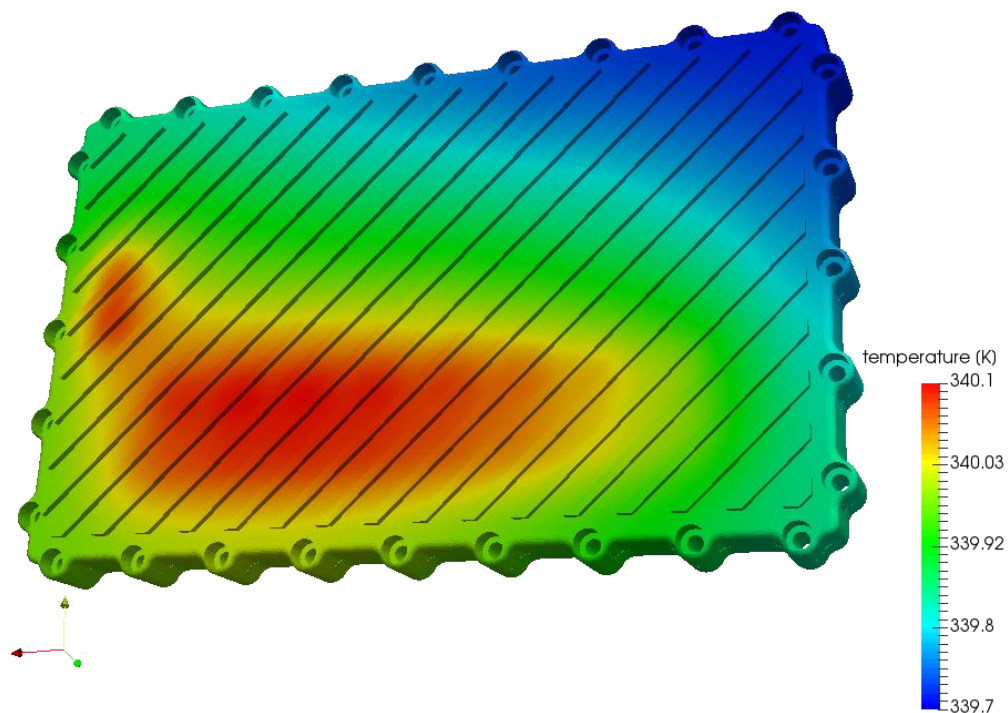
Pre zistenie či je navrhnutý obal zariadenia dostačujúci na uchladenie zariadenia pri plnom odbere bola využitá simulácia prestupu tepla v online simulačnom nástroji Simscales.

Pre simuláciu bol použitý zjednodušený model, v ktorom bol ponechaný len samotný obal zariadenia a všetko ostatné bolo z neho odstránené vzhľadom k minimálnemu vplyvu na výsledky simulácie a značné zrýchlenie výpočtu. Ako vstupné parametre boli zvolené stratový výkon pri maximálnom zaťažení zariadenia a maximálna predpokladaná teplota pracovného prostredia, ktorá je 60°C.

Výsledky z tejto simulácie je možné vidieť na nasledujúcich obrázkoch. Hlavnými zdrojmi tepla sú výstupné tranzistory, senzory prúdu a regulátory napätia. Tieto zdroje tepla boli modelované ako plochy s tepelným tokom definovaným stratovým výkonom daného prvku pri maximálnom zaťažení. Pri predpoklade, že zariadenie nie je v kontakte so žiadnym dobre tepelne vodivým telesom je primárny spôsobom odvodu tepla konvekcia do vzduchu. Odvod tepla zo zariadenia bola teda modelovaná ako konvekcia z celého vonkajšieho povrchu zariadenia do vzduchu s teplotou 60 °C. Vzhľadom k plánovanému umiestneniu zariadenia v miestach s minimálnym prúdením vzduchu bol koeficient prestupu tepla h zvolený ako 4 W/(m²K).



Obrázok 4.3 Simulácia prestupu, tepla vrchná časť zariadenia



Obrázok 4.4 Simulácia prestupu tepla, spodná časť zariadenia

Z výsledkov simulácie je zrejmé, že teplota zariadenia je v najteplejšej oblasti o 7°C vyššia než teplota okolia čo znamená teplotu 67°C na puzdre výkonových prvkov. Táto oblasť sa podľa očakávania nachádza presne pod výstupnými tranzistormi a senzormi prúdu. Rovnako môžeme vidieť odvod tepla od výkonových prvkov obvodu do obalu zariadenia je rovnomerný a rozdiel medzi najteplejšou a najchladnejšou oblasťou je len $0,4^{\circ}\text{C}$.

Z týchto výsledkov môžeme konštatovať, že odvod tepla od výkonových prvkov obvodu je dostatočný a zariadenie sa dokáže uchladiť aj pri maximálnom zaťažení a najnepriaznivejšej predpokladanej vonkajšej teplote.

5 POPIS SOFTVÉROVEJ VÝBAVY

V nasledujúcej kapitole bude popísaný softvér zariadenia. Pre tvorbu softvéru bol zvolený programovací jazyk C a vývojové prostredie MPLAB X IDE s kompilátorom XC8 [7].

Softvér zariadenia je možné rozdeliť do dvoch základných častí a to na časť, ktorá beží v hlavnej programovej slučke a má na starosti príjem vonkajších požiadaviek, a na časť ktorá beží v prerušení s frekvenciou 1 kHz a má na starosti príjem a vyhodnocovanie dát zo senzorov prúdu, meranie teploty a odosielanie stavu zariadenia pomocou zbernice CAN.

5.1 Hlavná programová slučka

Ako už bolo zmienené hlavná programová slučka má za úlohu pri zapnutí zariadenia nastavenie periférie a následne obsluhovanie diskretných vstupov zariadenia a príkazov prijatých cez CAN.

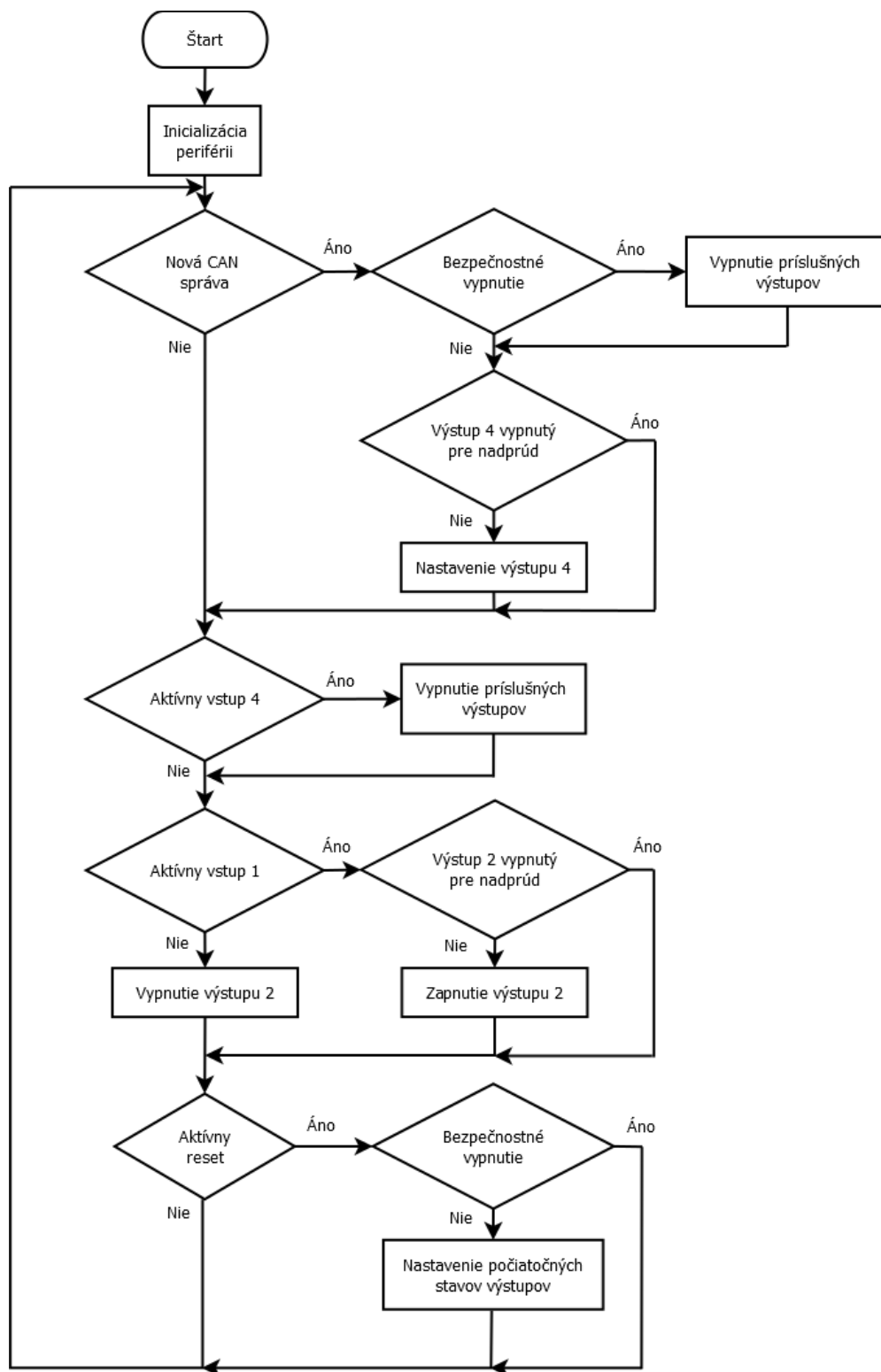
Vývojový diagram hlavnej programovej slučky je možné vidieť na obrázku 5.1. Program začína inicializáciou, ktorá zahŕňa nastavenie portov mikrokontrolér na vstupy a výstupy, nastavenie a inicializáciu protokolu SPI a CAN a nastavenie AD prevodníka a spustenie prevodu pre prvý teplotný senzor. Rovnako sa počas inicializácie nastaví časovač pre generovanie prerušenia s frekvenciou približne 1kHz a stavy výstupov zariadenia sa nastavujú do počiatočného stavu.

Po inicializácii program vstupuje do samotnej slučky. V prvom kroku sa vyhodnotí príchod novej správy. V tomto kroku nie je nutné riešiť identifikátor správy nakoľko filtre periférie CAN sú nastavené tak, že umožnia prijatie správy len z jedným konkrétnym identifikátorom. V prípade že bola správa prijatá nasleduje vyhodnotenie požiadavky na núdzové vypnutie od riadiacej jednotky motora. Ak bola prijatá požiadavka na núdzové vypnutie dôjde k vypnutiu výstupov 1, 2, 3 a k uloženiu informácie o tomto stave. Následne dôjde ku overeniu či nie je výstup 4 vypnutý pre nadprúd, ak tomu tak nie je dôjde k nastaveniu tohto výstupu do požadovaného stavu.

V ďalšom kroku je skontrolovaný stav vstupu 4, ktorý slúži ako vstup pre bezpečnostný okruh a jeho aktivácia má rovnaké následky ako v prípade aktivácie bezpečnostného vypnutia správou prijatou cez CAN. To znamená, že dôjde k vypnutiu výstupov 1, 2, 3 a k uloženiu informácie o bezpečnostnom vypnutí.

Nasleduje kontrola stavu vstupu 1. Tento vstup slúži k pripojeniu prepínača, ktorý ovláda výstup pre palivovú pumpu. V prípade, že je tento vstup aktívny dôjde ku overeniu či nie je výstup 2 vypnutý pre prekročenie prúdu, v prípade, že tomu tak nie je dôjde k zapnutiu tohto výstupu. V prípade, že tento vstup je vypnutý dôjde k vypnutiu výstupu 2.

Posledným krokom tejto slučky je kontrola požiadavky na reset výstupov, ktorá je realizovaná kontrolou vstupu 2, ktorý slúži ako vstup pre resetovacie tlačidlo. V prípade, že je tento vstup aktívny dôjde ku kontrole, že nie je aktívne bezpečnostné vypnutie, nakoľko jediným možným spôsobom ako sa dostať z tohto stavu je vypnutie a zapnutie

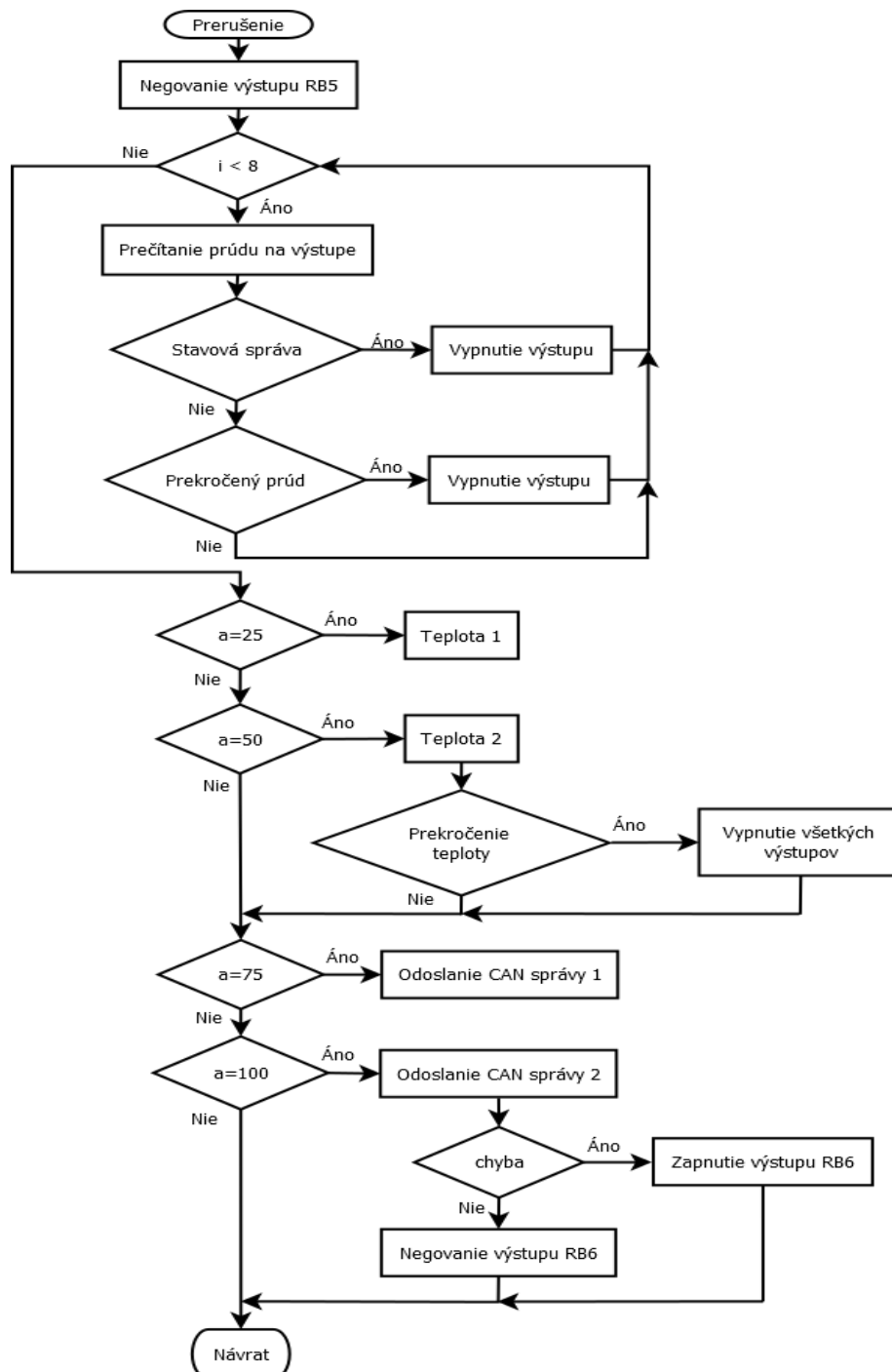


Obrázok 5.1 Vývojový diagram hlavnej slučky softvéru

vozidla. V prípade, že bezpečnostné vypnutie nie je aktívne dôjde k nastaveniu výstupov do počiatočných hodnôt a vymazaniu informácií o prekročení prúdu. Následne program pokračuje do ďalšieho cyklu.

5.2 Kód obsluhujúci prerušenie

K spusteniu tohto kódu dochádza pri každom prerušení či už externom od senzorov prúdu, alebo internom generovanom časovačom s frekvenciou 1 kHz. Kód má na starosti čítanie prúdu zo senzorov, vyhodnocovanie prekročenia prúdu, meranie a vyhodnocovanie teploty. Ďalej je úlohou tejto časti programu odosielanie stavových CAN správ, generovanie pulzujúceho signálu pre zdroj výstupných tranzistorov a riadenie stavovej diódy.



Obrázok 5.2 Vývojový diagram kódu obsluhujúceho prerušenie

Program obsluhujúci prerušenia začína negovaním stavu na výstupe RB5 mikrokontroléra vďaka čomu vzniká na tomto výstupe obdĺžnikový signál s frekvenciou 500 Hz, ktorý je následne využívaný k povolaťovaniu zdroja výstupných tranzistorov.

Nasleduje cyklus čítania prúdov zo senzorov jednotlivých výstupov. Tento cyklus najprv prečíta správu od senzoru daného výstupu. Následne sa vyhodnotí či sa jedná o správu stavovú čo je indikované logickou jednotkou na pozícii najvýznamnejšieho bitu a či sa jedná o prvé čítanie zo senzorov. Stavová správa obsahuje informáciu o chybe senzoru a je senzorom vyslaná raz po zapnutí senzora a následne len v prípade nejakej poruchy senzora. Takže ak sa jedná o stavovú správu a nejedná sa o prvé čítanie zo senzorov je daný výstup vyhodnotený ako chybný a následne vypnutý. Informácia o vypnutí výstupu je následne uložená pre využitie v iných častiach programu. Program následne pokračuje čítaním z ďalšieho senzoru. V prípade, že sa nejedná o stavovú, ale o dátovú správu, čo je indikované nulou na pozícii najvýznamnejšieho bitu, program pokračuje porovnaním aktuálnej hodnoty prúdu a nastavenej maximálnej hodnoty prúdu. Ak je aktuálna hodnota prúdu vyššia než nastavená dochádza k vypnutiu výstupu, uloženiu informácie o vypnutí a pokračuje sa čítaním z ďalšieho senzoru. Ak bol prúd nižší než nastavená hodnota, tak je výstup ponechaný v pôvodnom stave a program pokračuje čítaním prúdu z ďalšieho senzoru.

Po prečítaní a vyhodnotení všetkých výstupov program pokračuje ďalej. V prípade, že hodnota premennej a je rovná 25 dôjde k prečítaniu hodnoty napätia z AD prevodníka ktorá je meraná na termistore. Táto hodnota bude následne využitá pri vyhodnocovaní teploty zariadenia. K čítaniu hodnoty napätia dochádza každých sto prerušení čo znamená, že teplota zariadenia je snímaná s frekvenciou približne 10 Hz. Po prečítaní hodnoty dôjde k prestaveniu AD prevodníka na kanál druhého termistoru a je spustený prevod.

V prípade že hodnota premennej a je rovná 50 dochádza k prečítaniu hodnoty napätia z AD prevodníka nastaveného na druhý termistor. následne je porovnaná hodnota z oboch termistorov z nastavenou maximálnou povolenou hodnotou teploty zariadenia. V prípade prekročenia tejto teploty ktorýmkoľvek termistorom dochádza k vypnutiu všetkých výstupov zariadenia. Opätovné zapnutie výstupy je možné buď aktiváciou resetovacieho vstupu, alebo vypnutím a zapnutím zariadenia.

Ak sa hodnota premennej a bude rovnáť 75 dôjde k odoslaniu CAN správy jedna, ktorá obsahuje priemernú hodnotu teploty z teplôt termistora jedna a dva z posledného čítania, aktuálny stav výstupov a informáciu o prípadných chybách jednotlivých výstupov. Detailný prehľad prijímaných a vysielaných CAN správ je uvedený v prílohe.

Do posledného bloku sa program dostane v prípade, že hodnota premennej a bude rovná 100. V tom prípade dôjde k odoslaniu CAN správy dva, ktorá obsahuje hodnoty prúdov jednotlivými výstupmi prevedenými na 8 bitový formát. Následne je vyhodnotené či bol niektorý výstup označený ako chybný, alebo teplota zariadenia spôsobila vypnutie výstupov. Ak je niektorá z týchto podmienok splnená dôjde k trvalému rozsvieteniu stavovej LED až do momentu odstránenia chyby. Ak ku žiadnej chybe nedošlo je invertovaný stav na výstupe pre túto diódu. To znamená, že ak zariadenie funguje bez chýb tak stavová dióda bliká s frekvenciou približne 10 Hz. Ak dióda trvalo svieti, alebo je trvalo zhasnutá značí to chybu zariadenia. Následne je premenná a vynulovaná.

Posledný krokom je návrat do hlavnej programovej slučky.

6 ZHRNUTIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

V prvej fáze bol navrhnutý obvod zariadenia na ktorom bola následne realizovaná FMEA analýza. Táto analýza bola realizovaná celkovo tri krát. Po každej analýze došlo k úprave obvodu, ktorá viedla k zvýšeniu spoľahlivosti. Celkovo bolo zanalyzovaných 653 rôznych chybových stavov. Vďaka analýze FMEA sa podarilo znížiť celkový počet fatálnych chýb, ktoré by viedli buď k strate významnej funkcie, alebo skratu z počiatočného stavu 54 na finálny stav 14. To znamená, že sa podarilo zvýšiť spoľahlivosť zariadenia o 74% voči počiatočnému stavu.

Nasledoval mechanický návrh, v ktorom boli najprv vybrané vhodné konektory, vybraný vhodný materiál na obal zariadenia a realizovaný samotný návrh obalu. Obal sa podarilo navrhnuť utesnený voči vode čím bola splnená požiadavka zo zadania. Po návrhu nasledovala termálna analýza, ktorú sa podarilo overiť, že zariadenie dokáže fungovať aj pri teplote 60 °C a navyše sa podarilo dosiahnuť dobrej rovnomernosti rozloženia tepla s rozdiel maximálnej a minimálnej teploty len 0,4 °C. Prototyp obalu zariadenia bol následne vytlačený na 3D tlačiarňu a bolo overené, že osadená doska plošných spojov do obalu správne sedí. Fotky obalu je možné vidieť v prílohe tejto práce.

Na prototyp dosky plošných spojov boli najprv osadené zdroje napätí 5 V a 3,3 V a napájacie filtre. Následne bola overená hodnota ich výstupného napätia. Po overení funkčnosti týchto zdrojov bol osadený aj zdroj napätia pre výstupné tranzistory a overené či dokáže udržiavať požadovaný rozdiel medzi vstupným a výstupným napätím v celom rozsahu napájacích napätí. Posledným krokom bola kontrola prítomnosti správnych napätí na správnych kontaktoch integrovaných obvodov. Týmto bola overená správnosť funkčnosti napájacích zdrojov.

Nasledovalo osadenie vstupných filtrov, mikrokontroléru a nahranie jednoduchého programu pre overenie správnej funkčnosti mikrokontroléru a programovacieho rozhrania. Po tomto kroku bol osadený obvod pre komunikáciu cez CAN a overenie funkčnosti odosielania a prijímania správ. Následne boli osádzané senzory prúdu. Vzhľadom k ich problematickému ručnému osádzaniu a náchylnosti na poškodenie pri tomto procese bol vždy osadený jeden senzor overená jeho správna funkčnosť a následne osadený ďalší. Po osadení senzorov a overení ich funkčnosti ostávalo už len osadiť výstupné tranzistory.

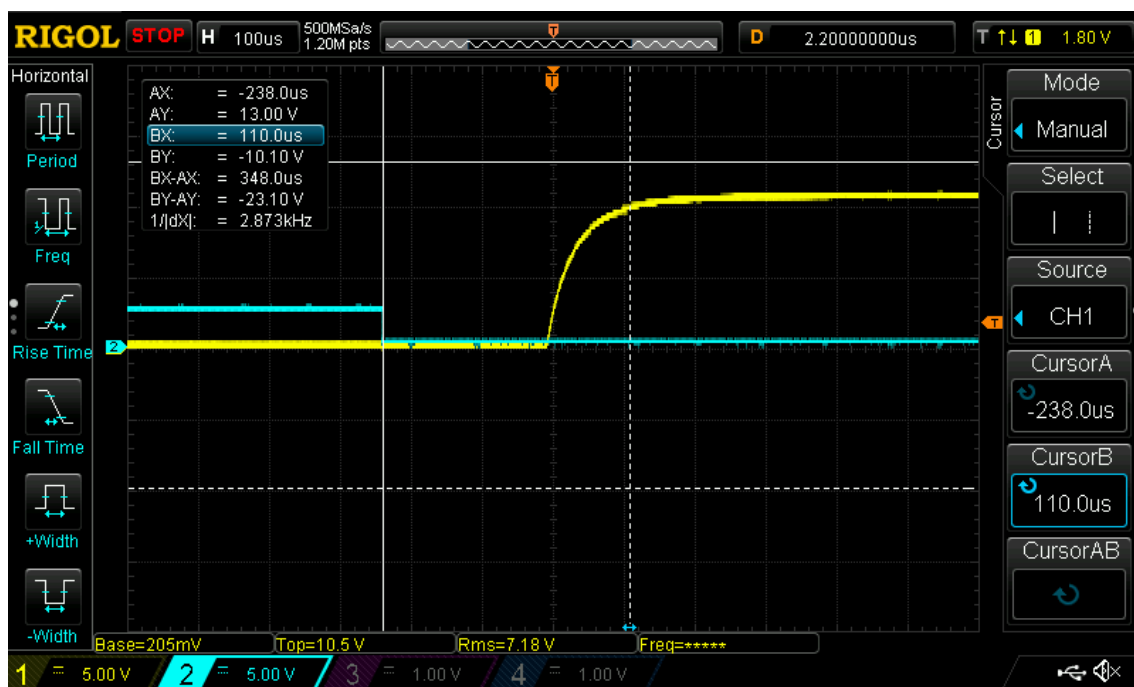
Po kompletnom osadení zariadenia bola overená schopnosť preniesť požadovaný prúd jedným výstupom 10 A. Tento teste prebehol bez najmenších problémov, ale kvôli tomu, že obal zariadenia bol iba prototyp z plastu bol test vykonávaný iba po krátku dobu aby nedošlo k roztaveniu obalu alebo poškodeniu výstupného tranzistoru z dôvodu nedostatočného chladenia.

Následne boli zmerané základné parametre zariadenia. Reakčné doby na nadprúd a zmenu diskretného vstupu boli určené ako priemerná hodnota z nameraných hodnôt. Prehľad dosiahnutých parametrov je zhrnutý v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 6.1 Prehľad dosiahnutých parametrov

Parameter	Hodnota	Jednotka
Presnosť merania prúdu	1,2	% z hodnoty
Reakčná doba na nadprúd	634	μs
Reakčná doba na diskretný vstup	507	μs
Rozsah napájacích napätí	6 - 28	V
Kľudový odber	110	mA
Maximálna pracovná teplota	60	$^{\circ}\text{C}$
Maximálne vonkajšie rozmery	173x107x46	mm
Hmotnosť	419	g

Na nasledujúcom obrázku je možné vidieť meranie odozvy na zmenu na diskretnom vstupe zariadenia. Žltá krivka je výstup zariadenia a modrá je vstup.



Obrázok 6.1 Odozva na zmenu na diskretnom vstupe

7 ZÁVER

V rámci tejto práce bolo navrhnuté a realizované zariadenie schopné merať prúd a následne vyhodnocovať či bol prúd na danom výstupe prekročený nezávisle pre všetkých osem výstupov. Zariadenie obsahujú teplotnú ochranu a je schopné ovládať výstupy na základe diskretných vstupov alebo CAN správy. Zariadenie dokáže komunikovať pomocou komunikačného protokolu CAN. Celkovo je v zariadení k dispozícii osem výstupov pričom všetky vstupy sú navrhnuté s maximálnym prúdom 10 A kvôli vyššej univerzálnosti a možnosti zariadenie použiť aj pri zmenách elektroinštalácie vozidla.

Bol navrhnutý obvod prúdovej ochrany, ktorého jadrom bol zvolený integrovaný obvod TLI4970-D025T4 a výkonový tranzistor typu NMOS. Toto riešenie sa neskôr ukázalo ako nie úplne ideálne nakoľko pre tranzistory NMOS bolo nutné pridať do zapojenia aj zdroj s vyšším výstupným napätím než je to napájacie čo zabralo na doske plošných spojov ďalšie miesto. Rovnako je nevýhodou tohto zapojenia značná cena senzorov prúdu, ktorá sa značne premietne do ceny celého zariadenia vzhľadom k tomu že v zariadení sa týchto senzorov nachádza osem. Pre ďalší vývoj zariadenia bude zrejme zvolené riešenie s inteligentnými výkonovými tranzistormi od rovnakej firmy, ktorých cena je polovičná a zároveň je ich puzdro vhodnejšie pre ručné osadzovanie.

V ďalšej časti práce bol navrhnutý obojstranný plošný spoj s plátovaním 35μm. Táto doska plošných spojov bola následne zadaná do výroby a bola použitá k výrobe prototypu.

Obal zariadenia bol navrhnutý na základe požiadaviek uvedených v úvode. Návrhom obalu sa podarilo splniť všetky uvedené požiadavky. Obal bol navrhnutý z dvoch kusov delených v horizontálnej rovine a spojených šraubovým spojom. Ako materiál bol zvolený hliník vďaka čomu je obal dostatočne odolný a zároveň je ho možné použiť k chladeniu výkonových komponentov obvodu. Návrh bral ohľad aj na vodotesnosť obalu. Obal je tesnený po obvode spoja gumovým tesnením a rovnako tomu je u oboch konektorov. Následne bolo realizovaný prototyp obalu vytvorený 3D tlačou a bolo overené, že osadená doska plošných spojov do obalu pasuje. Tento obal bude následne vyrobený z hliníku a použitý vo vozidle.

Nakoniec bol realizovaný prototyp zariadenia, na ktorom bola overená správna funkčnosť softvéru zariadenia. Na tomto prototypu nie sú vzhľadom k cene osadené všetky senzory prúdu, ale iba dva, z ktorých bola čítaná hodnota osem krát, aby sa tak simuloval beh programu s plným počtom senzorov. Správnu funkčnosť zariadenia sa na tomto prototypu podarilo overiť. Vzhľadom k tomu, že sa podarilo overiť bezproblémovú funkčnosť zariadenia s dvomi senzormi tak budú v budúcnosti doplnené chýbajúce senzory prúdu a zariadenie bude otestované priamo vo vozidle.

V práci sa podarilo dosiahnuť všetky požiadavky uvedené v prvej kapitole tejto práce. Čo znamená, že zariadenie bude dokončené do finálnej podoby a nasadené do testovacej prevádzky do vozidla.

LITERATURA

- [1] LAWRENZ, Wolfhard, ed. *CAN System Engineering*. London: Springer London, 2013. ISBN 978-1-4471-5612-3.
- [2] EDITED BY JOHN G. WEBSTER a Halit EREN. *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2014. ISBN 978-1-4398-48937.
- [3] INFINEON. *TLI4970-D025T4* [online]. Munich, 2016, 31s [cit. 10.4.2018]. Rev. 1.1. Dostupné z : <https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/magnetic-current-sensor/tli4970-d025t4/>
- [4] MICROCHIP. *PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet* [online]. California, 2009, 490s. [cit. 22.4.2018]. Dostupné z: www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F4480
- [5] FORMULA STUDENT GERMANY. *FS-Rules_2018* [online]. [cit. 3.2.2018]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [6] LINEAR TECHNOLOGY. *LT8331* [online]. California, 2016, 30s. [cit. 22.4.2018]. Rev. A. Dostupné z: www.linear.com/LT8331
- [7] MICROCHIP. *MPLABX XC8 C Compiler User's Guide* [online]. U.S.A., 2012, 606s. [cit. 15.5.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/50002053g.pdf>

ZOZNAM SKRATIEK

<i>CAN</i>	<i>Controller Area Network</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>USART</i>	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter</i>
<i>SOF</i>	<i>Start Of Frame</i>
<i>SRR</i>	<i>Substitute Remote Request</i>
<i>IDE</i>	<i>Identifier Extension bit</i>
<i>RTR</i>	<i>Remote Transmission Request</i>
<i>DLC</i>	<i>Data Length Code</i>
<i>CRC</i>	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
<i>ACK</i>	<i>Acknowledgement</i>
<i>EOF</i>	<i>End Of Frame</i>
<i>IFS</i>	<i>Inter Frame Space</i>
<i>SPI</i>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>EEPROM</i>	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
<i>ADC</i>	<i>Analog-to-Digital converter</i>
<i>AD</i>	<i>Analog-to-Digital</i>
<i>FMEA</i>	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
<i>MOSFET</i>	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor</i>
<i>NMOS</i>	<i>N-type Metal-Oxide-Semiconductor</i>

ZOZNAM PRÍLOH

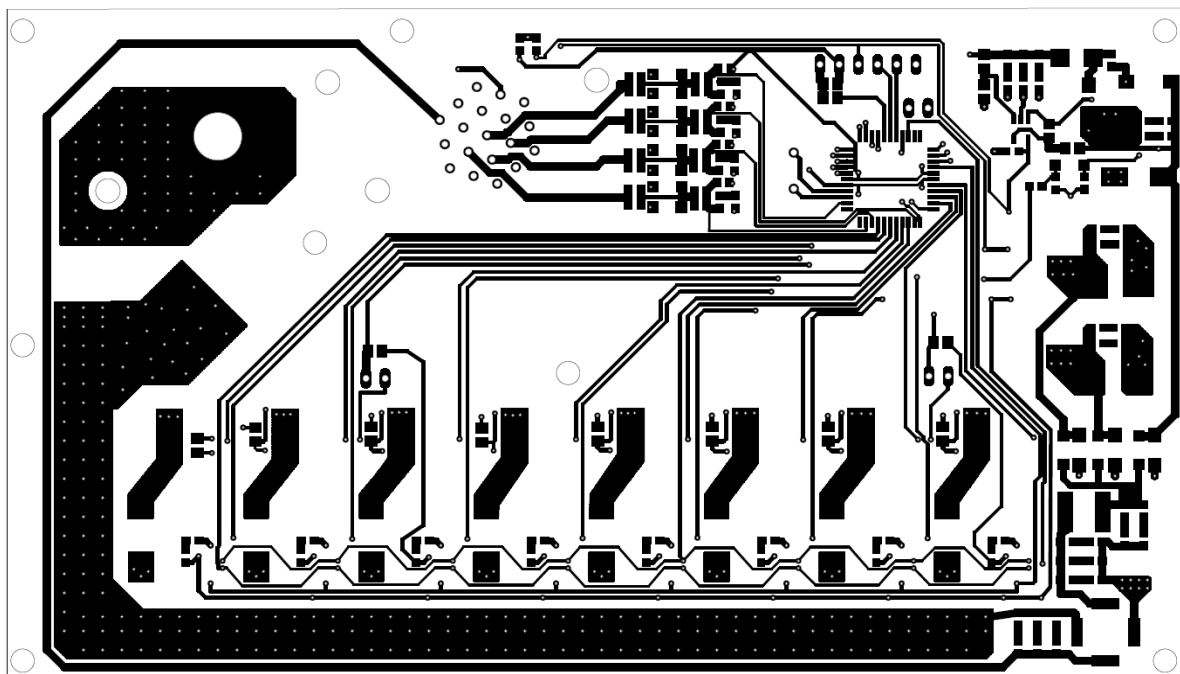
A Doska plošných spojov

- A.1 Doska plošných spojov – strana top
- A.2 Doska plošných spojov – strana bottom
- A.3 Osadzovací plán dosky plošných spojov – strana top
- A.4 Osadzovací plán dosky plošných spojov – strana bottom

B Obsah priloženého DVD

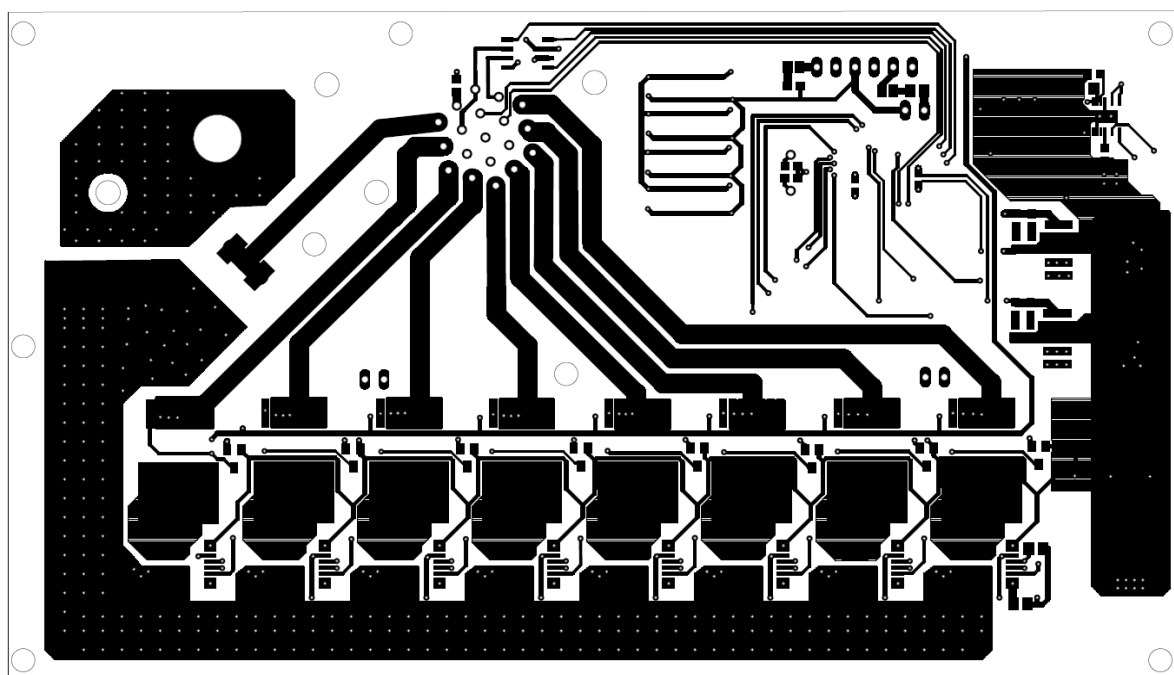
A Doska plošných spojov

A.1 Doska plošných spojov – strana top



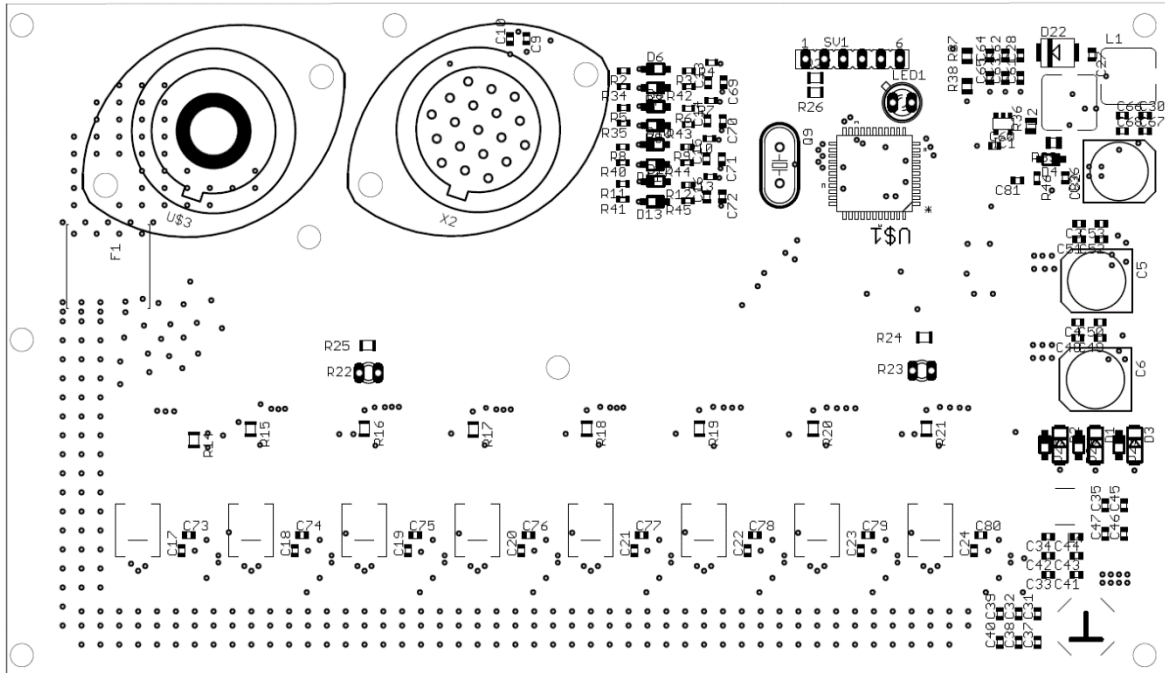
Rozmer dosky 156 x 96[mm], merítok M1:1

A.2 Doska plošných spojov – strana bottom

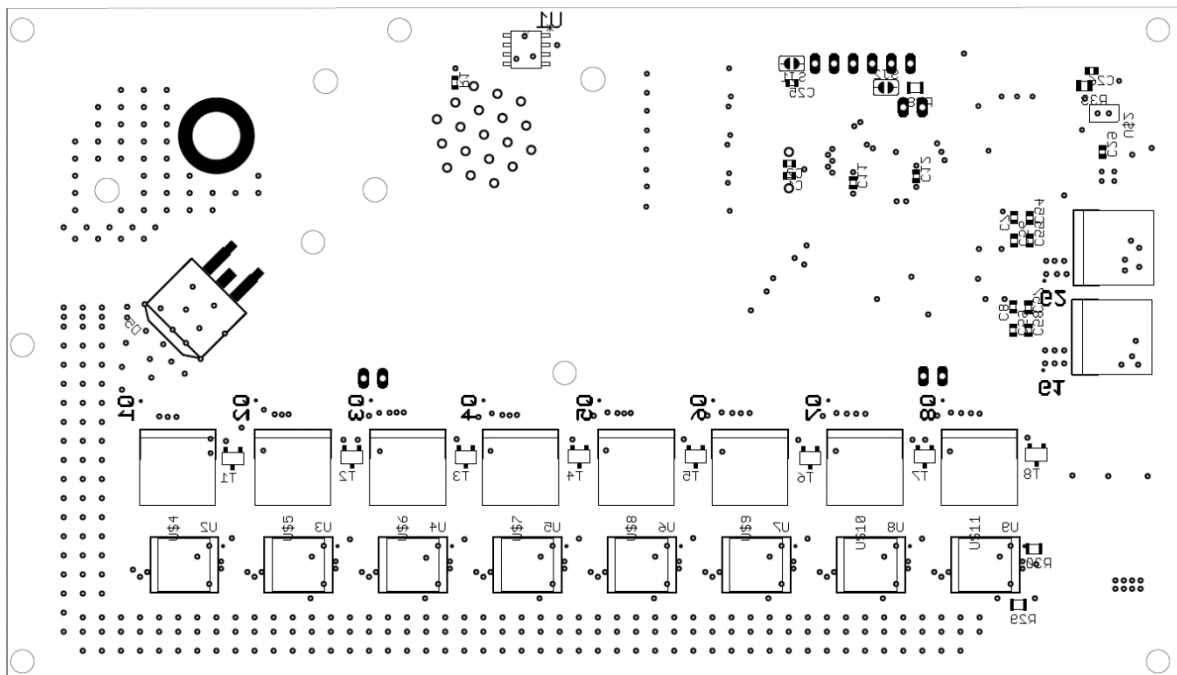


Rozmer dosky 156 x 96[mm], merítok M1:1

A.3 Osadzovací plán dosky plošných spojov – strana top



A.4 Osadzovací plán dosky plošných spojov – strana bottom



B Obsah priloženého DVD

Priložené DVD obsahuje nasledujúce položky:

- Elektronickú verziu bakalárskej práce vo formáte .pdf
- Schému a dosku plošných spojov v programe Eagle
- Celkový model zariadenia vo formáte .stp
- Výkresy obalu zariadenia
- Zoznam súčiastok
- FMEA analýzu
- Zdrojový kód zariadenia v programe MPLAB X IDE
- Popis CAN správ
- Fotografie prototypu zariadenia