

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

VOJTĚCH ZATLOUKAL

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Inovace hardwaru řídicí jednotky pohonu pro studentský
experimentální elektromobil

Vojtěch Zatloukal

Bakalářská práce

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Zatloukal**
Osobní číslo: **D13236**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Inovace hardwaru řídicí jednotky pohonu pro studentský experimentální elektromobil.**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte a posléze zrealizujte interface řídicí jednotky pohonu studentského experimentálního elektromobilu.

Úkolem bakaláře bude:

- 1) Seznámit se celou technologií experimentálního elektromobilu, především pak se stávajícím hardwarovým řešením řídicí jednotky pohonu.
- 2) Navrhnout obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů.
- 3) Navrhnout kompletní obvodové řešení hardwaru rozhraní.
- 4) Návrh a realizace desky plošných spojů.
- 5) Oživení celé řídicí jednotky v laboratoři.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.

LEUCHTER, Jan. UNIVERZITA OBRANY. Výkonové polovodičové měniče [pdf.] Brno, 2011, 106 s. [cit. 25. 10. 2015]

VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.

DOSTÁL, Jiří. Operační zesilovače. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, xxix, 504 s. ISBN 80-7300-049-0.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Lelek, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:


21. února 2017

Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2017


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.


Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 17. března 2017

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Tomáši Lelkovi, Ph.D za pomoc, připomínky a rady ve všech částech této práce. Také mu děkuji za čas, který mi věnoval při výrobě plošného spoje, následném měření a oživování. Dále bych rád poděkoval Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě za poskytnutí prostor, materiálu a vybavení nutného pro realizaci této práce. V neposlední řadě děkuji svým spolužákům, kamarádům a rodině za veškerou podporu a rady

Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací hardwaru řídicí jednotky pohonu studentského experimentálního elektromobilu. V práci je nejdříve popsána funkce hlavní řídicí jednotky a její historický vývoj. Dále je popsán výběr vhodných součástí nutných k fungování periferních obvodů, které zajišťují správnou činnost jednotky. Následuje rozbor periferních obvodů samotných a v poslední řadě je popsána zvolená technologie výroby a rozmístění obvodů na DPS. Na konci práce je uvedeno hardwarové nastavení jednotky a testování v laboratoři.

Klíčová slova

Řídicí jednotka, periferní obvody, hardware, experimentální elektromobil

Title

The hardware innovation of the electronic control unit for the student experimental electric vehicle

Annotation

This thesis deals with design and implementation of hardware control units drive student experimental electric vehicle. The thesis first describes the function of the main control unit and its historical development. It also describes the selection of suitable components required for the functioning of peripheral circuits to ensure proper operation of the unit. Following analysis of the peripheral circuits themselves. Finally, it describes the chosen technology of production and distribution of circuits on PCBs. There is specified hardware unit setting and testing in the laboratory at the end of the work.

Keywords

Control units, peripheral circuits, hardware, experimental electric vehicle

Obsah

Úvod	- 9 -
1 Řídicí jednotka jako součást experimentálního vozidla	- 10 -
1.1 Seznámení s hlavními bloky	- 10 -
1.1.1 Pomocná řídicí jednotka	- 11 -
1.1.2 Hlavní řídicí jednotka	- 11 -
1.2 Měření zpětnovazebních signálů	- 12 -
1.3 Historický vývoj hlavní řídicí jednotky	- 13 -
1.3.1 První generace	- 13 -
1.3.2 Druhá generace	- 14 -
1.3.3 Třetí generace	- 14 -
2 Hardware řídicí jednotky	- 16 -
2.1 Volba součástkové základny	- 16 -
2.1.1 AD převodník	- 16 -
2.1.2 Napájecí zdroj	- 18 -
2.1.3 Obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů	- 19 -
2.1.4 Spínače budičů výkonového modulu	- 19 -
2.1.5 Převodník linky UART na RS-232	- 20 -
2.1.6 Obvod pro bezpečné uvedení vozidla do provozu	- 21 -
2.2 Popis navržených schémat	- 22 -
2.2.1 AD převodník	- 22 -
2.2.2 Napájecí zdroj	- 24 -
2.2.3 Obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů	- 24 -
2.2.4 Spínače budičů výkonového modulu	- 28 -
2.2.5 Převodník linky UART na RS-232	- 31 -
2.2.6 Obvod pro bezpečné uvedení vozidla do provozu	- 31 -
2.2.7 Zpracování signálu z plynové rukojeti	- 34 -

2.2.8	Blokace od nabíječe.....	- 35 -
2.2.9	Světelná indikace stavu jednotky	- 36 -
2.3	Návrh a výroba desky plošných spojů	- 38 -
3	Funkční testy sestaveného hardwaru	- 40 -
3.1	Spínače budičů výkonového modulu	- 40 -
3.2	Světelná indikace stavu jednotky	- 41 -
3.3	AD převodník.....	- 41 -
3.3.1	Příklady výpočtů.....	- 41 -
	Závěr.....	- 42 -
	Seznamy	- 44 -
	Seznam použité literatury	- 44 -
	Seznam obrázků	- 46 -
	Seznam rovnic	- 47 -
	Seznam tabulek.....	- 47 -
	Seznam příloh.....	- 47 -
	Přílohy	- 48 -

Úvod

V dnešní době je stále aktuálnější a naléhavější téma ekologie. Požadavky na co nejnižší spotřebu energií a s tím související produkci škodlivin se projevují všude. Jedním z odvětví, kde se limity stále zpřísnují a nebude trvat dlouho, až již nebude možné je splnit, je automobilový průmysl. Zde se stále více výrobců začíná zabývat otázkou elektromobility. Od počátku automobilismu byl největším problémem zdroj energie. Dříve bylo uchování elektrické energie ve větším množství nemožné, proto byl vyvinut spalovací motor. Elektrický pohon se tedy uplatnil jen v provozech, kde bylo možné neustálé napájení z elektrické sítě. Jedná se především o dráhu a městskou hromadnou dopravu. Dnes vyráběné baterie již jsou schopné pojmout dostatečné množství energie k provozu elektromobilu i na několik set kilometrů. Nelze opomenout ultrakapacitory, které dokáží pojmout energii vzniklou při brzdění vozidla, a tím dojezd ještě prodloužit. Vývoj však zaznamenaly i samotné elektromotory. Dnes vyráběné synchronní motory s permanentními magnety mají mnohem menší rozměry a především hmotnost při stejném výkonu, než například stejnosměrné motory využívané dříve v drážní dopravě.

Všechny tyto zmíněné faktory tedy přispívají k vývoji elektromobilů. Ovšem podstatný vliv na spotřebu elektrické energie, a tedy na dojezd, má i samotné řízení motoru. Proto se Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice, konkrétně Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky, rozhodla vytvořit vlastní experimentální vozidlo.

Projekt studentského experimentálního elektromobilu byl započat již v roce 2012. Důvodem bylo detailní prozkoumání a zdokumentování vývoje takového vozidla. Zejména potom energetických vlastností, trakční dynamiky a řídicích systémů. Veškeré práce byly prováděny formou ročníkových projektů a diplomových prací. Od počátku vývoje se na vozidle provedla celá řada úprav a postupně jsou řešeny konkrétní funkcionality vozidla dle jejich priorit.

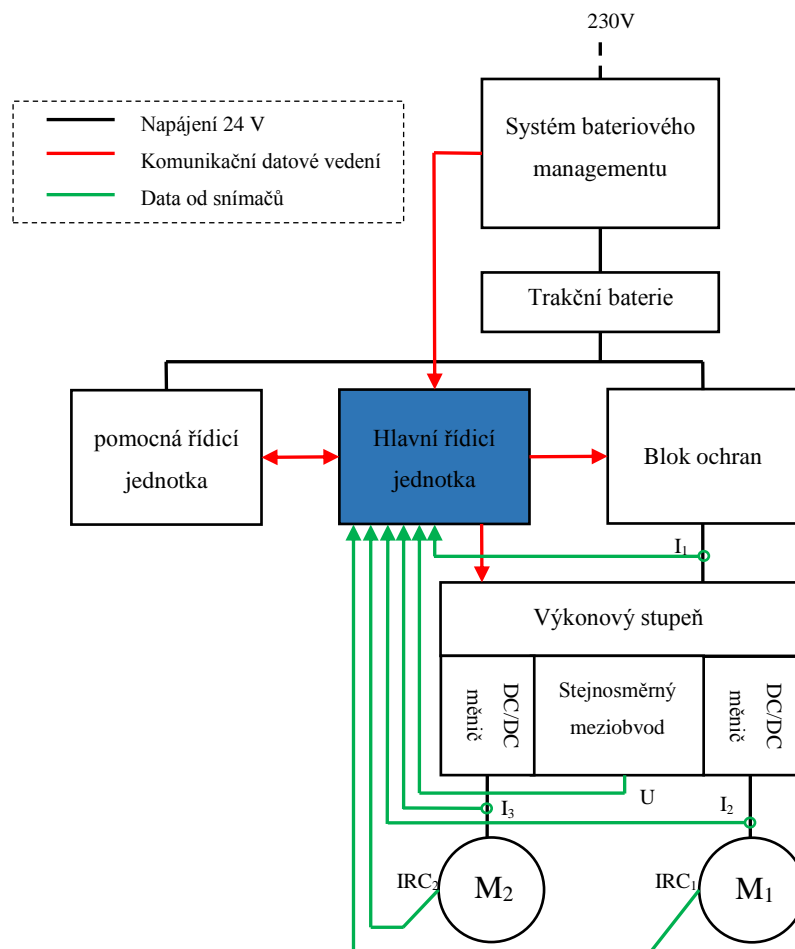
Tato práce se zabývá inovací řídicí jednotky pohonu. První kapitola je věnována seznámení s elektrickou výzbrojí vozidla a stručnému popisu řídicí jednotky. V druhé polovině první kapitoly je poté uveden historický vývoj řídicí jednotky za dobu vývoje vozidla. V druhé kapitole je popsán výběr vhodných součástí pro správnou funkci jednotky. Následuje popis obvodového řešení jednotlivých periferních obvodů. Na konci kapitoly je popsáno rozmístění obvodů na desce plošných spojů a zvolená technologie výroby. V poslední kapitole jsou uvedeny výsledky laboratorního testování a nastavení řídicí jednotky.

1 Řídicí jednotka jako součást experimentálního vozidla

1.1 Seznámení s hlavními bloky

Řídicí jednotka, jak již napovídá její název, má na starosti veškeré činnosti spojené s řízením chodu vozidla. Ve skutečnosti jsou na vozidle osazeny dvě řídicí jednotky, z nichž jedna je hlavní a druhá pomocná.

Dále na vozidle najdeme systém bateriového managementu [2], který se stará o provoz baterií. Obstarává tedy dohled nad dobíjením a provozními stavy. Blok ochran [1] má na starost přerušení napájení motorů při poruše či nedefinovaných stavech. Výkonový stupeň [3] obsahuje DC/DC měniče a měřící obvody. Motory jsou tedy napájeny a řízeny z těchto měničů, které jsou zpětnovazebně řízeny hlavní řídicí jednotkou. Na obrázku 1 je blokové schéma uspořádání elektrické výzbroje. Dále budou stručně popsány jen řídicí jednotky. Ostatní bloky byly podrobně řešeny v diplomových a ročníkových pracích mých předchůdců.



Obrázek 1: Blokové schéma uspořádání elektrické výzbroje

1.1.1 Pomocná řídicí jednotka

Hlavním smyslem pomocné řídicí jednotky je obsluha senzoru natočení řídítek, jehož údaj slouží pro řízení elektronického diferenciálu. Především proto byla tato jednotka zavedena. Za současného vývojového stavu vozidla však pouze zprostředkovává komunikaci mezi uživatelem a vozidlem.

Mikrokontrolér komunikuje po sériovém kanále UART. Data jsou potom odesílána do hlavní řídicí jednotky po sběrnici RS-232. O převod linky UART na RS-232 se stará obvod MAX3232. Zpět z hlavní řídicí jednotky jsou posílána data vypovídající o celkovém stavu vozidla, jako je odebíraný proud z trakčních baterií, proud odebíraný každým motorem, napětí ve stejnosměrném meziobvodu nebo otáčky motoru. Tato data pomocná řídicí jednotka pak může zobrazovat na display nebo zapisovat na SD kartu.

Displej neslouží jen k zobrazování dat o provozu, ale pomocí čtyř tlačítek umístěných na zobrazovacím a komunikačním panelu lze provádět také základní komunikaci mezi uživatelem a hlavní řídicí jednotkou.

1.1.2 Hlavní řídicí jednotka

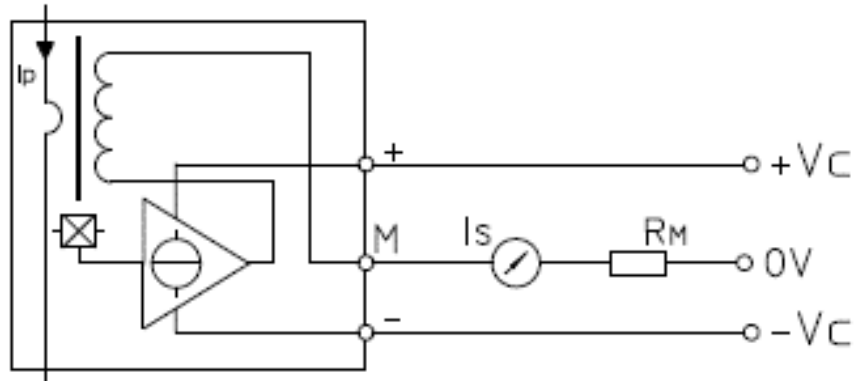
Hlavní řídicí jednotka má za úkol regulovat moment jednotlivých motorů dle polohy plynové rukojeti, v podstatě tedy dle požadavku uživatele. Signál z plynové rukojeti je zpracováván v interním AD převodníku hlavní řídicí jednotky. Navzorkovaný signál je vyhodnocen a pomocí pulzní šířkové modulace (PWM) jsou potom spínány budiče výkonových tranzistorů a následně samotné výkonové tranzistory (pulzní měnič).

K tomuto účelu by posloužil jakýkoliv jednoduchý mikrokontrolér (MCU). Řízení motorů však není takto přímočaré. Probíhá totiž ve zpětnovazební regulační smyčce, takže výsledný moment zrychlení každého motoru je ovlivněn zpětnovazebními signály (hodnotou napětí ve stejnosměrném meziobvodu, hodnotou odebíraného proudu, celkovým odebíraným proudem z trakční baterie a otáčkami motoru).

Při poruše nebo při nějakém nedefinovaném stavu, respektive při hodnotách proudu či napětí mimo předem určený interval, dojde k akčnímu zásahu a pomocí bloku ochran dojde k odpojení elektromotorů pomocí trakčního relé. Dále do tohoto procesu může zasáhnout systém bateriového managementu. Ten má na starosti nejen nabíjení trakčních baterií, ale při provozu kontroluje jejich teplotu, minimální a maximální napětí článku a případně provede zásah do regulační smyčky.

1.2 Měření zpětnovazebních signálů

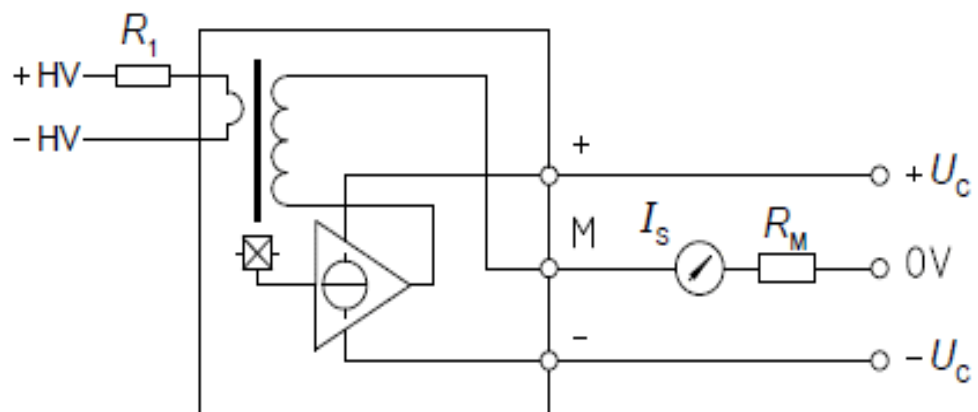
Pro měření proudu slouží tzv. LEM sonda. V podstatě se jedná o Hallův článek s integrovaným regulátorem pro napájení kompenzačního vinutí. Přesné označení tohoto čidla je LA55-P. Sonda je schopna měřit proudy v rozsahu až ± 70 A s převodním poměrem 1:1 000 [4]. Na obrázku 2 je uvedeno vnitřní zapojení této sondy.



Obrázek 2: Vnitřní zapojení proudové sondy LA55-P [4]

Na výstupním pinu M dostáváme poměrně zmenšený proud I_s vzhledem k vstupnímu proudu I_p . Zapojením definovaného odporu R_M jsme schopni měřit úbytek napětí odpovídající zmenšenému proudu I_s . Sonda je průvlakového typu. Tedy vodič s měřeným proudem se provlékne otvorem v sondě.

K měření napětí ve stejnosměrném meziobvodu slouží sonda LV25-P, také od společnosti LEM. Sonda je schopná měřit napětí až 500 V s převodním poměrem 2 500:1 000 [5]. Na obrázku 3 je uvedeno vnitřní schéma sondy.



Obrázek 3: Vnitřní zapojení napěťové sondy LV25-P [5]

Vnitřní zapojení napěťové sondy je prakticky totožné s předchozí proudovou sondou. Odlišnost patrná z obrázku je v odporu R_1 , který musí být vřazen na vstup sondy. Jedná se o odpor definované velikosti, který v podstatě převede měřené napětí na proud. Ten je změřen Hallovou sondou a na výstupním pinu M dostáváme opět výstupní proud I_s . Pomocí měřicího odporu R_M dostaneme napětí úměrné vstupnímu měřenému napětí. Všechny sondy popsané výše jsou napájeny 15 V ze zdroje umístěného přímo ve výkonovém stupni.

Pro měření otáček motoru je použit inkrementační rotační snímač (IRC). Výstup z tohoto snímače je již digitální. Princip tohoto měření je podrobně popsán v diplomové práci „Elektrický pohon bateriového studentského experimentálního elektromobilu“ [1] od Ing. Tomáše Lelka, Ph.D.

Měřicí sondy jsou umístěny buď ve výkonovém stupni v případě LA55-P a LV25-P, nebo přímo na motoru v případě IRC. Do řídicí jednotky jsou tedy přivedeny signály z těchto sond a je nutné je dále nějak upravit a zpracovat. Obvody k tomu určené budou popsány v oddílech 2.1.3 a 2.2.3.

1.3 Historický vývoj hlavní řídicí jednotky

Hlavní řídicí jednotka prošla několika nutnými obměnami a úpravami, z nichž poslední se zabývá právě tato práce. Obměny se týkaly především zvoleného mikrokontroléru a příslušných periférií. Tato obměna s sebou samozřejmě vždy nesla i nový návrh desky plošných spojů.

1.3.1 První generace

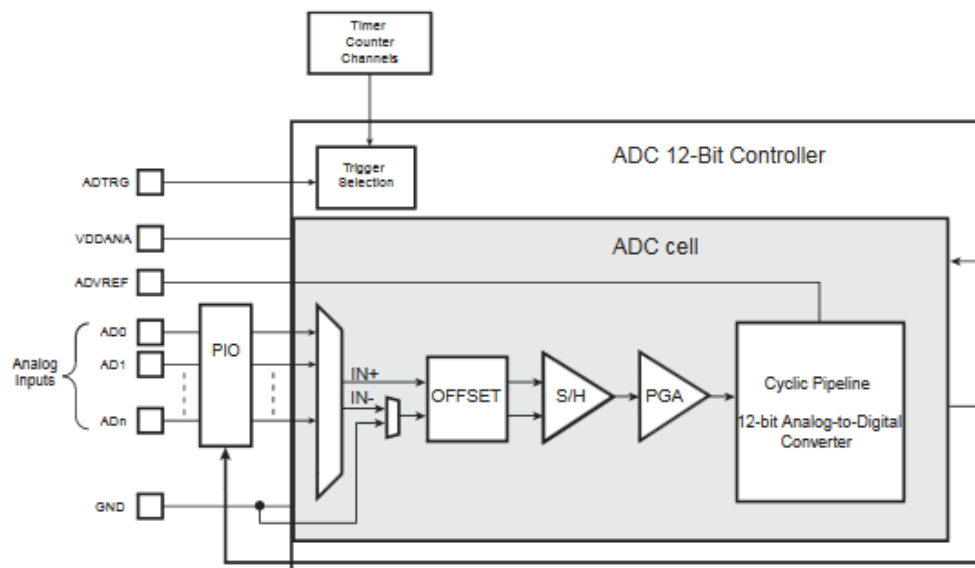
První řídicí jednotka [1] byla osazena mikrokontrolérem značky Atmel. Jednalo se o typ AtMega128A. Je to osmibitový mikrokontrolér založený na platformě AVR. Taktován byl externím krystalovým oscilátorem na frekvenci 12 MHz. To znamená, že zpracovával dvanáct milionů instrukcí za vteřinu. Procesor disponuje osmi analogovými vstupy typu single ended. Tyto vstupy jsou přes multiplexer obsluhovány interním 10bitovým AD převodníkem. Převodník je typu SAR (s postupnou aproximací), což znamená, že před samotným AD převodníkem je vřazen obvod sample and hold. Právě AD převodníky sloužící pro zpracování zpětnovazebních signálů a taktovací frekvence se ukázaly jako nedostatečné. Byla tedy vyrobena nová řídicí jednotka.

1.3.2 Druhá generace

Druhá generace řídicí jednotky byla osazena platformou Arduino Due. Tato platforma je osazena 32bitovým mikrokontrolérem SAM3X8E architektury ARM. Procesor je taktován na 84 MHz a má 12 analogových vstupů opět přes multiplexer obsluhovaných 12bitovým SAR AD převodníkem. Již z taktovací frekvence a rozdílné architektury je patrný ohromný rozdíl ve výkonnosti procesoru, co se zpracování dat týče. Také vzorkování a převod zpětnovazebních signálů je kvalitnější. Tato verze řídicí jednotky tedy zvládala rychlejší zpracování regulační smyčky, což byl také jeden z problémů předchozí verze. Jelikož se jedná o zhotovenou platformu, byly doplněny už jen nutné periferie. I přes tuto úpravu však docházelo k problémům v regulační smyčce.

1.3.3 Třetí generace

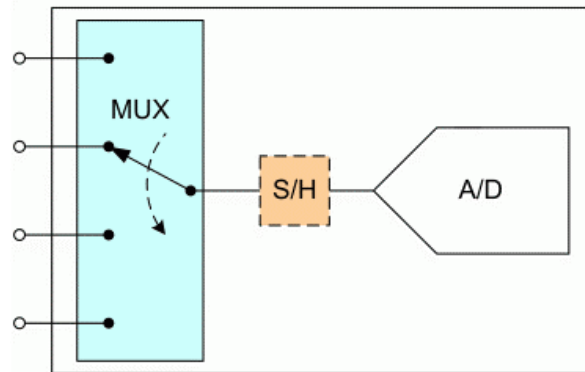
Z analýzy problému vyšlo najevo, že tyto potíže byly způsobeny především nedostačující přesností převodu zpětnovazebních signálů při jejich digitalizaci. Ovšem 10bitový či 12bitový převodník je dostatečně přesný. Při měřeném proudu na rozsahu ± 30 A, při V_{REF} 3,3 V, by rozlišení v případě 12bitového převodníku činilo $800 \mu V$, což je asi 1,45 mA. Je tedy jasné, že rozlišení převodníku je více než dostačující. Chyba je tedy jinde. Vezmeme v úvahu vnitřní zapojení AD převodníku procesoru SAM3X8E uvedené na obrázku 4.



Obrázek 4: Blokové schéma ADC procesoru SAM3X8E [6]

Rychlost převodu analogového signálu na číslo je dána obvodem sample and hold (S/H). V podstatě se jedná o RC článek. Tedy rychlost převodu je limitována časovou konstantou tohoto RC článku. Na vstup je zapotřebí přivádět měřený signál alespoň po dobu 3τ , aby došlo

k nabití kondenzátoru a nebyl tak učiněn chybný převod. Časová konstanta τ je navíc ovlivněna multiplexerem, který přepíná mezi jednotlivými analogovými vstupy. Mezi nimi je totiž parazitní kapacita, která se musí vybíjet. Po dobu vybíjení parazitních kapacit je nutné ignorovat výstup AD převodníku. Tento proces je definován jako počet cyklů, které je třeba ignorovat, abychom na výstupu dostali platné informace [7]. Prodloužení této časové konstanty také způsobuje vnitřní kapacita každého pinu, která tvoří RC článek s impedancí zdroje signálu. Na obrázku 5 je znázorněn princip fungování multiplexeru.



Obrázek 5: Zapojení multiplexeru a ADC [7]

Minimální potřebný čas k převodu je vždy udáván v datasheetu v podobě časového údaje nebo maximální vzorkovací frekvence. Ovšem kapacita mezi jednotlivými piny a impedance zdroje signálu je závislá na návrhu desky plošných spojů (DPS) a na použitých součástkách. Proto byla provedena úprava v podobě externích AD převodníků pro každý měřený zpětnovazební signál. S tím souvisí i návrh a realizace nové DPS. Tato úprava by měla odstranit problémy s vzorkováním signálu. Návrh nové DPS by také měl přispět ke snížení rušení analogového signálu před jeho vzorkováním.

2 Hardware řídicí jednotky

Kapitola je věnována výběru vhodných součástek, popisu navržených a použitých schémat, a nakonec návrhu desky plošných spojů.

2.1 Volba součástkové základny

V této kapitole bude popsán výběr hlavních obvodů a součástek, které jsou podstatou periférií doplněných k řídicímu počítači Arduino Due. Především se bude jednat o externí AD převodníky, napájecí zdroj, obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů, spínače budičů výkonového stupně, převodník linky UART na RS-232 a obvod pro bezpečné uvedení vozidla do provozu.

2.1.1 AD převodník

Při volbě AD převodníku bylo nutné v první řadě stanovit vhodnou architekturu. Dále byly určeny základní parametry, které musí vybraný převodník splňovat. Mezi tyto parametry patří například: komunikace po sběrnici SPI, vhodná rychlost vzorkování, napájecí napětí 3,3 V a rozlišení převodníku 12 bitů. Dalším, avšak ne nutným, požadavkem bylo vývodové provedení (THT).

Existuje mnoho topologií AD převodníků, které mají různé vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou dány právě způsobem převodu (vzorkováním). Na typu vzorkování je závislá především rychlost převodu, přesnost a odolnost proti rušení. Dnes jsou nejrozšířenější tyto tři typy AD převodníku: s postupnou aproximací (SAR), s postupnou komparací a delta-sigma ($\Delta\Sigma$).

Při **postupné aproximaci** je postupně zkusmo nastaven každý váhový bit na 1, počínaje bitem s nejvyšší vahou (MSB) až k bitu s nejnižší vahou (LSB). Zpětně je v komparátoru porovnáváno napětí odpovídající vzniklé kombinaci bitů se skutečnou hodnotou vstupního napětí. Pokud výsledná kombinace bitů odpovídá nižšímu napětí než je skutečné, je nastavovaný bit ponechán v logické 1. Pokud je napětí vyšší, je změněn na 0. Takto se postupuje až k LSB. Z toho plyne, že maximální chyba je vždy 1 LSB. Tyto převodníky jsou poměrně rychlé (řádově desítky ksps) a především mají pevný čas konverze (převodu). Patří do skupiny tzv. kompenzačních převodníků [8].

Při **postupné komparaci** je bitový rozsah rozdělen na části (skupiny bitů). Převod probíhá v několika komparačních převodnících, jejich počet odpovídá počtu skupin bitů. První komparační převodník nastaví nejvyšší skupinu bitů. Takto vzniklá kombinace je převedena v DA převodníku zpět na analogový signál, a ten je v rozdílovém zesilovači odečten od skutečného vstupního napětí. Toto „zbytkové“ napětí, které je menší, než rozsah vstupního

komparačního zesilovače, je dále zesíleno a v následujícím stupni pomocí dalšího komparačního převodníku převedeno. Tvoří tak nižší část výstupního bitového čísla. Výsledná bitová kombinace je tedy složena z těchto postupně převedených skupin bitů. Každý komparační převodník obsahuje několik paralelně řazených komparátorů. Tyto převodníky se taktéž nazývají rychlé a patří mezi nejrychlejší převodníky (stovky Msps) [8].

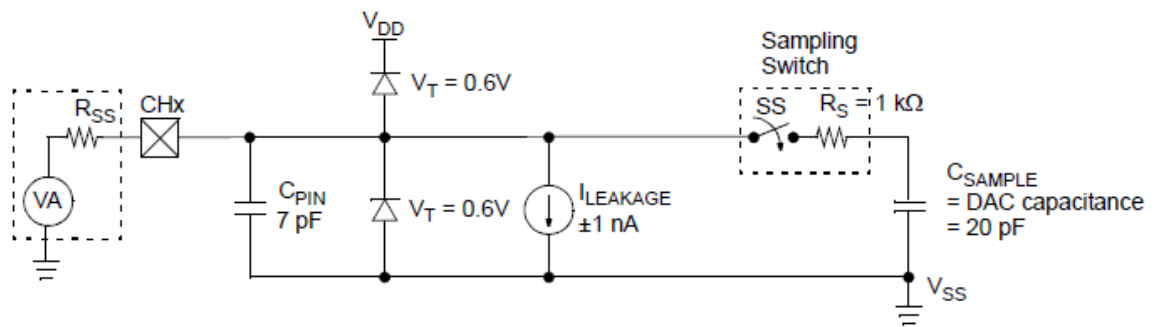
U převodníku **delta-sigma** je na vstupu delta-sigma modulátor, za ním je zařazen klopný obvod typu D, ten reaguje na náběžnou hranu hodinového signálu a na výstupu drží tutéž hodnotu, která byla v době náběžné hrany na vstupu, až do příchodu další náběžné hrany. Tento signál je zaveden přes jednobitový DA převodník zpět na vstup do rozdílového zesilovače jako $\pm U_{REF}$.

Od vstupního napětí je v rozdílovém zesilovači nejdříve odečteno kladné referenční napětí (napětí minulého vzorku), výsledek je kladný, na výstupu integrátoru je kladné napětí. Komparátor dává na výstupu 1. Jakmile napětí na integrátoru dosáhne určité hodnoty, stane se rozdíl těchto signálů záporný, napětí na integrátoru začne klesat. V okamžiku, kdy klesající napětí prochází nulou, komparátor má na výstupu 0. Při nejbližší náběžné hraně hodinového taktu klopný obvod přepne do 0, v tu chvíli je do rozdílového zesilovače přivedeno záporné referenční napětí. To je na výstupu tak dlouho, než na integrátoru dosáhne napětí opět nuly. Poté má komparátor na výstupu opět logickou 1 a při nejbližším hodinovém taktu bude mít na výstupu 1 i klopný obvod. Následně je na rozdílový zesilovač opět přivedeno kladné referenční napětí [9]. Tyto převodníky disponují velkým rozlišením a také dosahují vysoké hodnoty odstup signál šum. Tyto vlastnosti jsou hlavní výhodou oproti jiným převodníkům, avšak na úkor rychlosti (jednotky sps). Proto jsou tyto převodníky vhodné pro měření méně dynamických signálů [8].

Ve skutečnosti nás však architektura AD převodníku nemusí příliš zajímat, protože prodejci nemají součástky tříděné podle typu převodu. Navíc převodník delta-sigma a převodník s postupnou kompenzací jsou spíše pro náročné aplikace. Pokud při výběru známe základní požadavky kladené na obvod, které v podstatě mohou souviset s požadovanou architekturou, použijeme pro výběr součástky filtry, které velké množství vyráběných AD převodníků poměrně hodně zredukuje. Ve výsledku tedy máme na výběr z několika kusů.

Dle výše zmíněných požadavků a kritérií byl zvolen obvod od firmy Microchip s označením MCP3201. Jedná se o 12bitový převodník s postupnou aproximací. Převodník má napájecí napětí 2,7 – 5,5 V. Vzorkovací rychlost při napájecím napětí 5 V je 100 ksps. Obvod je typu CMOS. Tato technologie se vyznačuje nízkými energetickými nároky, jedná se tedy o

tzv. Low-power. Čas konverze potřebný pro navzorkování signálu je 12 hodinových cyklů. Analogový signál musí být na vstup přiveden alespoň 1,5 hodinového cyklu, aby došlo k nabití obvodu sample and hold [10]. Obvod byl vybrán v pouzdře DIL8. Jedná se o klasické pouzdro s osmi vývody v THT provedení. V návaznosti na kapitolu 1.3.3 Třetí generace, kde byl popsán problém s parazitními kapacitami, je uveden na obrázku 6 model analogového vstupu převodníku MCP3201.



Obrázek 6: Model analogového vstupu obvodu MCP3201 [10]

Na obrázku je vidět náhradní schéma analogového vstupu s hodnotami součástek, které ho reprezentují. Za zmínku stojí diody V_T , které slouží jako ochrana vstupu. To znamená, že pokud se na vstupu objeví napětí o 0,6 V vyšší, než je napájecí, nebo o 0,6 V menší, než je zemní potenciál, tyto diody svedou procházející proud do napájecího zdroje či do země a nedojde k poškození obvodu. Avšak tyto diody jsou dimenzovány pouze na malé hodnoty proudu cca 1 mA.

2.1.2 Napájecí zdroj

Jelikož jmenovité napětí trakčních baterií je 24 V, je nutné nějakým způsobem toto napětí snížit na vhodnou úroveň pro napájení MCU a dalších integrovaných obvodů vyskytujících se na vozidle. Ačkoliv by bylo možné použít některý lineární integrovaný stabilizátor napětí typu 78xx, není to vhodné. Je nutné galvanicky oddělit napájení řídicí a silové části především z důvodu rušení. Proto byl zvolen DC/DC měnič od firmy Traco Power, který napětí i lépe stabilizuje oproti lineárnímu stabilizátoru. Z důvodu potřeby 5 V a 3,3 V logiky jsou použity dva měniče, a to TMR6-2410 pro 5 V a TMR6-2411 pro 3,3 V. Nominální napájecí napětí měničů je 24 V, avšak přípustné napájecí napětí je v rozsahu 18 – 36 V. Tento parametr je důležitý, zejména potom jeho spodní hranice, protože napětí baterie se mění v závislosti na jejím vybití právě v rozsahu 33,6 V při plném nabití až 20 V při úplném vybití. [3] Oba měniče jsou schopny dodat výkon až 6 W s účinností kolem 80 % [11].

2.1.3 Obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů

Jak již bylo psáno v kapitole 1.2 Měření zpětnovazebních signálů, před převedením změřeného analogového signálu na digitální je třeba provést jeho úpravu. Zejména je nutné oddělit měřicí obvody od AD převodníků, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování. Vybraný AD převodník umí zpracovávat jen kladný signál. Tato volba nám poskytla větší volnost při výběru, než kdybychom požadovali zpracování i signálu záporného. Protože však na vozidle potřebujeme měřit jak záporný (při rekuperaci), tak kladný proud tekoucí do/z motoru, je nutné změřený signál ještě před digitalizováním povýšit do kladné oblasti. Tyto dva úkony zajistí tzv. „operační zesilovač s posunutou nulou“. Pro zpracování signálu ze sondy měřící napětí použijeme operační zesilovač v neinvertujícím zapojení. Protože signál z čidla natočení plynové rukojeti je zpracováván také v hlavní řídicí jednotce, i když interním AD převodníkem Arduina, bude zde použit také operační zesilovač, avšak v režimu napěťového sledovače.

Jelikož operační zesilovač zde bude plnit především funkci impedančního oddělení, funkci zastane téměř jakýkoliv operační zesilovač. Podmínkou však je napájecí napětí 3,3 V. Vybrán byl obvod MAX4077 od firmy Maxim Integrated. Jedná se o součástku s osmi vývody v pouzdře DIL8. V tomto pouzdře jsou umístěny dva operační zesilovače. Jelikož je potřeba předzpracovávat čtyři zpětnovazební signály (signál o velikosti otáček je na výstupu snímače již digitální a je přiváděn na digitální vstupy Arduina) a jeden signál z plynové rukojeti, budeme potřebovat celkem tři obvody MAX4077.

2.1.4 Spínače budičů výkonového modulu

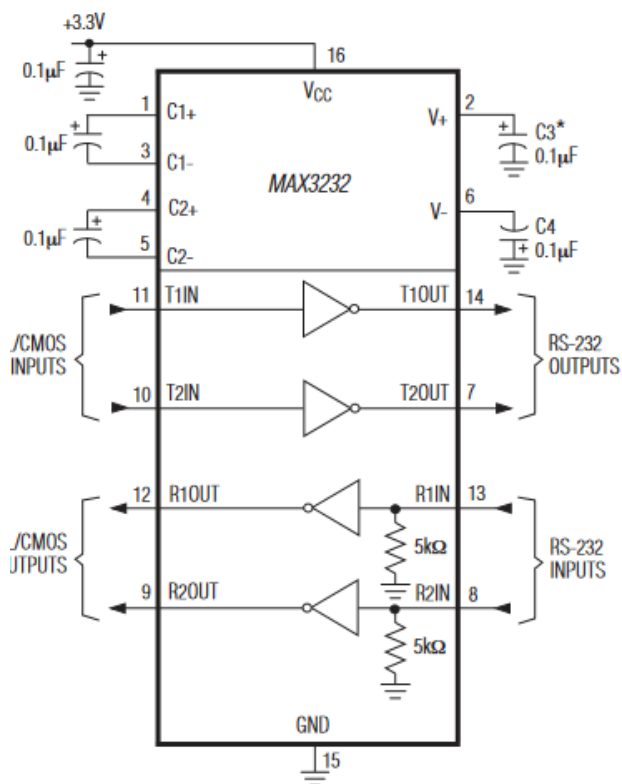
Výkonový stupeň, respektive modul obsahující IGBT tranzistory, je buzen speciálními integrovanými budiči. Každý budič spíná příslušné dva výkonové tranzistory a má jeden error výstup. Pro osazený třífázový můstkový IGBT modul je tedy zapotřebí tří budičů. Budiče výkonového modulu jsou od řídicí elektroniky ještě odděleny optočleny, aby se zamezilo přenosu rušení do řídicí jednotky, a zároveň optočleny slouží jako ochrana řídicí elektroniky při případné poruše výkonového stupně. Budiče i optočleny jsou umístěny přímo na DPS výkonového stupně. Více informací o budičích a celém výkonovém stupni je k nalezení v diplomové práci „Elektronické řízení malého elektrického vozidla“ [3] od Ing. Ondřeje Sadílka, Ph.D.

Tyto budiče výkonového modulu je však nutné řídit, a k tomu účelu slouží právě spínače budičů výkonového modulu. Jak již bylo naznačeno, pro třífázový IGBT modul je samozřejmě zapotřebí 6 spínačů. Bylo by vhodné použití jako spínačů unipolárních tranzistorů z důvodu

velkého množství periférií připojených k Arduinu, a s tím spojeným maximálním odebíraným proudem z platformy. Vzhledem k poměrně nízkému výstupnímu napětí 3,3 V na PWM výstupech Arduina by bylo nutné použít tzv. Logic level mosfet, který je schopný se naplno otevřít již při takto nízkém napětí. Zároveň ale vyvstává problém z hlediska náhodného otevření mosfetu naindukovaným napětím vlivem rušení. Proto byl nakonec zvolen bipolární tranzistor, který je řízen proudem. Jelikož potřebujeme zátěž spínat k napájecímu napětí, musíme použít PNP tranzistor. Protože však tranzistor spíná napětí 15 V, kdežto řízen musí být napětím 3,3 V, je jeho přímé použití nemožné. Tranzistor PNP totiž spíná při napětí U_{BE} o asi 0,7 V nižším, než je napájecí napětí, a nebylo by jej tedy možné zavřít. Je proto potřeba zapojit ještě jeden tranzistor typu NPN, který teprve bude spínat druhý tranzistor typu PNP [12]. Spínače jsou tedy realizovány komplementární dvojicí tranzistorů v Darlingtonově zapojení. Pro realizaci byly vybrány běžné tranzistory BC337-40 (NPN) a BC327-40 (PNP) v pouzdře TO92. Jedná se o parametrově stejné tranzistory, jen s opačnou vodivostí. Tranzistory mají maximální napětí U_{CE} 45 V, proud kolektorem 0,8 A a ztrátový výkon maximálně 0,625 W. Zesílení je v rozmezí 250 až 630 [13] [14]. Jelikož budeme provozovat tranzistory ve spínacím režimu, potřebujeme je uvést do saturace. Budeme tedy při návrhu zapojení vycházet z minimální hodnoty zesílení.

2.1.5 Převodník linky UART na RS-232

Jelikož komunikace hlavní řídicí jednotky, pomocné řídicí jednotky a battery managementu probíhá na relativně velké vzdálenosti a v prostředí, kde je přítomné rušení od spínání výkonového stupně a chodu motorů, je potřeba data posílaná po sběrnici nějak ochránit. K tomuto účelu postačí převést komunikační rozhraní UART na linku RS-232. Linka RS-232 je komunikační linka definovaná mezinárodní normou, a je běžně užívána v průmyslu právě kvůli odolnosti proti rušení. Proto na trhu existuje značné množství integrovaných obvodů, které jsou určeny právě k tomuto účelu. Hlavní řídicí jednotka komunikuje se dvěma zařízeními – je tedy zapotřebí dvou komunikačních kanálů. Dalším požadavkem je napájecí napětí 3.3 V z důvodu napájecí logiky Arduina Due, která je stejná. Proto byl vybrán obvod MAX3232CPE+ od firmy Maxim Dallas. Tento obvod disponuje dvěma přijímacími a dvěma vysílacími kanály s přenosovou rychlostí 120 kbps. Odběr tohoto obvodu činí 300 uA. Jelikož obvod zajišťuje napěťové pozvednutí logických úrovní, a to na ± 12 V (+12 V v případě logické 0 a -12 V v případě logické 1), je nutné doplnit kondenzátory na dané vývody, aby byla zajištěna správná funkce nábojových pump integrovaných v obvodu [15]. Kapacity kondenzátorů a zapojení doporučené dle datasheetu je uvedeno na obrázku 7.



Obrázek 7: Zapojení kapacit a vnitřní blokové schéma obvodu MAX3232CPE+ [15]

2.1.6 Obvod pro bezpečné uvedení vozidla do provozu

K uvedení vozidla do provozu je nutné stisknout tlačítko start na zobrazovacím a komunikačním terminále umístěném na řídicích. Pokud jsou všechny bezpečnostní protokoly v pořádku, je mikroprocesorem sepnut tranzistor, který připojí jízdní stykač. Protože se však jedná o trakční část, od které by mohlo pronikat do řídicí jednotky rušení a zároveň je potřeba ochránit výstup procesoru, je nutné provést galvanické oddělení těchto dvou částí. Nejjednodušší galvanické oddělení lze provést optočlenem. V našem případě je použit optron PC817. Parametry vstupní diody jsou 1,2 – 1,4 V při 20 mA. Maximální výstupní napětí kolektor-emitor je 35 V a maximální proud kolektorem je 50 mA. Zesílení je v rozsahu 0,5 až 6 [16]. Vzhledem k takto malému zesílení a poměrně velkému vstupnímu proudu nelze použít optron samostatně, ale je třeba na vstup a výstup doplnit ještě klasický tranzistor.

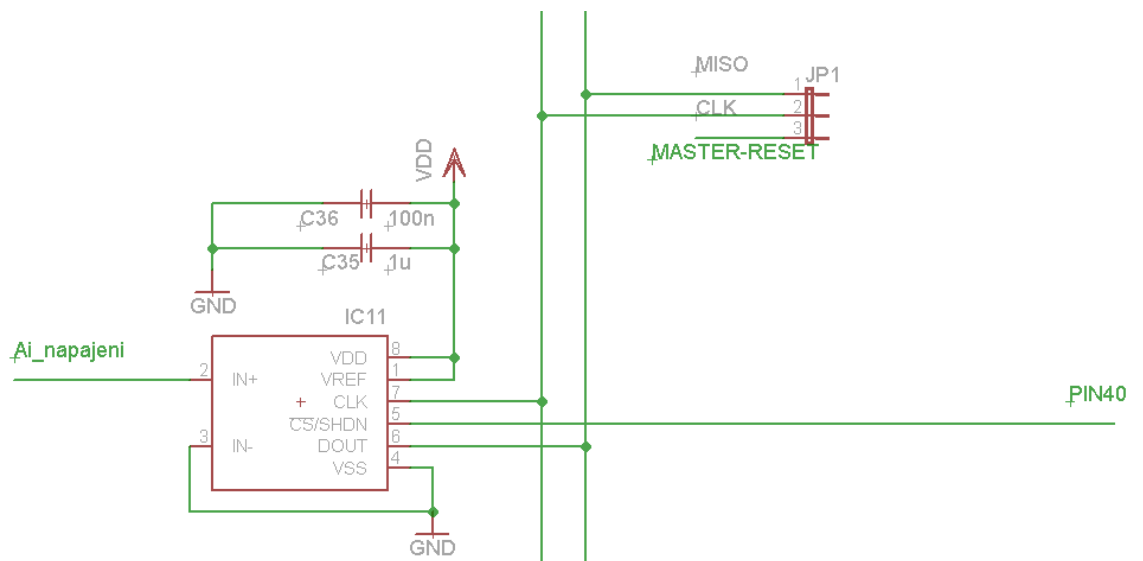
Abychom zajistili galvanické oddělení od mikroprocesoru, je potřeba ještě realizovat samostatné napájení galvanicky oddělené od řídicí jednotky. Protože je však celá hlavní řídicí jednotka napájena přes DC/DC měniče, které toto oddělení realizují, postačí k napájení jízdního stykače obyčejný lineární stabilizátor řady 78L05. Tento obvod je v pouzdře TO92, výstupní proud je maximálně 100 mA a vstupní napětí maximálně 30 V [17].

2.2 Popis navržených schémat

Zde bude stručně popsána funkce navržených schémat, které tvoří podpůrné periferie. Dále zde budou doplněny hodnoty a typy ostatních součástek, starajících se o správnou funkci hlavních obvodů či součástek vybraných v podkapitole 2.1 Volba součástkové základny.

2.2.1 AD převodník

Zapojení zvoleného AD převodníku není nijak složité. Referenční napětí bylo zvoleno stejné jako napájecí, tedy 3,3 V. Vývody CLK a DOUT jsou připojeny na sběrnici SPI, konkrétně na vodiče MISO a CLK. Chip select (vývod CS/SHDN) je připojen k digitálnímu výstupu Arduina a slouží k řízení AD převodníku. Chip select převodníku zpracovávajícího celkový proud odebíraný výkonovým stupněm je připojen na PIN40. Převodníky zpracovávající proudy levého a pravého motoru jsou připojeny na PIN42, PIN46 a převodník zpracovávající napětí ze stejnosměrného meziobvodu je připojen na PIN44. Výběr digitálního pinu byl volen dle uspořádání DPS. Na vývod IN+ je přiveden již upravený zpětnovazební signál. Pin IN- může sloužit ke kompenzaci rušení, v našem případě je ale připojen k zemi. Zapojení AD převodníku je uvedeno na obrázku 8.

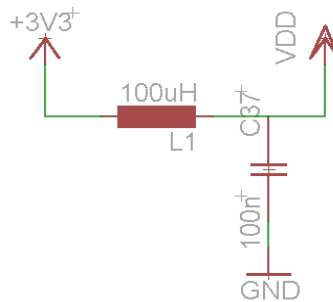


Obrázek 8: Zapojení AD převodníku

Pro správný a bezchybný převod je nutné, aby byla zaručena stabilita referenčního napětí. Proto jsou ke každému převodníku doplněny kondenzátory. Kondenzátor C36 tvoří lokální filtr napájecího napětí a chrání obvod před vysokonapěťovými špičkami. Jeho hodnota je 100 nF. Kondenzátor C35 slouží jako lokální zdroj energie a pokrývá impulzní odběr AD převodníku, jeho kapacita je 1 uF. Tím je omezeno rušení, vzniklé při protečení impulzního proudu celou

DPS. Tato dvojice ochranných kapacit je umístěna u každého integrovaného obvodu osazeného na DPS hlavní řídicí jednotky. Hodnota kondenzátoru tvořící lokální filtr je zvolena dle literatury „Návrh a konstrukce DPS“ [18]. Taktéž hodnota kondenzátoru tvořícího lokální zdroj energie. Tato hodnota je také uvedena jako doporučená v datasheetu obvodu MCP3201.

Jelikož AD převodníky nemají samostatný zdroj napájení, ale jsou napájeny z DC/DC měničů jako ostatní obvody, je jako další prvek pro eliminaci rušení do napájecí větve vřazen LC článek. Zapojení je uvedeno na obrázku 9.

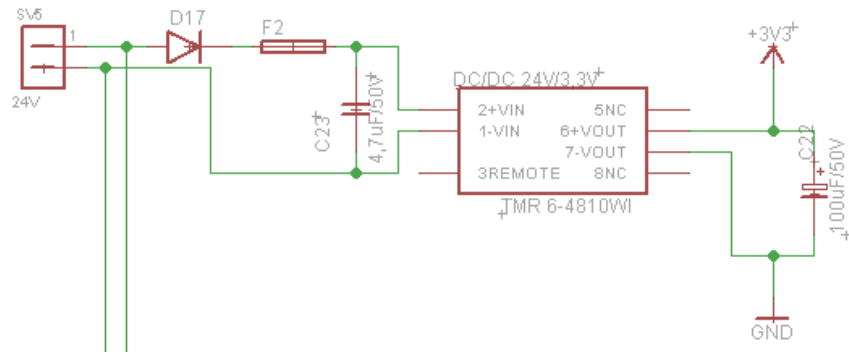


Obrázek 9: LC filtr v napájecí větvi

Článek tvoří tzv. dolní propust. To znamená, že propouští jen signály do určité frekvence. Induktivní reaktance cívky se s rostoucí frekvencí zvyšuje, pro stejnosměrný signál se tedy neuplatňuje a cívka v obvodu představuje pouze reálný odpor. Kdežto pro vysokofrekvenční signály představuje poměrně velkou impedanci. Podmínkou pro výběr vhodné indukčnosti tedy byl co nejmenší reálný odpor vinutí, a to v řádech stovek mΩ, aby docházelo k co nejmenšímu úbytku napětí. Kondenzátor naopak pro stejnosměrný signál představuje velkou impedanci, ale s rostoucí frekvencí jeho kapacitní reaktance klesá a pro vysokofrekvenční signály tedy představuje zkrat. Případné vysokofrekvenční signály představující rušení jsou tedy odfiltrovány a nebudou negativně ovlivňovat činnost AD převodníku.

2.2.2 Napájecí zdroj

K vybraným DC/DC měničům byly doplněny kondenzátory tvořící vstupní a výstupní filtr, dále ochranné diody a tavné pojistky. Schéma zapojení jednoho z DC/DC měničů, a to s výstupním napětím 3,3 V, je na obrázku 10. Zapojení druhého měniče, s výstupním napětím 5 V, je pak totožné.

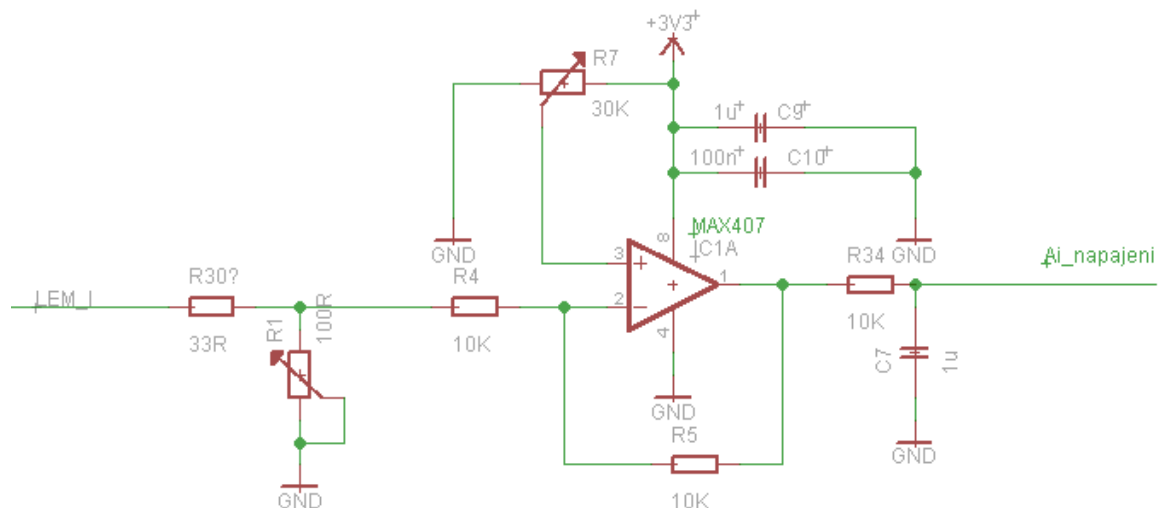


Obrázek 10: Zapojení DC/DC měniče

Ochranná dioda D17, sloužící jako ochrana proti přepólování. Jedná se o klasickou usměrňovací diodu 1N4007, typ diody byl zvolen dle maximálního vstupního proudu, který je omezen pojistkou. Tavná pojistka, je dimenzována dle datasheetu na proud 1 A. Maximální proud diodou v propustném směru je rovněž 1 A. Kondenzátory C23 a C22 tvoří vstupní a výstupní filtr.

2.2.3 Obvody pro předzpracování zpětnovazebních signálů

V těchto obvodech je použit již zmíněný integrovaný obvod MAX4077. Jelikož tato součástka obsahuje dva operační zesilovače (OZ), je v daném schématu uvedena vždy jen použitá část obvodu. Každý zpětnovazební signál, měřený sondou LEM je přiveden na jednotlivý OZ. Zapojení obvodu pro předzpracování signálu z proudového LEMu je totožné pro všechny tři měřené proudy. Zapojení je uvedeno na obrázku Obrázek 11.



Obrázek 11: Invertující zapojení OZ s posunutou nulou, určené pro signály z proudového LEMu

Operační zesilovač je jakožto integrovaný obvod opět opatřen dvojicí kondenzátorů umístěných v napájecí větvi, které zajišťují jeho ochranu a zároveň zabraňují vznikajícímu rušení. Vstupní odpor R30 a odporový trimr R1 tvoří již zmíněný měřící odpor, v kapitole 1.2 označen R_M . Odpor R30 slouží k hrubému nastavení rozsahu, jeho hodnota je 33Ω . Pomocí více otáčkového odporového trimru R1 je nastaven měřící rozsah přesně na $\pm 30 \text{ mA}$, ve skutečnosti odpovídající $\pm 30 \text{ A}$. Celková hodnota měřícího odporu se musí dle datasheetu pohybovat v rozsahu $50 - 160 \Omega$, což je po správném nastavení R1 na hodnotu 56Ω splněno. Operační zesilovač je v invertujícím zapojení, odpor R4 realizuje vstupní odpor OZ, odpor R5 tvoří zpětnou vazbu. Poměr těchto dvou odporů také udává velikost zesílení OZ dle rovnice 1. Danými hodnotami je tedy docíleno zesílení -1 . Operační zesilovač je tedy v režimu invertujícího napěťového sledovače. Hodnoty těchto odporů jsou záměrně zvoleny $10 \text{ k}\Omega$, a to z důvodu co největší jednotnosti součástek osazených na řídicí jednotce. Nastavením více otáčkového trimru R7 je realizováno ono posunutí nuly, tedy je-li na vstupu -30 mA , na výstupu OZ se objeví napájecí napětí $3,3 \text{ V}$. Pokud je na vstupu 0 mA , na výstupu bude napětí $1,65 \text{ V}$, a pokud bude na vstupu 30 mA , na výstupu bude 0 V . Takto jsme rovnoměrně rozdělili měřící rozsah sondy a připravili signál pro vzorkování AD převodníkem.

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = -\frac{R_{ZV}}{R_{IN}} = -\frac{R_5}{R_4} = -\frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = -1$$

A – Zesílení

U_{OUT} – Výstupní napětí

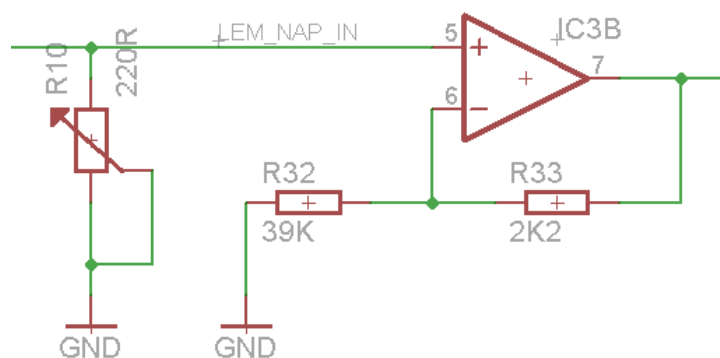
U_{IN} – Vstupní napětí

R_{ZV} – Odpor zpětné vazby (**R5**)

R_{IN} – Vstupní odpor (**R4**)

Rovnice 1: Výpočet zesílení OZ v invertujícím zapojení

Obvod zajišťující předzpracování signálu z napětového LEMu je odlišný, zapojení je uvedeno na obrázku 12. Hlavním rozdílem je zapojení OZ, který není v invertujícím zapojení. Jelikož není potřeba signál zesilovat, nabízelo by se zapojit OZ jako napětový sledovač. Avšak z důvodu pevně definované úrovně zesílení bylo zvoleno neinvertující zapojení. Dalším rozdílem je absence trimru, zajišťující posunutí nuly, protože měřené napětí se nachází pouze v kladné oblasti.



Obrázek 12: Neinvertující zapojení OZ, určené pro signál z napětového LEMu

Na vstupu je opět připojen měřicí odpor R_M v podobě více otáčkového odporového trimru R10. Měřicí odpor má být dle datasheetu 100 – 350 Ω . Námí zvolený trimr má hodnotu 220 Ω a měřicí rozsah je nastaven na 50 V. Což odpovídá 209 Ω . Odporů R32 a R33 tvoří zpětnou vazbu, na jejich velikosti opět závisí zesílení OZ. To je pro neinvertující zapojení vždy větší než 1. Zvolenými hodnotami 39 k Ω pro R32 a 2,2 k Ω pro R33 je docíleno, že zesílení je jen nepatrně větší jak 1. Výpočet zesílení uvádí rovnice 2.

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 1 + \frac{R_{ZV2}}{R_{ZV1}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_{32}} = 1 + \frac{2,2 \cdot 10^3}{39 \cdot 10^3} = 1,056$$

A – Zesílení

U_{OUT} – Výstupní napětí

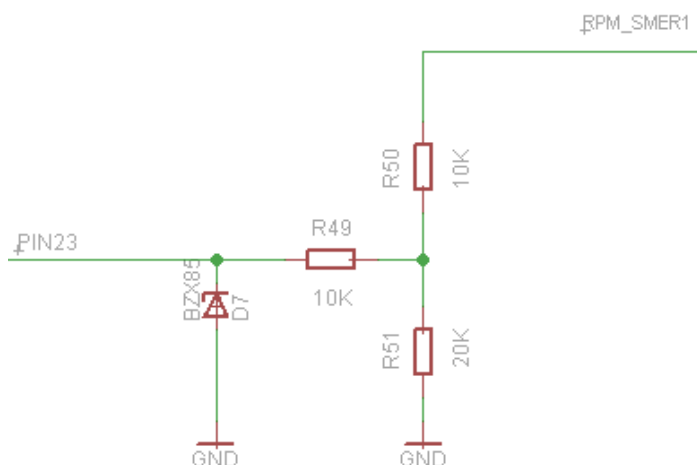
U_{IN} – Vstupní napětí

R_{ZV1} – Odpor zpětné vazby (**R32**)

R_{ZV2} – Odpor zpětné vazby (**R33**)

Rovnice 2: Výpočet zesílení OZ v neinvertujícím zapojení

Jak již bylo zmíněno, IRC čidla otáček na svém výstupu dávají digitální signál. Z každého čidla jdou dva signály. Jeden nese informaci o směru otáčení a druhý o velikosti otáček. Informace o směru jsou přivedeny na digitální vstupy a informace o otáčkách jsou přivedeny na PWM vstupy. Pro IRC čidla jsou využity vstupy PIN23, PIN25, PWM12 a PWM12. Piny jsou voleny dle uspořádání DPS. Na obrázku 13 je uvedeno schéma jednoduchého obvodu zařazeného na vstup použitého pinu Arduina.



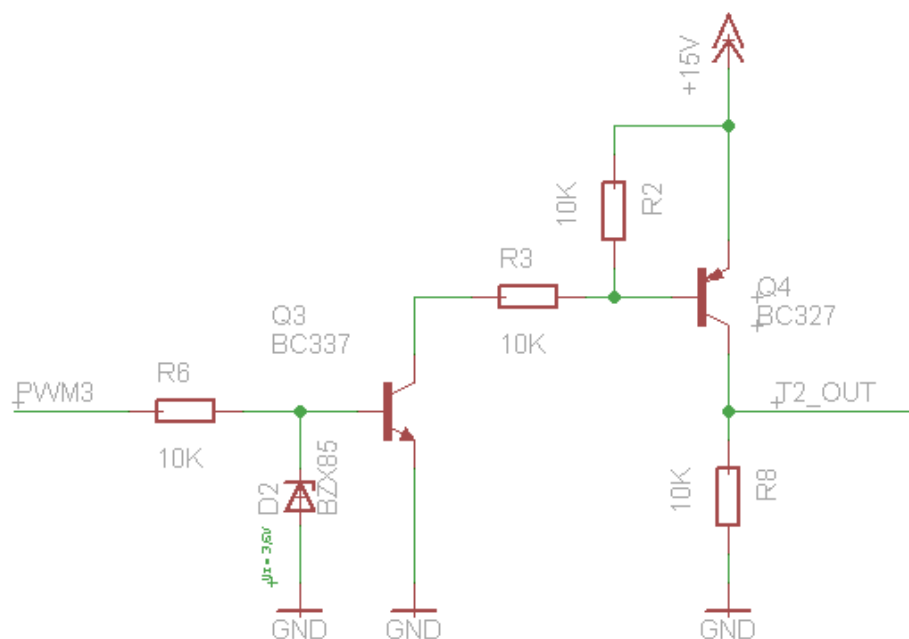
Obrázek 13: Vstupní dělič signálu z IRC čidla otáček

Odpor R49 definuje odpor pinu Arduina a zajišťuje omezení proudu, který by jinak skrze pin protekl. Zároveň se podílí na dělicím poměru napěťového děliče. Ten snižuje hodnotu napětí při logické 1. Odpor R51 zajišťuje na pinu nulový potenciál v době logické nuly. Hodnoty odporů v děliči jsou opět voleny s ohledem na jednotvárnost součástek řídicí jednotky.

2.2.4 Spínače budičů výkonového modulu

Spínače jsou realizovány tzv. „komplementárním Darlingtonovým zapojením“. Díky tomuto zapojení můžeme spínat zátěž k VCC, a přitom toto napětí nemusí být stejné jako napájecí napětí řídicího procesoru. Zapojení je uvedeno na obrázku 14 a je totožné pro všech šest spínačů. Spínače jsou připojeny na piny PWM2 až PWM8.

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.1.4 Spínače budičů výkonového modulu, každý budič poskytuje signály error, které hlásí poruchu výkonového stupně. Tyto signály jsou připojeny na digitální vstupy PIN31, PIN33, PIN35. Z důvodu ochrany těchto vstupů je zde opět použito zapojení jako u čidel otáček, uvedené na obrázku 13.



Obrázek 14: Spínač budiče výkonového modulu

Tranzistory jsou řízeny PWM výstupem Arduino. Je tedy zapotřebí, aby pracovaly ve spínacím režimu. To znamená, že pracovní bod každého tranzistoru se musí nacházet v oblasti saturace a naopak klidový pracovní bod se musí nacházet v oblasti nevodivé. Jinak by docházelo na tranzistoru k výkonovým ztrátám a mohlo by dojít k jeho zničení. Hodnoty básových odporů R2, R3 a R6 byly určeny dle výpočtu uvedeného níže a jejich hodnoty jsou 10 k Ω . Ve schématu se dále nachází odpor R8, který tvoří tzv. pull-down odpor. Díky němu je vstup spínaného budiče uzemněn v době, kdy je spínač rozepnut. Naopak, když je spínač sepnut, odpor se vzhledem k jeho hodnotě 10 k Ω téměř neuplatní.

Abychom mohli nastavit pracovní bod každého tranzistoru a zajistit jeho saturaci, je nutné znát odebíraný kolektorový proud. Podle datasheetu je maximální proud odebíraný budičem výkonového stupně 290 mA. Vypočteme tedy potřebný proud báze tranzistoru BC327 dle rovnice 3 a určíme velikosti bázových odporů podle rovnice 4. Obdobným způsobem provedeme výpočty pro tranzistor BC337 dle rovnic 5, 6 a 7.

Výpočet bázových odporů tranzistoru BC327

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{MIN}} = \frac{290 \cdot 10^{-3}}{250} = 1,16 \text{ mA}$$

I_B – Proud báze

I_C – Proud kolektoru

β_{MIN} – Minimální zesilovací činitel

Rovnice 3: Výpočet bázového proudu BC327

Pro zajištění saturace tranzistoru zvýšíme bázový proud I_B alespoň na dvojnásobek.

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{I_B} = \frac{15 - 0,7}{2,3 \cdot 10^{-3}} = 6,22 \text{ k}\Omega$$

R_{B1} – Bázový odpor (**R3**)

V_{CC} – Napájecí napětí

U_{BE} – Napětí báze-emitor

I_B – Proud báze

Rovnice 4: Výpočet bázového odporu R3

Proud odebíraný budičem a zároveň proud kolektoru I_C o hodnotě 290 mA je maximální hodnota. Jelikož je počítáno s dvojnásobným proudem báze k zajištění saturace, můžeme si dovolit zvolit odpor větší hodnoty, a to 10 k Ω . Důvodem je větší jednotnost součástek osazených na DPS.

Abychom měli jistotu, že tranzistor bude v době rozepnutí spínače zcela uzavřen, přidáme ještě odpor R_{B2} (**R2**). Tím zajistíme nastavení klidového pracovního bodu. Tento odpor zajistí stejný potenciál na emitoru a bázi v době, kdy bude spínač rozepnut. Naopak při sepnutém spínači se téměř neuplatní. Jeho hodnota se obvykle volí stejná jako hodnota R_{B1} .

Výpočet bázového odporu tranzistoru BC337

Proud kolektoru I_C je tvořen součtem proudu I_B tranzistoru BC327 a proudem, který proteče odporem R_{B2} . Jelikož je proud odporem R_{B2} poměrně malý vzhledem k proudu I_B a odpor báze navrhujeme tak, aby byl tranzistor bezpečně v saturaci, budeme počítat pouze s proudem I_B .

$$I_C = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{B1}} = \frac{15 - 0,7}{10 \cdot 10^3} = 1,43 \text{ mA}$$

R_{B1} – Bázový odpor (**R3**)

V_{CC} – Napájecí napětí

U_{BE} – Napětí báze-emitor

I_C – Proud kolektoru

Rovnice 5: Výpočet kolektorového proudu BC337

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{MIN}} = \frac{1,43 \cdot 10^{-3}}{250} = 5,72 \text{ uA}$$

I_B – Proud báze

I_C – Proud kolektoru

β_{MIN} – Minimální zesilovací činitel

Rovnice 6: Výpočet bázového proudu BC337

Pro zajištění saturace tranzistoru zvýšíme bázový proud I_B alespoň na dvojnásobek.

$$R_B = \frac{V_{DD} - U_{BE}}{I_B} = \frac{3,3 - 0,7}{44 \cdot 10^{-6}} = 216 \text{ k}\Omega$$

R_B – Bázový odpor (**R6**)

V_{DD} – Napájecí napětí procesoru

U_{BE} – Napětí báze-emitor

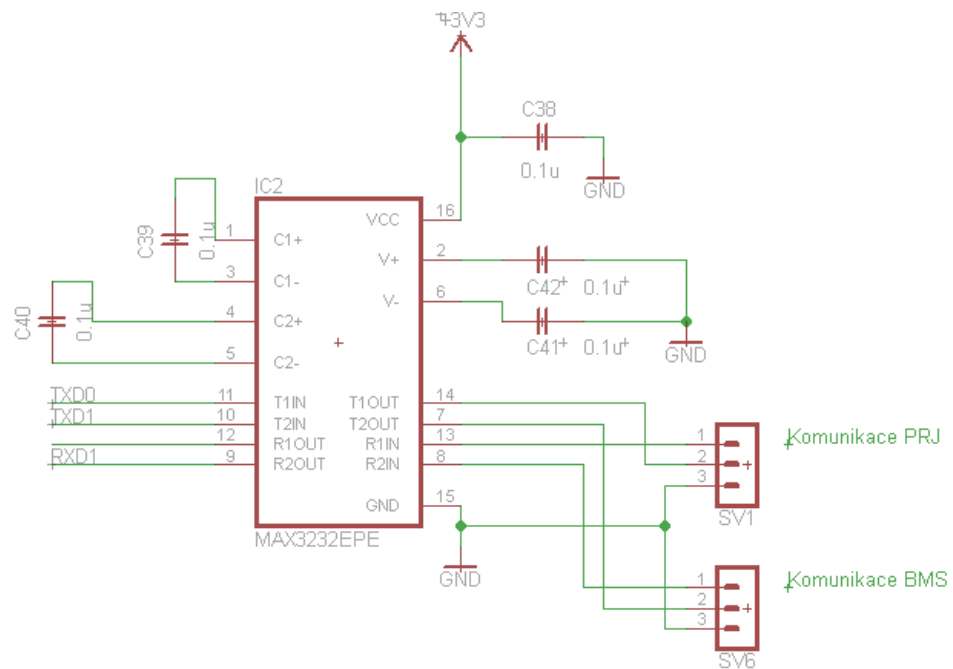
I_B – Proud báze

Rovnice 7: Výpočet bázového odporu R6

Z důvodu větší jednotnosti součástek osazených na DPS zvolíme hodnotu 10 k Ω . Takto rozdílnou hodnotu si můžeme dovolit použít. Ačkoliv proud do báze mnohonásobně naroste, pořád se pohybuje v řádu uA.

2.2.5 Převodník linky UART na RS-232

Zapojení převodníku uvedené na obrázku 15 je prakticky datasheetové zapojení dle obrázku 7 v kapitole 2.1.5. Obvod je tedy doplněn o potřebné kapacity, sloužící k přeměně napětí na požadovanou úroveň. Vysílací a přijímací porty jsou propojeny s Arduinem (T1IN, T2IN, R1OUT, R2OUT), pomocnou řídicí jednotkou a s bateriovým managementem (T1OUT, T2OUT, R1IN, R2IN).

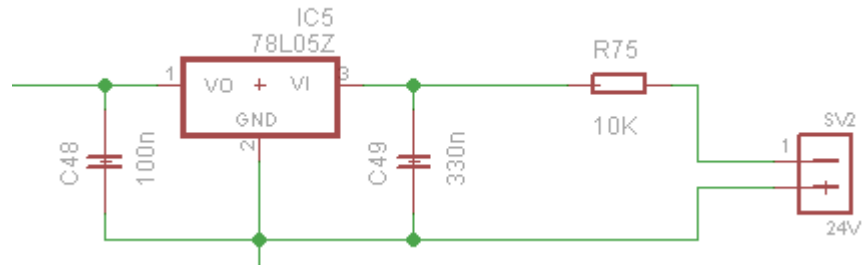


Obrázek 15: Reálné zapojení obvodu MAX3232CPE+

Kondenzátor C38 opět tvoří lokální filtr napětí, jeho hodnota je 100 nF. Kondenzátory C39, C40, C41, C42 mají hodnotu taktěž 100 nF.

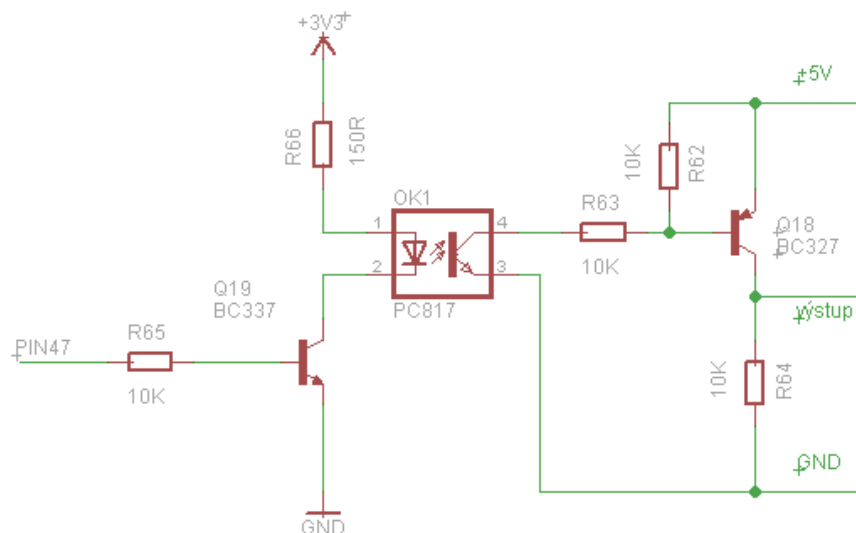
2.2.6 Obvod pro bezpečné uvedení vozidla do provozu

Tento obvod je připojen k digitálnímu výstupu Arduina na PIN 47. Na obrázku 16 je vidět zapojení lineárního stabilizátoru napětí 78L05. Pro správnou funkci je potřeba doplnit na vstupní a výstupní svorky kondenzátory. Ty zabraňují rozkmitání obvodu a zároveň zajistí, že stabilizátor bude mít parametry definované výrobcem. Vstup optronu je z důvodu poměrně velkého proudového odběru zapojen přes tranzistor BC337. Jelikož má optron špatné zesílení, je na výstupu zařazen tranzistor BC327, který teprve spíná jízdní stykač. Zapojení je uvedeno na obrázku 17.



Obrázek 16: Zapojení stabilizátoru 78L05

Vstupní kondenzátor C49 má hodnotu 330 nF, výstupní kondenzátor C48 pak 100 nF. Hodnoty těchto kondenzátorů jsou stanoveny dle datasheetu. Jelikož je maximální napětí trakční baterie 33,6 V a maximální vstupní napětí stabilizátoru je 30 V, je na vstup stabilizátoru ještě zařazen odpor R75 s hodnotou 10 kΩ. Jelikož je jízdní stykač buzen ještě přes tranzistorové pole ULN2003 (není součástí řídicí jednotky), postačuje dodávat na výstup tranzistoru Q18 proud v řádech jednotek mA.



Obrázek 17: Připojení optronu k výstupu Arduina

Hodnota předřadného odporu R66 zařazeného na vstup optronu je vypočtena dle rovnice 8 a činí 150 Ω. Hodnoty bázových odporů R65, R63 a R62 jsou 10 kΩ. Jejich hodnoty jsou určeny rovnicemi 10 a 12. Odpor R64 opět plní funkci tzv. pull-down odporu.

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{3,3 - 1,2}{15 \cdot 10^{-3}} = 140 \Omega$$

R – Předřadný odpor (**R66**)

V_{CC} – Napájecí napětí

V_F – Pracovní napětí

I_F – Odebíraný proud

Zvolíme nejbližší odpor z řady E12 150 Ω .

Rovnice 8: Výpočet předřadného odporu R66 pro PC817

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{MIN}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{250} = 60 \mu A$$

I_B – Proud báze

I_C – Proud kolektoru

β_{MIN} – Minimální zesilovací činitel

Rovnice 9: Výpočet bazového proudu BC337 pro PC817

Pro zajištění saturace tranzistoru zvýšíme bazový proud I_B alespoň na dvojnásobek.

$$R_B = \frac{V_{DD} - U_{BE}}{I_B} = \frac{3,3 - 0,7}{120 \cdot 10^{-6}} = 21,6 k\Omega$$

R_B – Bazový odpor (**R65**)

V_{DD} – Napájecí napětí procesoru

U_{BE} – Napětí báze-emitor

I_B – Proud báze

Rovnice 10: Výpočet bazového odporu R65

Z důvodu větší jednotnosti součástek osazených na DPS opět zvolíme hodnotu 10 k Ω .

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{MIN}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{250} = 100 \mu A$$

I_B – Proud báze

I_C – Proud kolektoru

β_{MIN} – Minimální zesilovací činitel

Rovnice 11: Výpočet bazového proudu BC327 pro PC817

Pro zajištění saturace tranzistoru zvýšíme bazový proud I_B alespoň na dvojnásobek.

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{200 \cdot 10^{-6}} = 21,5 k\Omega$$

R_{B1} – Bazový odpor (**R63**)

V_{CC} – Napájecí napětí

U_{BE} – Napětí báze-emitor

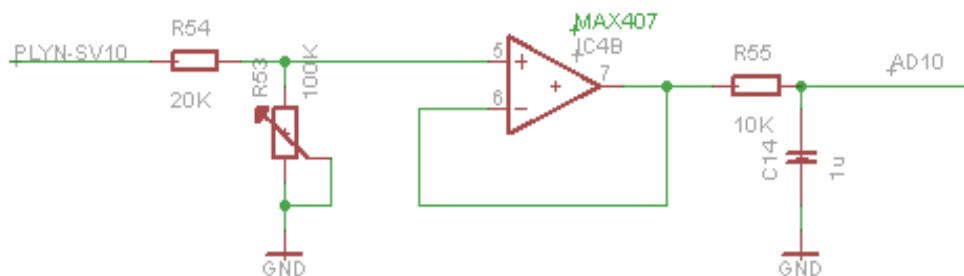
I_B – Proud báze

Rovnice 12: Výpočet bazového odporu R63

Vzhledem k dosud voleným hodnotám bazových odporů použijeme hodnotu 10 k Ω . Opět je zapojen i odpor R_{B2} (**R62**) se stejnou hodnotou – z důvodu bezpečného zavření tranzistoru.

2.2.7 Zpracování signálu z plynové rukojeti

Rukojet' elektronického plynu je napájena napětím 5 V. Signál z ní se tedy pohybuje v rozmezí 0 – 5 V. Protože je signál vzorkován v interním AD převodníku Arduino, je potřeba hodnotu napětí snížit na rozsah 0 – 3,3 V. Z toho důvodu je na vstupu zařazen napěťový dělič. Jeho dělicí poměr je nastaven na přesnou hodnotu pomocí víceotáčkového trimru. K impedančnímu oddělení je zde použit již popsany OZ MAX407, v režimu napěťového sledovače. Na výstupu OZ je potom zařazen ještě tzv. antialiasingový filtr. Ten slouží k odfiltrování signálů, které již nesplňují podmínku dle Nyquistova-Shannonova teorému. Při vzorkování by tak mohlo dojít k aliasingu neboli překrytí. Upravený signál je poté přiveden na vstup AD10. Zapojení celého obvodu je uvedeno na obrázku 18.



Obrázek 18: Zpracování signálu z plynové rukojeti

Hodnoty odporů napěťového děliče (R54 a R53) byly zvoleny 20 kΩ pro pevný odpor a 100 kΩ pro trimr. Odpor v antialiasingovém filtru R55 má hodnotu 10 kΩ, k němu zvolený kondenzátor C14 pak 1 uF. Mezní frekvence tohoto filtru je vypočítána dle rovnice 13.

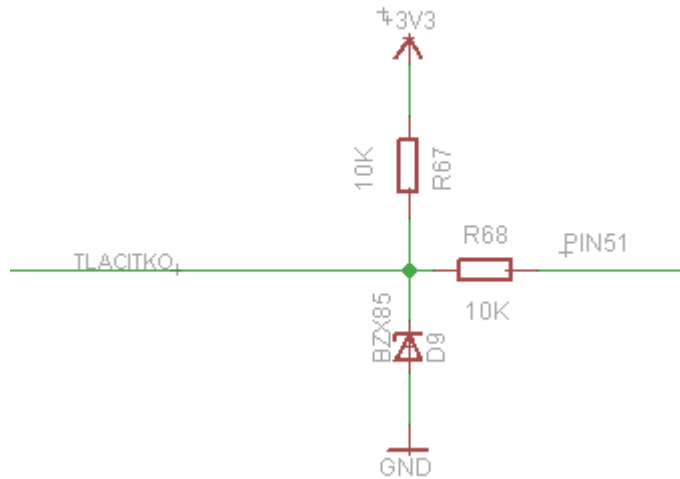
$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 15,9 \text{ Hz}$$

f_m – Mezní frekvence
R – Hodnota odporu
C – Hodnota kondenzátoru

Rovnice 13: Výpočet mezní frekvence RC filtru

Mezní frekvence filtru je v tomto případě odvozena od povahy měřeného signálu, u kterého se neočekávají příliš rychlé změny. Naopak, tyto rychlé změny, způsobené například rušením, je žádoucí odfiltrovat. Pokud by se jednalo o antialiasingový filtr v jeho pravé podstatě, mezní frekvence by samozřejmě byla v řádech stovek kHz.

Součástí plynové rukojeti je také tlačítko. To může sloužit třeba ke změně směru jízdy, kdy po jeho zmáčknutí dojde k přepnutí do režimu couvání. Tlačítko je připojeno na PIN51, schéma je uvedeno na obrázku 19.

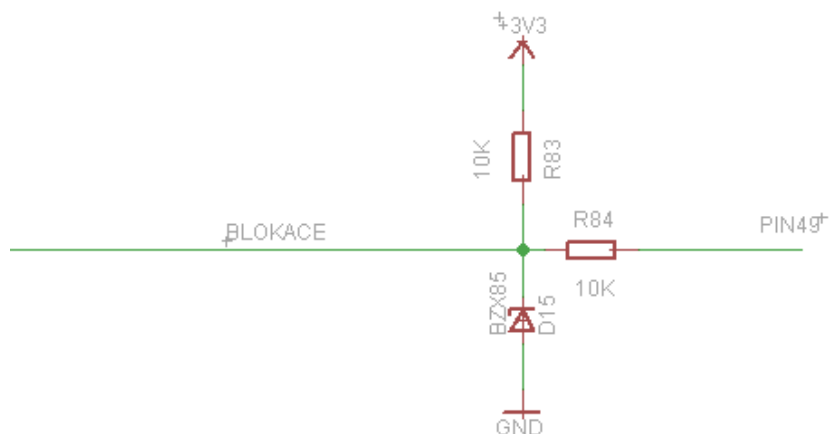


Obrázek 19: Připojení tlačítka na plynové rukojeti

V případě zmáčknutí tlačítka na plynové rukojeti dojde k uzemnění vstupního pinu (PIN51) a následnému vyhodnocení logické 0. Odpor R67 omezí proud protékající tlačítkem. Ve stavu, kdy je tlačítko rozepruto, tvoří odpory R67 a R68 napěťový dělič a na pin Arduina je přivedeno napětí logická 1.

2.2.8 Blokace od nabíječe

Pokud je vozidlo připojeno k elektrické síti, je blokem ochran (reléovou logikou) blokována jízda vozidla. Hlavní řídicí jednotka dostává tuto informaci na PIN49 v podobě logické 0 nebo 1 přímo od nabíječe, bez ohledu na battery management, který se o nabíjení baterie stará a taktéž vysílá po komunikační lince informace blokující jízdu vozidla. Tento blokující signál byl zaveden, aby byl umožněn provoz vozidla již v době, kdy byla komunikační linka teprve zřizována a testována. Na obrázku 20 je uvedeno schéma propojení procesoru a nabíječe.

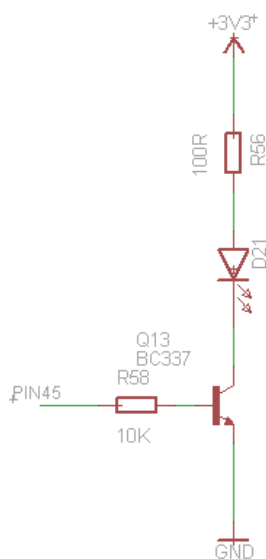


Obrázek 20: Propojení procesoru a nabíječe

Jedná se o stejné zapojení, kterým je realizováno čtení stavu tlačítka plynové rukojeti. Tedy pokud je vozidlo napojeno na síť, procesor nabíječe má na výstupním pinu logickou 0 a dojde k uzemnění pinu Arduina (PIN49). Když naopak vozidlo není nabíjeno, je na výstupním pinu nabíječe logická 1 a na PIN49 je přivedeno napětí přes dělič tvořený odpory R83 a R84.

2.2.9 Světelná indikace stavu jednotky

Led dioda připojená na jeden z digitálních výstupů Arduina, konkrétně na PIN45, slouží k indikaci nejrůznějších stavů jednotky. Protože je však odběr proudu z pinu omezen na cca 9 mA, bylo zapotřebí posílit výstup tranzistorem. K tomu účelu posloužil již známý BC337. Zapojení je uvedeno na obrázku 21.



Obrázek 21: Připojení LED k výstupu Arduina

Vybraná led dioda je zelené barvy, má pracovní napětí 2,1 – 2,6 V a proud 10 mA. Je k ní tedy zařazen předřadný odpor R56 o hodnotě 100 Ω, vypočtený dle rovnice 14. Bázový odpor tranzistoru R58 má hodnotu 10 kΩ, jeho hodnota byla vypočtena dle rovnice 16.

$$R_D = \frac{V_{CC} - U_D}{I_D} = \frac{3,3 - 2,3}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega$$

R_D – Předřadný odpor diody (**R56**)

V_{CC} – Napájecí napětí

U_D – Pracovní napětí diody

I_D – Proud odebíraný diodou

Rovnice 14: Výpočet předřadného odporu R56 pro LED

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{MIN}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{250} = 40 \mu A$$

I_B – Proud báze

I_C – Proud kolektoru

β_{MIN} – Minimální zesilovací činitel

Rovnice 15: Výpočet bázového proudu BC337 pro LED

Pro zajištění saturace tranzistoru zvýšíme bázový proud I_B alespoň na dvojnásobek.

$$R_B = \frac{V_{DD} - U_{BE}}{I_B} = \frac{3,3 - 0,7}{80 \cdot 10^{-6}} = 32,5 \text{ k}\Omega$$

R_B – Bázový odpor (**R58**)

V_{DD} – Napájecí napětí procesoru

U_{BE} – Napětí báze-emitor

I_B – Proud báze

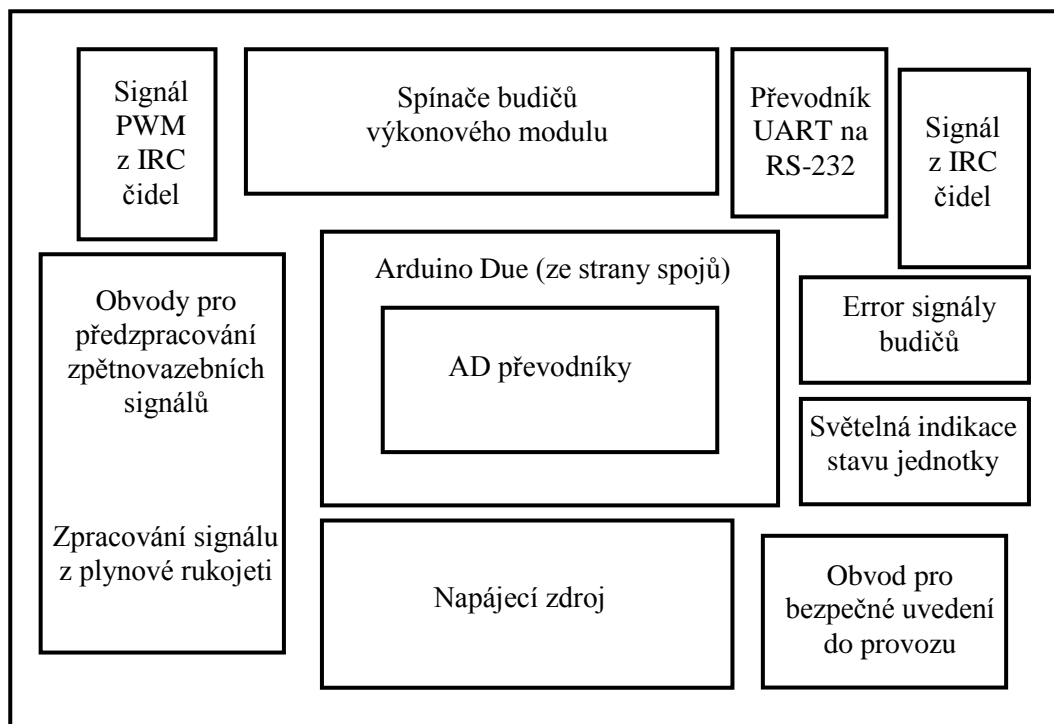
Rovnice 16: Výpočet bázového odporu R58

Z důvodu větší jednotnosti součástek osazených na DPS zvolíme hodnotu 10 kΩ. Za cenu nárůstu proudu báze.

2.3 Návrh a výroba desky plošných spojů

Jako technologie výroby byla vybrána nažehlovací metoda. Hlavní výhodou této metody spočívá v minimálních nárocích na vybavení a technologické postupy. Výroba tedy mohla být provedena v laboratoři katedry KEEZ. Této výrobní metodě se však musí přizpůsobit návrh DPS. Především se musí jednat o jednostranný návrh, ačkoliv za určitých podmínek lze provést výrobu i oboustranného. Dále je potřeba zvolit dostatečnou šířku spojů z důvodu určité míry jejich podleptání leptacím roztokem. Stejně tak je důležitá dostatečná šířka mezer mezi spoji, aby při nažehlování předlohy na plošný spoj nedošlo ke splnutí motivu. Z těchto důvodů je téměř vyloučeno použití SMD součástek, především pak integrovaných obvodů v SMD provedení.

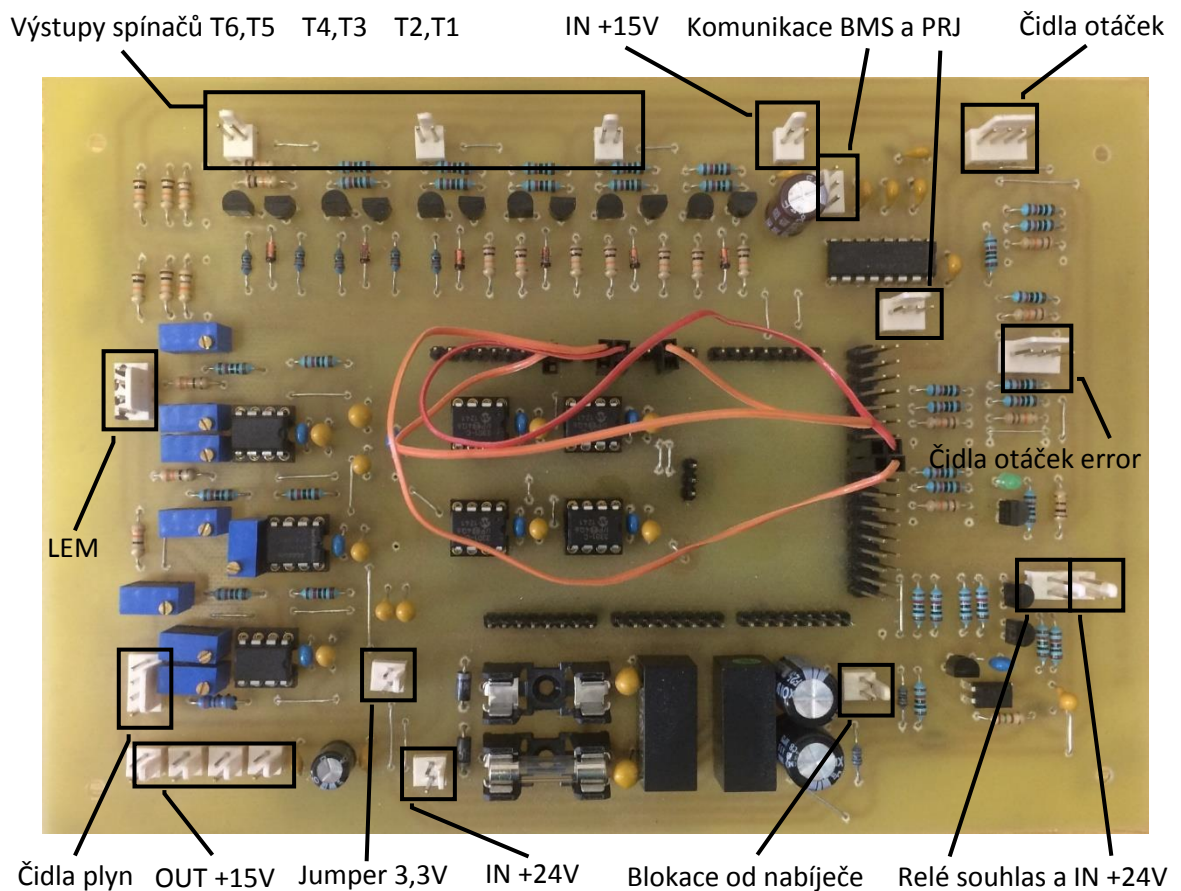
Výchozím kritériem, ze kterého bylo při návrhu nutné vycházet, byl rozměr DPS. Jelikož se jedná o náhradu předchozí nevyhovující verze řídicí jednotky, musel být dodržen původní rozměr, aby bylo možné novou řídicí jednotku osadit do rozvaděče s ostatní elektronikou. Další kritéria potom vzešly z pravidel a praktičnosti návrhu. Jako například snaha o minimalizaci plochy zemních smyček, oddělení číslicové a analogové části a umístění veškerých konektorů na okraj desky. Uplatněním všech těchto kritérií vzniklo obvodové uspořádání, které vystihuje obrázek 22.



Obrázek 22: Přibližné rozmístění obvodů na DPS

Rozměr DPS je 200 x 140 mm. V každém rohu je umístěn montážní otvor o průměru 3 mm. Vzhledem k rozměrům řídicího procesoru Arduino Due je nutné umístit do středu desky. Od tohoto stavu se poté odvíjelo rozmístění ostatních obvodů. Každý obvod je umístěn, pokud možno, v blízkosti pinů Arduina, na které je napojen. Obvody využívající piny PWM jsou tedy umístěny v horní části DPS. Stejně tak převodník komunikační linky UART. V pravé části jsou umístěny obvody využívající digitální vstupy nebo výstupy. V blízkosti napájecích svorek Arduina, tedy v dolní části DPS, je pak umístěn napájecí zdroj, nalevo jsou poté umístěny obvody pro předzpracování analogových signálů.

Jelikož je Arduino spojeno s DPS přes tzv. hřebíkové konektory, je umístěno ze strany spojů. Prostor vzniklý mezi těmito konektory je využit pro externí AD převodníky. Tím se podařilo separovat analogovou a digitální část řídicí jednotky a zajistit, že se analogové a digitální cesty vzájemně nekříží a nevedou ve své blízkosti. V přílohách je uveden layout DPS (Příloha A) a osazovací plán (Příloha B). Fotografie hotové řídicí jednotky s popisem je uvedena na obrázku 23.



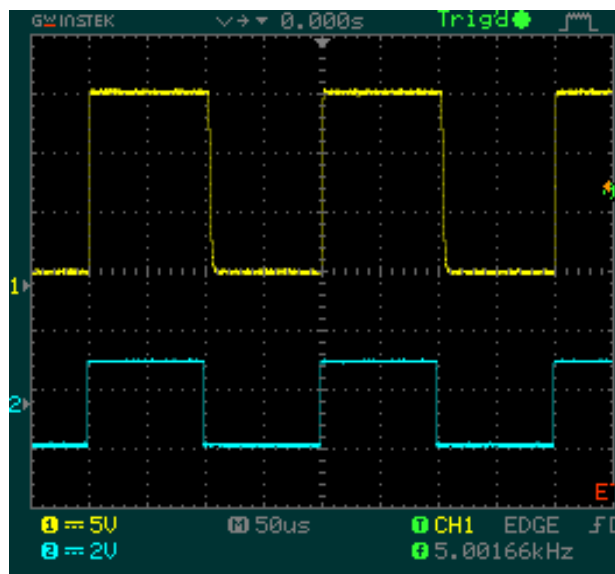
Obrázek 23: Hlavní řídicí jednotka

3 Funkční testy sestaveného hardwaru

Na sestavené řídicí jednotce byly v laboratoři KEEZ otestovány stěžejní části a funkce, jako jsou DC/DC měniče, spínače výkonových budičů, světelná indikace stavu jednotky a AD převodníky. Nejprve byly provedeny testy bez připojeného Arduina, a to měření výstupního napětí DC/DC měničů, testování funkčnosti spínačů výkonových budičů a testování světelné indikace stavu jednotky

3.1 Spínače budičů výkonového modulu

Spínače byly testovány připojením frekvenčního generátoru k jejich vstupu (bázovému odporu tranzistoru BC337, neboli k příslušnému PWM výstupu). Pracovní frekvence spínače je asi 2 kHz, testovací frekvence byla pro jistotu vyšší, a to 5 kHz. Napětí generátoru bylo nastaveno cca na 3 V, jelikož spínač má být řízen napětím 3,3 V. Průběh signálu generátoru a výstupní průběh spínače byl připojen k osciloskopu GVInstek a zaznamenán počítačem pomocí programu Freewave. Průběh spínání je uveden na obrázku 24.



Obrázek 24: Výstupní průběh spínače při frekvenci 5kHz

Kanál 1 (žlutý průběh) zobrazuje výstupní charakteristiku spínače, hodnota napětí v logické 1 je 15 V. Je zde vidět nepatrné zkreslení sestupné hrany. Zkreslení je nejspíš způsobeno parazitními kapacitami. Vzhledem k tomu, že reálná spínací frekvence bude zhruba poloviční, je výstupní průběh spínače zcela vyhovující.

Kanál 2 (modrý průběh) zobrazuje vstupní testovací signál z frekvenčního generátoru. Pro přesné řízení motorů je důležitá minimální odezva regulační smyčky. Vidíme, že spínače reagují na signál z generátoru prakticky okamžitě, ačkoliv nepatrné zpoždění je na obrázku viditelné.

3.2 Světelná indikace stavu jednotky

Světelná indikace byla otestována přivedením příslušného napětí (3,3 V) na bázevý odpor tranzistoru (PIN45). Po jeho přivedení signalizační LED svítla, po odpojení opět zhasla. Indikace je tedy funkční a může opticky signalizovat provozní stavy jednotky dle naprogramovaného softwaru.

3.3 AD převodník

Funkce AD převodníku byla otestována na nepájivém poli, a to z důvodu problematické simulace zpětnovazebního signálu z LEM sond. Testovací napětí tedy bylo přivedeno přímo na vstup AD převodníku a vyčteno bylo pomocí Arduina Due, stejně jako tomu bude ve skutečnosti. Vstupní napětí bylo nastavováno odporovým trimrem a měřeno multimetrem Mastech MY69. AD převodník byl otestován v celém rozsahu referenčního napětí, které je stejné jako napájení, tedy 3,3 V. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

$U_{REF} = 3,323 \text{ V}$						
$U_{IN_MER} \text{ [V]}$	0,0012	0,0044	1	2	3,229	3,323
ADC	0	1	1228	2460	4062	4092
$U_{IN_VYP} \text{ [V]}$	0,000000	0,000811	0,996251	1,995747	3,295417	3,319755
$\Delta U \text{ [V]}$	0,001200	0,003589	0,003749	0,004253	0,066417	0,003245

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty ADC

3.3.1 Příklady výpočtů

Námi použitý AD převodník MPC3201 má rozlišení 12 bitů. Je tedy schopen rozlišit 2^{12} (4096) hodnot. Zpětný přepočtení napětí, které bylo převedeno na číslo, je proveden dle rovnice 17. Dále byl proveden výpočet absolutní chyby dle rovnice 18.

$$U_{IN_VYP} = \frac{ADC \cdot U_{REF}}{10^{12}} = \frac{2460 \cdot 3,323}{4096} \doteq 1,995 \text{ V}$$

U_{IN_VYP} – Vstupní vypočtené napětí
 U_{REF} – Referenční napětí ADC
 ADC – Hodnota AD převodníku

Rovnice 17: Přepočtení číselné hodnoty ADC na napětí

$$\Delta U = |U_{IN_MER} - U_{IN_VYP}| = |2 - 1,995747| \doteq 0,0043 \text{ V}$$

U_{IN_MER} – Vstupní změřené napětí
 U_{IN_VYP} – Vstupní vypočtené napětí
 ΔU – Absolutní chyba měření

Rovnice 18: Výpočet absolutní chyby

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s technologií studentského experimentálního elektromobilu. Nastudování koncepcí předchozích použitých typů řídicích jednotek a následné zkonstruování, vyrobení a oživení nové jednotky.

V první kapitole bakalářské práce jsou uvedeny informace týkající se obecné činnosti hlavní řídicí jednotky. Dále je popsána funkce pomocné řídicí jednotky a uvedeny jsou také principy měření zpětnovazebních signálů. Následuje podkapitola, kde je popsán historický vývoj hlavní řídicí jednotky. Zde jsem se snažil shrnout nejdůležitější parametry, které jsou nezbytné pro jejich srovnání.

Druhá kapitola se zabývá hardwarem nově navržené řídicí jednotky. V první podkapitole je rozebrán výběr vhodných součástek. Zde jsem se snažil nejdříve popsat jakou funkci mají dané obvody plnit a které součástky by byly pro tyto obvody vhodné. Nakonec je uveden typ a nejdůležitější parametry zvolených součástek. V druhé podkapitole, která se zabývá popisem navržených schémat, jsem popsal význam ostatních běžných součástek, jako jsou odpory a kondenzátory, a také jsem zde uvedl jejich hodnoty. Výběr parametrů součástek jsem podložil výpočtem, nebo doporučením od výrobce, uvedeném v datasheetu. V poslední podkapitole jsou stručně popsána kritéria plynoucí z technologie výroby a předchozí verze řídicí jednotky, kterými jsem se musel při návrhu řídit. Při návrhu jsem uplatnil jak své zkušenosti získané při realizaci jiných projektů, tak doporučení a pravidla z odborné literatury. Návrh jsem provedl v programu Eagle, verzi 7.2.0.

V poslední, třetí kapitole jsou popsány základní testy, které bylo možno provést před nainstalováním jednotky na vozidlo. Ověřil jsem zde funkčnost napájecího obvodu, optickou signalizaci, tranzistorové spínače budičů výkonového modulu, a nakonec AD převodníky. Všechny zmíněné testy byly úspěšné. Výstupní napětí DC/DC měničů je s přijatelnou přesností stabilní, světelná indikace je také plně funkční. Tranzistorové spínače vykazují dobrou odezvu na řídicí signál a mají minimální zpoždění. Jedna z naměřených hodnot AD převodníkem, nabývá o řád vyšší absolutní chyby než ostatní. Tuto odchylku považuji za hrubou chybu, s náhodným charakterem. Přesnost AD převodníků jinak odpovídá očekávání.

Výsledkem mé práce je sestavená, oživená a funkční řídicí jednotka, která je připravená k naprogramování a nainstalování na vozidlo. Avšak až testy na vozidle ukáží, zda se skutečně podařilo vyřešit v začátku nastíněné problémy předchozí verze řídicí jednotky. Je jasné, že rozsah problematiky, řešené v této práci a na vozidle obecně je obrovský, ne-li nevyčerpatelný, protože s každou inovací nebo vyřešeným problémem člověka napadne další možnost zdokonalení. Nicméně cíl vytyčený v této bakalářské práci se mi podařilo splnit.

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] LELEK, Tomáš. Elektrický pohon bateriového studentského experimentálního elektromobilu [online]. Pardubice, 2013 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52198/LelekT_ElektrickyPohon_OC_2013.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Diplomová práce. UPCE. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [2] SADÍLEK, Ondřej. Energetická zdrojová soustava pro studentský experimentální elektromobil [online]. Pardubice, 2013 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52573/SadilekO_EnergetickaZdrojova_OC_2013.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Diplomová práce. UPCE. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [3] HLADÍK, Pavel. Elektronické řízení malého elektrického vozidla [online]. Pardubice, 2014 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/56138/HladikP_ElektronickeRizeni_JN_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=n. Diplomová práce. UPCE. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.
- [4] Datasheet LA55-P: Current transducer. In: *Lem* [online]. LEM, 2015 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/la_55-p_e.pdf
- [5] Datasheet LV25-P: Voltage transducer. In: *Lem* [online]. LEM, 2014 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf
- [6] Datasheet SAM3X/A. *Atmel* [online]. San Jose: Atmel Corporation, 2015 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-11057-32-bit-cortex-m3-microcontroller-sam3x-sam3a_datasheet.pdf
- [7] LOTZENBURGER, Lars. Výběr vhodné architektury analogového převodníku. In: *Pandatron* [online]. 2010 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?1506&vyber_vhodne_architektury_analogoveho_prevodniku
- [8] A/D převodník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk

- [9] POSOLDA, František. *Delta sigma A/Č převodník* [online]. Praha, 2009 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2010_Posolda_Frantisek_locked.pdf. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Vedral CSc.
- [10] Datasheet MCP3201. In: Microchip [online]. Microchip Technology, 2007 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21290D.pdf>
- [11] Datasheet DC/DC Converter: TMR6. In: *Tracopower* [online]. Traco Electronic, 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://assets.tracopower.com/20161207163152/TMR6/documents/tmr6-datasheet.pdf>
- [12] BEZSTAROSTI, Jiří. Tranzistor polopatě. In: Robodoupe [online]. 2011 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2012/01/tranzistor_polopate.pdf
- [13] Datasheet Amplifier Transistors: BC337. In: Onsemi [online]. Colorado: ON Semiconductor [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/BC337-D.PDF
- [14] Datasheet Amplifier Transistors: BC327. In: Onsemi [online]. Colorado: ON Semiconductor [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/BC327-D.PDF
- [15] Datasheet MAX3232. In: Maximintegrated [online]. San Jose: Maxim Integrated, 2007 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
- [16] Datasheet PC817. In: Semiconductors [online]. Sharp [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.semiconductors.com.pl/web/pliki/PC817_PC827_PC837_PC847.pdf
- [17] Datasheet 78L05: Positive voltage regulators. In: St [online]. STMicroelectronics, 2016 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/15/55/e5/aa/23/5b/43/fd/CD00000446.pdf/files/CD00000446.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000446.pdf>
- [18] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Blokové schéma uspořádání elektrické výzbroje	- 10 -
Obrázek 2: Vnitřní zapojení proudové sondy LA55-P [4]	- 12 -
Obrázek 3: Vnitřní zapojení napěťové sondy LV25-P [5]	- 12 -
Obrázek 4: Blokové schéma ADC procesoru SAM3X8E [6]	- 14 -
Obrázek 5: Zapojení multiplexeru a ADC [7]	- 15 -
Obrázek 6: Model analogového vstupu obvodu MCP3201 [10]	- 18 -
Obrázek 7: Zapojení kapacit a vnitřní blokové schéma obvodu MAX3232CPE+ [15]	- 21 -
Obrázek 8: Zapojení AD převodníku	- 22 -
Obrázek 9: LC filtr v napájecí větvi	- 23 -
Obrázek 10: Zapojení DC/DC měniče	- 24 -
Obrázek 11: Invertující zapojení OZ s posunutou nulou, určené pro signály z proudového LEMu	- 25 -
Obrázek 12: Neinvertující zapojení OZ, určené pro signál z napěťového LEMu	- 26 -
Obrázek 13: Vstupní dělič signálu z IRC čidla otáček	- 27 -
Obrázek 14: Spínač budiče výkonového modulu	- 28 -
Obrázek 15: Reálné zapojení obvodu MAX3232CPE+	- 31 -
Obrázek 16: Zapojení stabilizátoru 78L05	- 32 -
Obrázek 17: Připojení optronu k výstupu Arduina	- 32 -
Obrázek 18: Zpracování signálu z plynové rukojeti	- 34 -
Obrázek 19: Připojení tlačítka na plynové rukojeti	- 35 -
Obrázek 20: Propojení procesoru a nabíječe	- 36 -
Obrázek 21: Připojení LED k výstupu Arduina	- 36 -
Obrázek 22: Přibližné rozmístění obvodů na DPS	- 38 -
Obrázek 23: Hlavní řídicí jednotka	- 39 -
Obrázek 24: Výstupní průběh spínače při frekvenci 5kHz	- 40 -

Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet zesílení OZ v invertujícím zapojení	- 26 -
Rovnice 2: Výpočet zesílení OZ v neinvertujícím zapojení	- 27 -
Rovnice 3: Výpočet bázevého proudu BC327	- 29 -
Rovnice 4: Výpočet bázevého odporu R3.....	- 29 -
Rovnice 5: Výpočet kolektorového proudu BC337	- 30 -
Rovnice 6: Výpočet bázevého proudu BC337	- 30 -
Rovnice 7: Výpočet bázevého odporu R6.....	- 30 -
Rovnice 8: Výpočet předřadného odporu R66 pro PC817.....	- 33 -
Rovnice 9: Výpočet bázevého proudu BC337 pro PC817.....	- 33 -
Rovnice 10: Výpočet bázevého odporu R65.....	- 33 -
Rovnice 11: Výpočet bázevého proudu BC327 pro PC817.....	- 33 -
Rovnice 12: Výpočet bázevého odporu R63.....	- 33 -
Rovnice 13: Výpočet mezní frekvence RC filtru	- 34 -
Rovnice 14: Výpočet předřadného odporu R56 pro LED	- 37 -
Rovnice 15: Výpočet bázevého proudu BC337 pro LED.....	- 37 -
Rovnice 16: Výpočet bázevého odporu R58.....	- 37 -
Rovnice 17: Přepočtení číselné hodnoty ADC na napětí	- 41 -
Rovnice 18: Výpočet absolutní chyby	- 41 -

Seznam tabulek

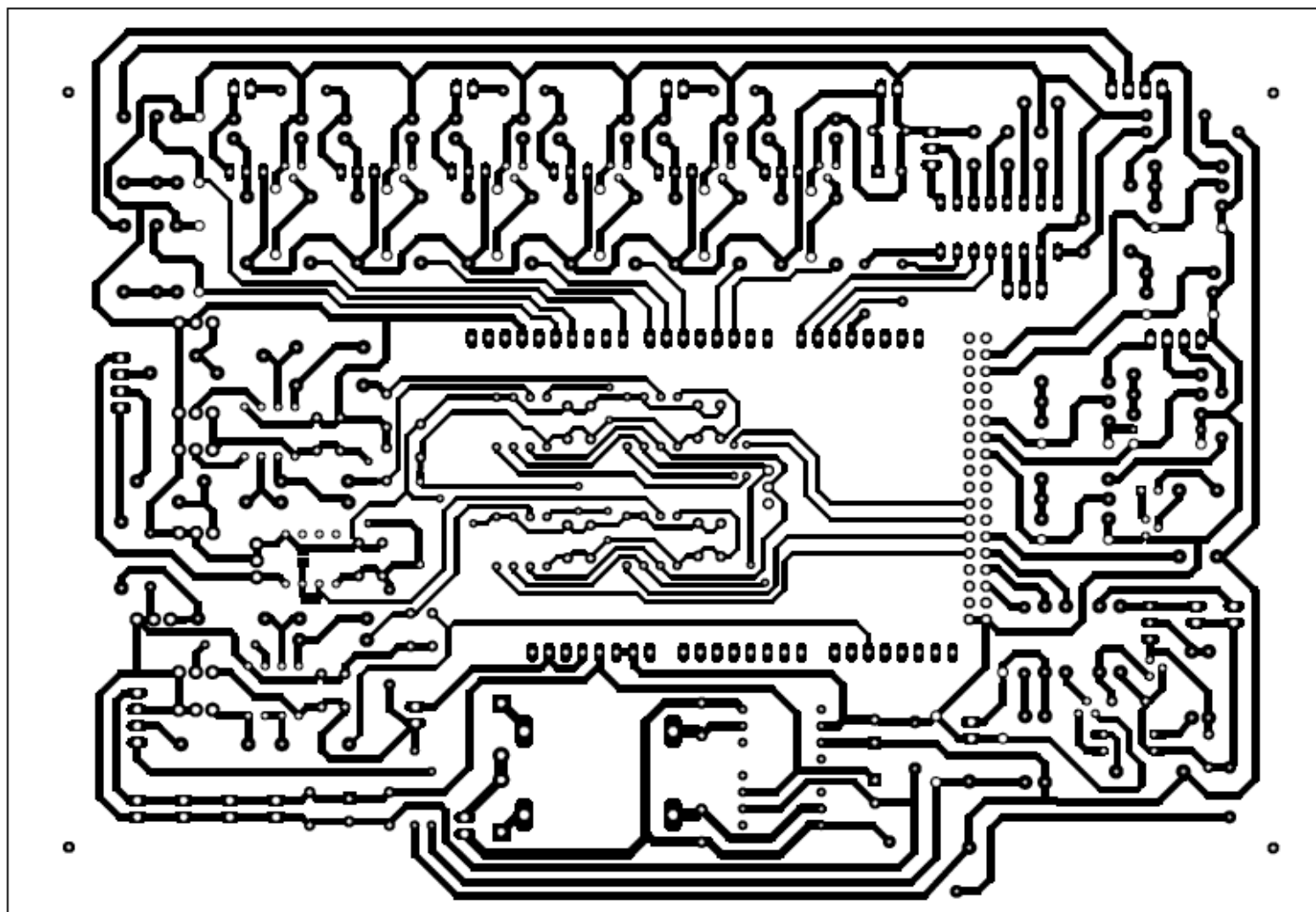
Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty ADC	- 41 -
---	--------

Seznam příloh

Příloha A: Layout DPS hlavní řídicí jednotky	- 48 -
Příloha B: Osazovací plán DPS hlavní řídicí jednotky	- 49 -

Přílohy

Příloha A: Layout DPS hlavní řídicí jednotky



Příloha B: Osazovací plán DPS hlavní řídicí jednotky

