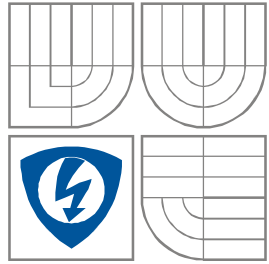


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

JÍZDNÍ KOLO S ELEKTRICKÝM MOTOREM A BENZÍNOVOU ELEKTROCENTRÁLOU

ELECTRIC BIKE WITH A COMBUSTION-ENGINE-POWERED GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Dominik Mička

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Dominik Mička

ID: 134558

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Jízdní kolo s elektrickým motorem a benzinovou elektrocentrálou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a realizujte obvody ovládající servomechanismus plynu spalovacího motoru podle algoritmu navrženého v semestrálním projektu 2.
2. Oživte obvody ovládání plynu a ověřte jejich funkčnost.
3. Namontujte spalovací motor a ovládací obvody na vozidlo a ověřte funkčnost celého systému.
4. Proveďte sérii ověřovacích měření (výkon, trakční charakteristiky, spotřeba paliva, atd.).
5. Vypracujte technickou dokumentaci k elektrické části systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)
[2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Cílem této diplomové práce je koncepční návrh a realizace motorového kola se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu. Byla navržena řídicí strategie umožňující dosažení maximální účinnosti spalovacího motoru při provozu elektropohonu v širokém rozsahu momentu a otáček. Jednotlivé funkční bloky byly realizovány, byl také realizován a oživen hardware všech potřebných obvodů. Nakonec byl vyvinut a odladěn řídicí software. Funkčnost celku byla dokumentována zkušebními jízdami a orientačními měřeními.

Abstract

A conceptual design and realization of a motor bike using combustion engine and electrical power transfer is the objective of this master's thesis. Control strategy that allows combustion engine to reach maximal efficiency cooperating with wide range speed and torque operating area electromotor was created. All function blocks were realized. Also hardware of all needed parts was developed. The last part was a design and debugging of control software. Finally the functionality was documented by test drives and measurements.

Klíčová slova

DC/DC měnič; Elektropohon; Hybridní pohon; Mikrokontrolér; Motorové kolo; Spalovací motor; Synchronní generátor s PM; Usměrňovač

Keywords

DC/DC converter; Electric motor drive; Hybrid drive; Microcontroller; Motor bike, Combustion engine; Synchronous generator with PM; Rectifier

Bibliografická citace

MIČKA, D. *Jízdní kolo s elektrickým motorem a benzinovou elektrocentrálou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 58 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma *Jízdní kolo s elektrickým motorem a benzinovou elektrocentrálou* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

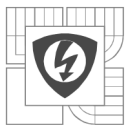
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce *doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D.* za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

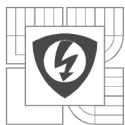
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 KONCEPCE HYBRIDNÍHO POHONU ELEKTROKOLA	13
1.1 SÉRIOVÝ HYBRIDNÍ POHON	13
1.2 PARALELNÍ HYBRIDNÍ POHON	13
1.3 VÝBĚR POHONU	14
2 ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE	15
2.1 SPALOVACÍ MOTOR	15
2.1.1 PARAMETRY SPALOVACÍHO MOTORU	16
2.1.2 NASTARTOVÁNÍ A VYPNUTÍ MOTORU	16
2.1.3 CHOD MOTORU	16
2.1.4 SPOTŘEBA PALIVA	16
2.2 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR S PM	17
2.2.1 PARAMETRY SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S PM	17
2.2.2 USMĚRŇOVAČ	19
3 ELEKTROPOHON	21
3.1 ELEKTROMOTOR HEINZMANN S INTEGROVANOU PLANETOVOU PŘEVODOVKOU	21
3.2 DC/DC MĚNIČ	21
3.2.1 PARAMETRY MĚNIČE	23
4 REGULAČNÍ STRUKTURA	25
5 ŘÍZENÍ POHONU A POMOCNÉ OBVODY	28
5.1 ŘÍDÍCÍ DESKA S MIKROKONTROLÉREM	28
5.2 POMOCNÉ OBVODY	29
5.3 POPIS A ŘÍZENÍ SERVOMOTORU	32
6 ŘÍDÍCÍ SOFTWARE	35
6.1 NASTAVENÍ MIKROPROCESORU	35
6.2 NASTAVENÍ PŘÍZNAKŮ	36
6.3 NASTAVENÍ PWM SIGNÁLŮ	36
6.4 MĚŘENÍ OTÁČEK GENERÁTORU	37
6.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ A PROUDU	37
6.6 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU Z RUKOJETI	38
6.7 REGULÁTORY	41

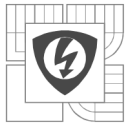


7 UVEDENÍ DO PROVOZU A MĚŘENÍ	43
7.1 MĚŘENÍ BĚHEM JÍZDY	44
7.2 MĚŘENÍ NA SYNCHRONNÍM GENERÁTORU S PM	47
8 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	48
8.1 VÝBĚR KOLA	48
8.2 ÚPRAVA KOLA.....	48
8.3 ZABUDOVÁNÍ MĚNIČE NA JÍZDNÍ KOLO	50
8.3.1 NÁVRH POMOCNÉ DESKY	51
ZÁVĚR.....	53
LITERATURA	54
PŘÍLOHA 1: SEZNAM SOUČÁSTEK POMOCNÝCH OBVODŮ.....	55
PŘÍLOHA 2: CELKOVÉ SCHÉMA POMOCNÝCH OBVODŮ.....	57
PŘÍLOHA 3: NAMĚŘENÉ HODNOTY NA STEJNOSMĚRNÉ STRANĚ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S PM.....	58

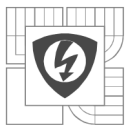


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Blokové schéma sériového hybridního pohonu.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.2: Blokové schéma paralelního hybridního pohonu.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 1.3: Blokové schéma našeho systému pro elektrický přenos výkonu.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.1: Schéma vzájemného uložení generátoru a spalovacího motoru.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.2: Generátor AXi 5345/18 Gold Line [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.3: Šestipulzní usměrňovač se Schottkyho diodami.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.1: Schéma DC/DC měniče.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.2: Průběhy na DC/DC měniči v režimu Step-Down[13].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.3: Průběhy na DC/DC měniči v režimu Step-Up[13].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.4: Realizovaný DC/DC měnič s maximálním výkonem až 1200 W.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.1: Závislost příkonu, výkonu, otáček a momentu motoru na napájecím napětí[1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4.2: Blokové schéma celkového řízení pohonu kola.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.3: Závislost proudu (momentu) motoru na jeho otáčkách a nastavení regulačního omezení.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5.1: Popis 50-ti pinového konektoru řídicí desky [11].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5.2: Připojení vstupních a výstupních signálů ke konektoru mikrokontroléru.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5.3: Zpracování vstupního napětí na pomocné desce.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5.4: Zdroj pro servopohon realizovaný pomocí IO MC34063.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5.5: Zpracování signálu z plynové rukojeti.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5.6: Úprava signálu pro měření otáček generátoru.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.7: Obvod pro posílení signálu z mikrokontroléru pro servopohon.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.8: Servopohon HS-311[7].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.9: Příslušenství pro servopohon HS-311[7].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.10: Ukázka PWM signálu ovládající servopohon [10].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6.1: Závislost střídavého a zvyšujícího měniče na hlavním ovládacím signálu s_H.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.2: Blokové schéma zvolených regulátorů v rekurentním tvaru [12].....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 7.1: Kolo připraveno na vložení měniče a pomocných obvodů, včetně servopohonu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 7.2: Ukázka prvotního programování.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7.3: Naměřené průběhy z programu FreeMaster.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7.4: Měření napětí na motoru a výstupu z usměrňovače.....</i>	<i>46</i>



<i>Obr. 7.5: Průběh signálu plynové rukojeti, proudu motoru a žádaného proudu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7.6: Závislost napětí na stejnosměrné straně generátoru při zatěžování pro jednotlivé otáčky spalovacího motoru.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 8.1: Použité kolo Amsterdam Original 3i od firmy Electra [6]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 8.2: Ukázka umístění měniče v plastové krabici s pomocnými obvody a servopohonem.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 8.3: Layout spodní strany pomocné desky</i>	<i>51</i>



SEZNAM TABULEK

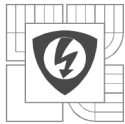
<i>Tab. 1: Parametry motoru Subaru Robin EH035 [4]</i>	16
<i>Tab. 2: Parametry motoru AXi 5345/18 Gold Line [5]</i>	18
<i>Tab. 3: Parametry zvoleného elektromotoru firmy Heinzmann</i>	21
<i>Tab. 4: Parametry DC/DC měniče</i>	24
<i>Tab. 5: Parametry servopohonu HS-311[7]</i>	33



ÚVOD

Elektrokolo jako dopravní prostředek bylo zkonstruováno pro usnadnění přepravy osob, zejména starších či méně fyzicky zdatných, na kratší až středně dlouhé vzdálenosti (jednotky až desítky kilometrů). Elektrokolo není jediným jízdním kolem s pomocným motorem na silnici. Pokud pomineme motocykly, existují i jízdní kola s běžným benzínovým motorem. Jejich nevýhodou je ovšem nutnost použití spojky a dále případně převodovky pro lepší využití výkonu. Tento fakt již komplikuje celkovou konstrukci motorového kola a zvyšuje nároky na jeho údržbu. Oproti tomu elektrokolo s elektrickým motorem v náboji kola je konstrukčně méně komplikované. Komplikace spočívající v použití spojky zcela odpadá, jelikož elektrický motor je schopen dodávat konstantní moment již od nulových otáček. Ovšem nevýhodou elektrokola je jeho relativně malý dojezd. Ten se odvíjí od kapacity baterií. Pro velký dojezd je potřebná velká kapacita a baterie je pak objemná a těžká a její cena neúměrně velká. Elektrokola mívají dojezd zhruba do cca 100 km s pomocí šlapání a poté je nutno je připojit k elektrické síti a zdlouhavě (několik desítek minut až několik hodin) dobíjet.

Pro eliminaci těchto nedostatků se jeví jako vhodná volba koncepce hybridního pohonu, kdy je baterie průběžně dobíjena generátorem poháněným spalovacím motorem, nebo baterie zcela chybí a zdrojem elektřiny je pouze generátor. V takovém případě se vlastně jedná o tzv. systém elektrického přenosu výkonu ze spalovacího motoru na poháněné kolo. Tento systém je běžně používán v dieselelektrických lokomotivách, kdy je za pomoci diesellového agregátu vyráběna elektrická energie, která pohání přes měnič elektromotory.



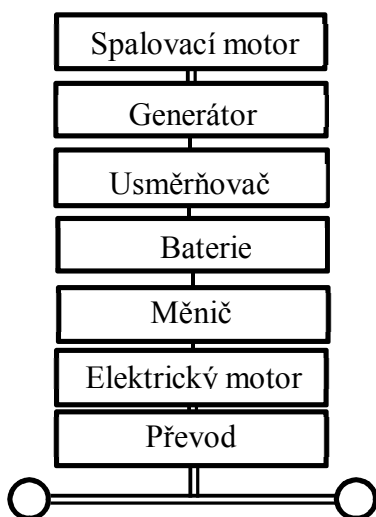
1 KONCEPCE HYBRIDNÍHO POHONU ELEKTROKOLA

Hybridním pohonem bývá označován kombinovaný pohon spalovacím motorem a elektromotorem. Z principu lze definovat sériový a paralelní hybridní pohon, případně jejich kombinaci. [3]

1.1 Sériový hybridní pohon

V této koncepci spalovací motor pohání generátor, který nabíjí baterii. Elektropohon (měnič + elektromotor + pevný převod) je pak napájen z této baterie. Výhodou tohoto uspořádání je, že spalovací motor nemusí být dimenzován na špičkový výkon, jímž disponuje trakční elektrický pohon. Špičky výkonu totiž hradí akumulátor a spalovací motor (s generátorem) může dodávat pouze dlouhodobý potřebný střední výkon. Další výhodou je naprostá nezávislost otáček spalovacího motoru a otáček hnacího hřídele (elektromotor). Díky oběma uvedeným výhodám lze pak benzínový (nebo diesellový) motor provozovat trvale v nejchopárnějším režimu s vysokou účinností případně životností.

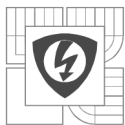
Nevýhodou sériového hybridního pohonu je horší účinnost přenosu mechanického výkonu z hřídele spalovacího motoru na hnané kolo. Místo pouhé spojky a převodovky s vysokou účinností (95%) je přítomna soustava generátor + usměrňovač + měnič + elektromotor. Průměrná celková účinnost této soustavy bude pouze okolo 70%.



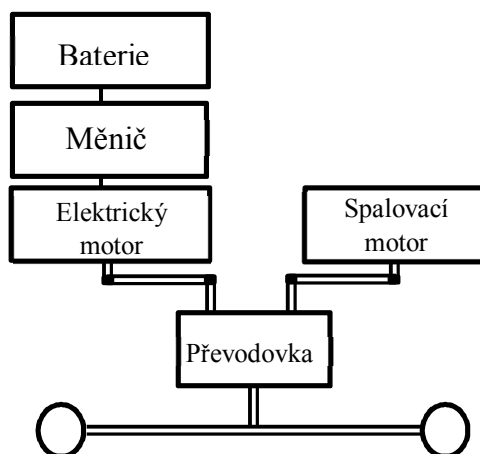
Obr. 1.1: Blokové schéma sériového hybridního pohonu

1.2 Paralelní hybridní pohon

Benzínový i elektrický motor jsou přes hřídele spojeny s převodovkou, přes kterou je poháněna náprava. U tohoto pohonu je možno využít současně (paralelně) mechanický výkon z obou typů. Elektrický pohon je napájen z baterií, které je nutno po vyčerpání znovu dobít. Toto uspořádání opět umožňuje, aby byl spalovací motor provozován v optimálním režimu. Např. v nízkých



otáčkách zajistí potřebný moment pouze elektropohon (velký moment, malý výkon) a spalovací motor dodá výkony větší (ve větších otáčkách, kdy je také schopen účinného provozu).

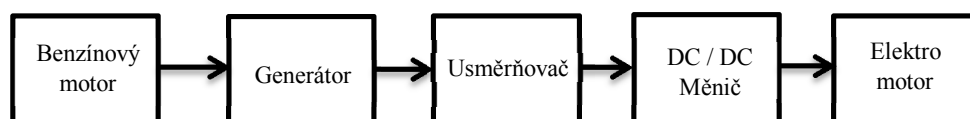


Obr. 1.2: Blokové schéma paralelního hybridního pohonu

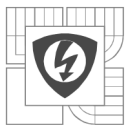
1.3 Výběr pohonu

Pro aplikaci na jízdní kolo jsou kladeny požadavky na minimální hmotnost systému a také s tím související konstrukční jednoduchost. Paralelní hybridní pohon proto není vhodný, jelikož by se v podstatě jednalo o nutnost namontovat na jedno jízdní kolo jak kompletní samostatně funkční pohon spalovacím motorem (spojka atd.), tak elektropohon (baterie, měnič, elektromotor).

Zvolíme proto sériový hybridní pohon a navíc upustíme od použití akumulátoru. Pak sice bude muset spalovací motor být schopen dodávat i špičkové výkony vyžadované elektropohonem, ovšem ušetříme cenu a především hmotnost akumulátoru. Hmotnost spalovacího motoru, generátoru a usměrňovače pak může být srovnatelná nebo nižší než hmotnost obvyklého akumulátoru běžného elektrokola a vzniklé vozidlo bude tedy také srovnatelně těžké s běžným elektrokolem. Vynecháním akumulátoru bychom již v podstatě neměli mluvit o hybridním pohonu, protože nelze kombinovat energii z baterie a „energii benzínu“. Spíše bychom mohli systém nazvat pohon se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu.



Obr. 1.3: Blokové schéma našeho systému pro elektrický přenos výkonu



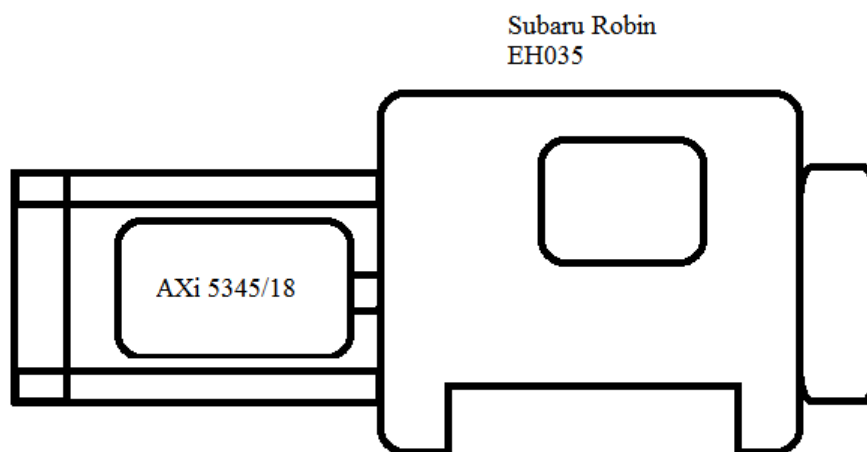
2 ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jako zdroj elektrické energie je na kole umístěna soustava spalovacího motoru, ke kterému je na hřídeli připojen synchronní generátor s permanentními magnety. Tato soustava přes usměrňovací můstek napájí měnič a následně elektrický motor.

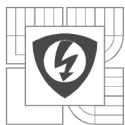
2.1 Spalovací motor

Spalovací benzínový motor je v našem případě tedy nepostradatelnou součástí, neboť získává energii z benzínu a převádí ji na rotační pohyb.

O rotační pohyb se stará spalovací benzínový čtyřtákní motor Subaru Robin EH035, o zdvihovém objemu válce 33 cm^3 a maximálním výkonu $1,18 \text{ kW}$ ($1,6 \text{ HP}$) při 7000 otáčkách za minutu. Jedná se o klasický spalovací motor, který je využíván například v benzínových křovinořezech. Palivo Natural 95 je umístěno v nádrži o objemu 1 litr. Jelikož se jedná o čtyřtákní motor, je potřeba kontrolovat i hladinu oleje. Olej se používá klasický pro čtyřtákní motory s označením SAE 20 nebo 30 o objemu $0,1$ litru. [4]



Obr. 2.1: Schéma vzájemného uložení generátoru a spalovacího motoru



2.1.1 Parametry spalovacího motoru

Tab. 1: Parametry motoru Subaru Robin EH035 [4]

Objem válce	[cm ³]	33,5
Maximální výkon	[kW]	1,18 (1,60 HP) /7000 min ⁻¹
Maximální moment	[N.m]	1,76
Chlazení	[-]	vzduch
Typ oleje	[-]	Automobilový SAE 20 nebo 30, třídy SF nebo vyšší
Kapacita oleje	[l]	0,1
Měrná spotřeba paliva	[g.kw ⁻¹ .h ⁻¹]	340
Váha	[kg]	3,5

2.1.2 Nastartování a vypnutí motoru

Před nastartováním motoru je nutno „natáhnout“ benzín do karburátoru za pomoci sacího kloboučku a umístit páčku sytiče do správné polohy. Startování spalovacího motoru je poté řešeno za pomoci tahového startéru. Po nastartování motoru je nutno páčku sytiče vrátit zpět do původní polohy, aby nedocházelo k příliš velkému obohacování spalovací směsi a tím k větší spotřebě. Vypnutí motoru je řešeno za pomoci spínače na řídicích kola (spínač zamezuje tvorbě vn zapalovacích impulsů).

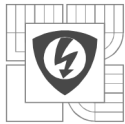
2.1.3 Chod motoru

Motor po nastartování běží na tzv. volnoběh, kdy je nastavena ovládací klapka v karburátoru do pozice, při které se motor nevypne a zároveň udržuje stabilní chod. Při volnoběhu motor udržuje stabilní otáčky cca 1600 ot./min. Volnoběžné otáčky se nastavují pomocí dorazového šroubu na klapce karburátoru.

Při mechanickém zatížení není motor schopen sám volnoběh udržet. Pro udržení nebo zvýšení otáček motoru je nutno klapku v karburátoru víc otevřít a umožnit tak obohacení směsi benzínu a vzduchu vstupující do spalovací komory pístu motoru. Tento proces je ovládán za pomoci plynového lanka, které otáčí klapkou. Při požadavku plného plynu nastává nejefektivnější chod motoru v rozsahu otáček cca 4700 - 7500 otáček za minutu. V tomto rozmezí by měl mít při plném plynu motor nejvyšší výkon a díky vhodnému poměru palivové směsi vstupující do spalovací komory pístu motoru i účinnost.

2.1.4 Spotřeba paliva

Pro tento spalovací motor je v manuálu udána spotřeba paliva 340 g na 1kWh. Pokud víme, že měrná energie benzínu je rovna 31,5 MJ.kg⁻¹, lze určit účinnost spalovacího motoru.



Energie, kterou je schopen motor vyvinout z jednoho kilogramu benzínu:

$$e = \frac{1}{0,34} = 2,94 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \approx 10,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Přepočet měrné energie obsažené v benzínu

$$31,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \approx 8,75 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Účinnost spalovacího motoru:

$$\eta = \frac{2,94}{8,75} \cdot 100 = 34 \%$$

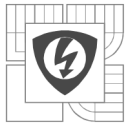
Účinnost spalovacího motoru je tedy rovna 34 %. Znamená to, že třetina energie jde na hřídel spalovacího motoru a zbylé dvě třetiny jsou přeměněny na teplo. Měrná energie uložená v navrhovaném akumulátoru [2] je cca 0,51 MJ.kg⁻¹. Je patrné, že se jedná o hodnotu cca 20-krát nižší, než je měrná mechanická energie na hřídeli spalovacího motoru. Pro lepší srovnání zásobníků energie benzín/akumulátor bychom ke hmotnosti benzínu museli přičíst ještě hmotnost spalovacího motoru i generátoru a také bychom museli započítat účinnost generátoru a usměrňovače. Přesto je zřejmé, že „benzínové“ řešení vychází příznivěji – a to tím více, čím delší je plánovaný dojezd.

2.2 Synchronní generátor s PM

Synchronní generátory s permanentními magnety disponují výhodou vysoké účinnosti při chodu se jmenovitým výkonem. Je to dáno absencí ztrát vinutí spojených s budícím proudem (budící proud je nulový, buzení obstarává permanentní magnet). Naopak např. při chodu s relativně vysokými otáčkami, ovšem malým momentem se mohou negativně projevit ztráty v železe způsobené nemožností odbuzení (pokles účinnosti). Existují i konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety se zvýšenou reakcí kotvy, které umožňují snazší odbuzení statorovým jalovým proudem. Takové odbuzení ovšem s sebou nese nárůst přídavných ztrát ve statorovém vinutí. Důvodem takových konstrukcí je tedy spíše možnost dosažení vyšších otáček při dané maximální hodnotě napětí.

2.2.1 Parametry synchronního generátoru s PM

Pro naši aplikaci byl využit synchronní generátor s permanentními magnety, který je primárně využíván pro pohon leteckých modelů. Jedná se o trojfázový motor AXi 5345/18 Gold Line od firmy Model Motors. Tento motor, v našem případě tedy generátor (nebo alternátor), je v provedení s rotačním pláštěm a vývody vzadu. Výrobce udává, že generátor obsahuje 14 pólů.



Tab. 2: Parametry motoru AXi 5345/18 Gold Line [5]

Otáčky/Volt	K_v [min^{-1}/V]	171
Max. účinnost	η_{max} [%]	94
Proud při max. účinnosti	I_n [A]	25 - 63 (> 85%)
Proud naprázdno / 30 V	I_0 [A]	1,6
Max. zatížitelnost	I_{max} [A]	75 A / 30 s
Vnitřní odpor	R_i [$\text{m}\Omega$]	42
Váha motoru	M [g]	995



Obr. 2.2: Generátor AXi 5345/18 Gold Line [5]

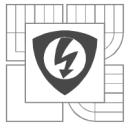
Jestliže je v původním konceptu dimenzován měnič na napájení z baterie o maximálním vstupním stejnosměrném napětí do 30 V, je nutno určit otáčky generátoru, které odpovídají tomuto napětí:

$$n_{sp} = K_v \cdot U_1 = 171 \cdot \frac{30}{\sqrt{2}} = 3627 \text{ min}^{-1}$$

Tedy pro zajištění maximálního napájecího napětí na stejnosměrné straně, je nutno, aby se generátor otáčel rychlostí 3627 otáček za minutu. Při zatížení generátor vytváří moment a tím zatěžuje spalovací motor. Pro udržení konstantního napětí by bylo nutno s rostoucím zatížením zpětnovazebně regulovat otáčky spalovacího motoru na konstantní žádanou hodnotu (ovládáním plynové páčky). Soustava synchronního generátoru se spalovacím benzínovým motorem, je schopna vytvořit maximální stejnosměrné napětí 60 V, což odpovídá cca 6000 ot./min. **Toho však nebude využito, naopak bude regulačně zajištěno, aby ss napětí za usměrňovačem nikdy nepřesáhlo cca 40V.**

Obdobným výpočtem lze určit i maximální proud, který je schopen generátor poskytnout. Tento proud lze určit z momentu spalovacího motoru a z napěťové konstanty, neboť vztah mezi napětím a otáčkami je ekvivalentní ke vztahu momentu a proudu a platí pro ně stejná konstanta generátoru. Odpovídající moment při otáčkách 3627 otáček za minutu je roven cca 1,7 Nm. Po přepočtení konstanty na závislost úhlové rychlosti na napětí lze napsat

$$I = K_v \cdot M = 17,91 \cdot 1,7 = 30 \text{ A}$$



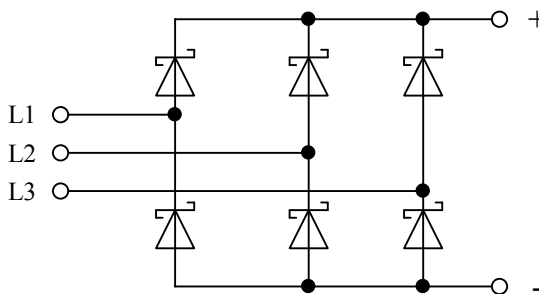
Generátor tedy při maximálním momentu spalovacího motoru je schopen dodávat až 30 A. Tato hodnota je dostačující a je na ni nutno dimenzovat usměrňovač. Výstupní výkon ze synchronního generátoru je na stejnosměrné straně roven

$$P = U \cdot I = 30 \cdot 30 = 900 \text{ W}$$

2.2.2 Usměrňovač

Pro napájení stejnosměrného měniče je nutné, aby výstupní napětí z alternátoru bylo usměrněno, neboť se jedná vlastně o trojfázový synchronní generátor. Z tohoto důvodu je nutno využít šestipulzní usměrňovač, který trojfázové střídavé napětí usměrní. Pro realizaci usměrňovače jsou využity Schottkyho diody kvůli jejich nízkému napěťovému úbytku v propustném směru a tedy nízkým ztrátám.

2.2.2.1 Návrh usměrňovače



Obr. 2.3: Šestipulzní usměrňovač se Schottkyho diodami

Jelikož se pro napájení stejnosměrného měniče využívá proměnné napětí ze synchronního generátoru, postačí pro usměrnění tohoto napětí využít obyčejný neřízený šestipulzní usměrňovač. Nebude zde docházet k rekuperaci energie, neboť zde není žádný akumulátor, který by přebytečnou energii využil. Protože pracujeme s nízkým napětím (s výstupem 30 V), je nutné, aby diody měly co nejmenší úbytek v propustném směru (účinnost).

Jak bylo vypočteno, generátor bude dodávat maximálně 30 V, při 3627 min^{-1} a až 30 A při maximálním dosažitelném momentu spalovacího motoru 1,70 Nm. Výkon dodávaný generátorem se tedy rovná 900 W.

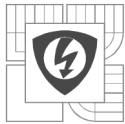
Výstupem ze synchronního generátoru je sinusové napětí. Vztah mezi napětím na stejnosměrné a střídavé straně usměrňovače lze vyjádřit takto:

$$U_D = \sqrt{2} \cdot U_s = \sqrt{2} \cdot 21,21 = 30 \text{ V}$$

Maximální hodnota odebíraného ss proudu je poté rovna

$$I_{max} = I_{sp} = I_d = 30 \text{ A}$$

Pro hodnotu středního proudu každou diodou usměrňovače můžeme napsat



$$I_{stř} = \frac{I_{max}}{3} = \frac{30}{3} = 10 \text{ A}$$

a pro efektivní hodnotu

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17,3 \text{ A}$$

Vhodným kandidátem se jeví dvojitá schottkyho dioda typu B20100 od firmy International Rectifier s prahovým napětím 0,45 V; jmenovitým proudem v propustném směru 20 A; závěrným napětím 100 V a dynamickým odporem 15,8 mΩ.

Usměrňovač je umístěn na hliníkové desce, která slouží jako držák spalovacího motoru. Díky tomuto umístění bude dostatečně velké chlazení pro diody a nebude nutnost vést dlouhé napájecí vodiče, neboť usměrňovač je umístěn v podstatě pod generátorem.

Ztráty jedné větve v usměrňovači poté lze vyjádřit:

$$\begin{aligned} P_{ztr} &= 2 \cdot (U_p \cdot I_{stř} + R_t \cdot I_{ef}^2) = \\ &= 2 \cdot (0,45 \cdot 10 + 15,8 \cdot 10^{-3} \cdot 17,3^2) = \\ &= 18,46 \text{ W} \end{aligned}$$

Celkové ztráty na usměrňovači při plném zatížení proudem budou tedy trojnásobné tj. cca 55,38 W.



3 ELEKTROPOHON

Obecně lze elektropohon rozdělit na měnič a elektromotor. Měnič zajišťuje potřebné napětí a proud, čímž pohání motor a řídí tím jeho rychlost a moment.

3.1 Elektromotor Heinzmann s integrovanou planetovou převodovkou

Jako pohonná jednotka kola je zvolen stejnosměrný motor od firmy Heinzmann typ RN120-2NFB. Tento motor je vpleten do náboje kola a nenarušuje tedy vzhled kola. Díky buzení za pomoci permanentních magnetů ze vzácných zemin má motor velký poměr jmenovitý moment / hmotnost. Dále je v motoru implementovaná planetová převodovka (s malou hmotností), díky které smí mít vlastní motor několikanásobně nižší moment, než je vyžadován na ose poháněného kola, a tak vychází hmotnost vlastního motoru malá (velikost motoru je vždy úměrná momentu nikoliv výkonu).

Maximální točivý moment na ose hnaného kola (za převodovkou) je až 54 Nm. Díky umístěním motoru v náboji kola odpadá nutnost použití složitých převodových stupňů. Předchozí měření s tímto motorem ovšem ukázala problém s hlukem planetové převodovky ve vyšších otáčkách. Z mechanického pohledu je tedy nemožné jet s kolem velkou rychlostí, neboť by vlivem odstředivých sil došlo k poškození motoru a převodovky. Napájení motoru je realizováno kabelem se čtyřmi konektory, ovšem pouze dva jsou připojeny k napájecím uhlíkům motoru, zbylé jsou nevyužity. [1]

Tab. 3: Parametry zvoleného elektromotoru firmy Heinzmann

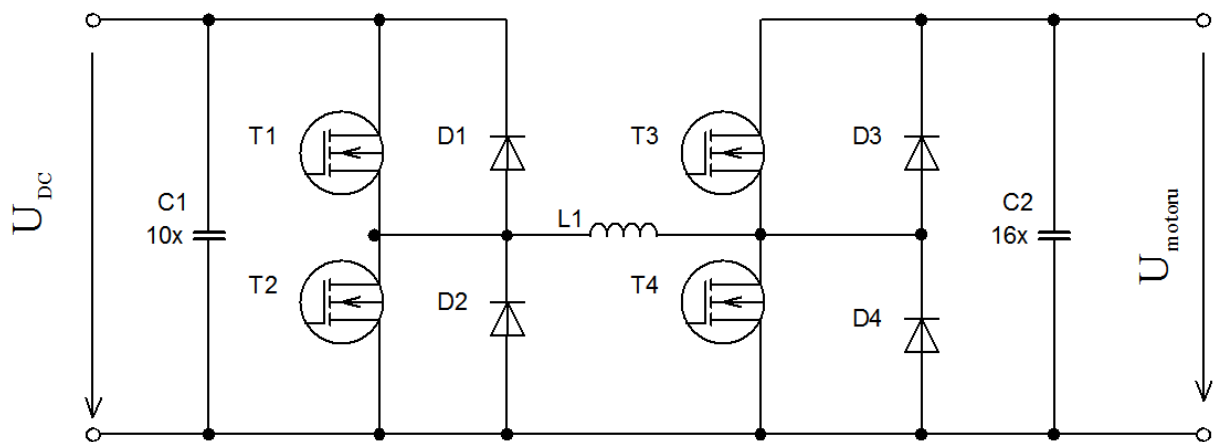
Jmenovitý výkon	P_n [W]	250
Jmenovitý proud	I_n [A]	13,2
Maximální proud	I_{max} [A]	28
Jmenovité otáčky	n_n [min^{-1}]	97
Jmenovitý moment	M_n [Nm]	24,4
Maximální moment	M_{max} [Nm]	54
Účinnost	η [%]	78,9
Napájecí napětí	U [V]	24

3.2 DC/DC měnič

DC/DC měnič slouží k bezeztrátové regulaci (nastavení) svorkového napětí kotvy motoru. U motoru s konstantním cizím buzením (permanentní magnety) jsou pak otáčky motoru přímo úměrné velikosti indukovaného napětí. V projektu použijeme měnič zkonstruovaný na ÚVEE pro konkrétní motor Heinzmann (viz kap. 3.1.). Tento měnič je spojením měničů dvou typů, a to



snižujícího (Step-down) a zvyšujícího (Step-up). Bohužel se v minulých letech počítalo, že tento měnič bude pracovat s konstantním napětím z baterie a tedy v něm byla implementována podpěťová ochrana, jež blokuje chod měniče při napětí baterie nižším než 20V. Toto nastavení je v našem případě nevyhovující, neboť se počítá s proměnlivým napájecím napětím podle otáček generátoru (spalovacího motoru). Řídicí obvody měniče včetně zmíněné podpěťové ochrany budou tedy přepracovány. V měničích je využita zpětnovazební regulace na žádaný proud (proudová smyčka). Plynovou rukojetí je zadávána žádaná hodnota proudu, ovšem v závislosti na okamžité rychlosti. Bude tedy definován profil závislosti momentu na rychlosti tak, aby nebyl překročen požadovaný maximální výkon pohonu. [2]



Obr. 3.1: Schéma DC/DC měniče

Měnič podle Obr. 3.1 je provozován v režimu spjitých proudů. Při funkci měniče v režimu StepDown je trvale sepnutý tranzistor T3 a tranzistor T1 je spínán střídou a tranzistor T2 s doplňkem střídou (1-s). Při funkci měniče v režimu StepUp je trvale sepnutý tranzistor T1 a tranzistor T3 je spínán se střídou s a T4 s doplňkem střídou (1-s).

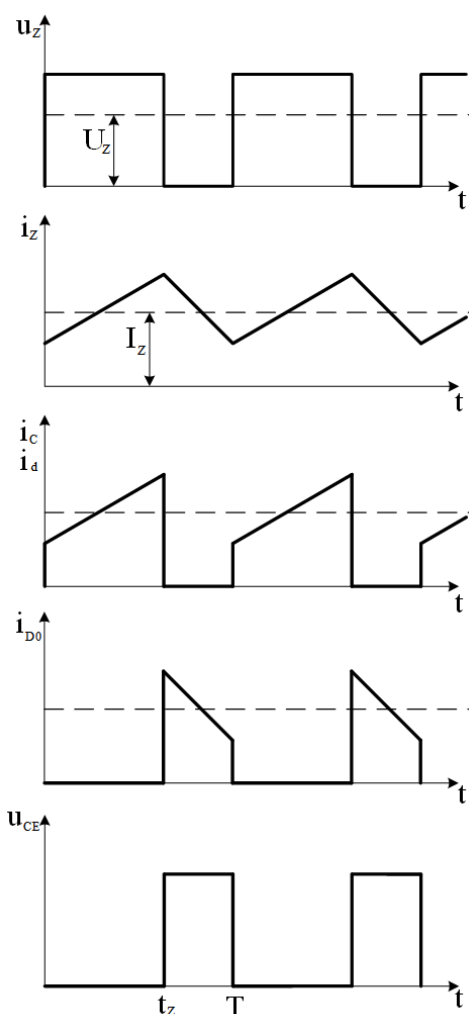
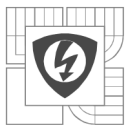
Napětí na výstupu při funkci měniče v režimu StepDown je dáno podle:

$$U_{motoru} = U_{DC} \cdot s \quad (3.1)$$

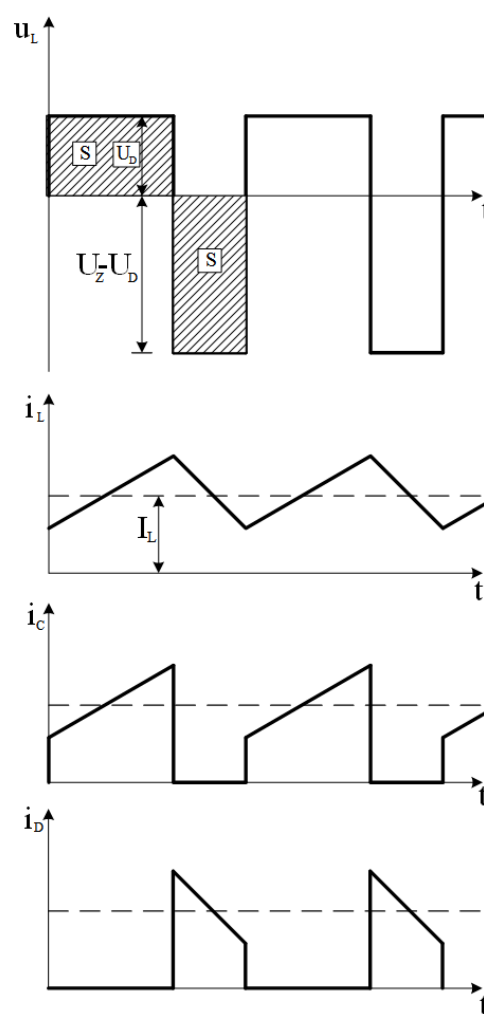
Napětí na výstupu při funkci měniče v režimu StepUp je pak dáno podle:

$$U_{motoru} = \frac{U_{DC}}{s} \quad (3.2)$$

Pokud je tedy třída zvyšujícího měniče malá (limitně se blížíci nule), bude napětí na výstupu velké (blížíci se nekonečnu).



Obr. 3.2: Průběhy na DC/DC měniči v režimu Step-Down[13]



Obr. 3.3: Průběhy na DC/DC měniči v režimu Step-Up[13]

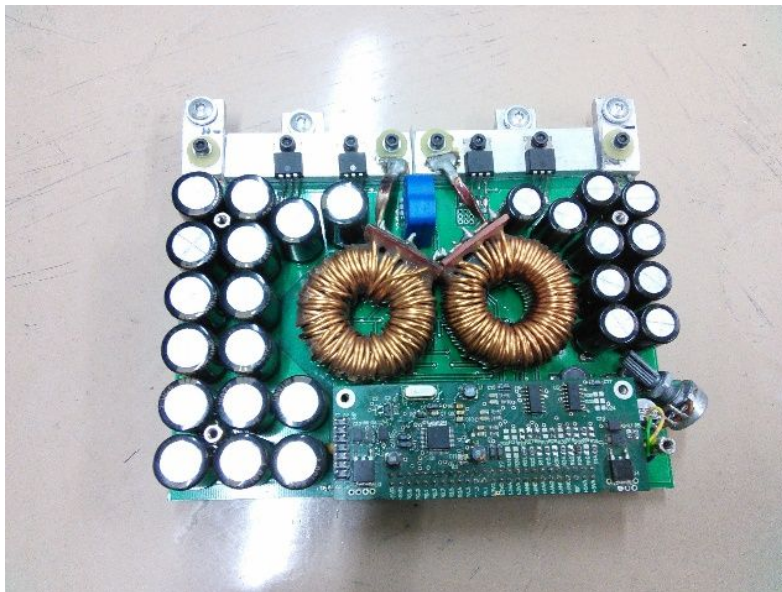
3.2.1 Parametry měniče

V konceptu se počítá s přetočením motoru na vyšší než štítkovou jmenovitou rychlost, a to díky napájení vyšším napětím. Napětí lze plynule nastavovat v rozmezí 0-67 V. V Tab. 4 lze vidět parametry použitého DC/DC měniče. K měniči byly přidány pomocné obvody se stabilizátorem napětí pro pomocné zdroje, což umožňuje spolehlivé provozování měniče se vstupním napětím až 40 V. Pomocné obvody budou podrobněji řešeny dále v kap 5.2.

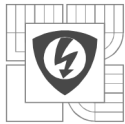


Tab. 4: Parametry DC/DC měniče

Napájecí napětí	[V]	20-40
Maximální vstupní proud	[A]	30
Výstupní napětí	[V]	0 - 70

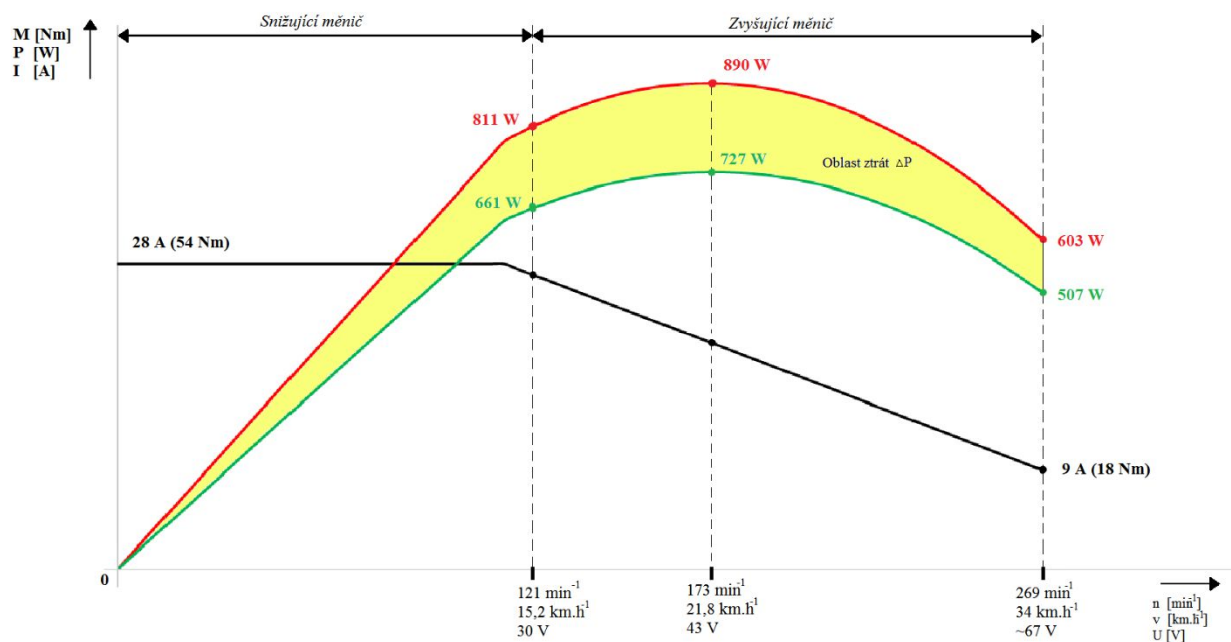


Obr. 3.4: Realizovaný DC/DC měnič s maximálním výkonem až 1200 W



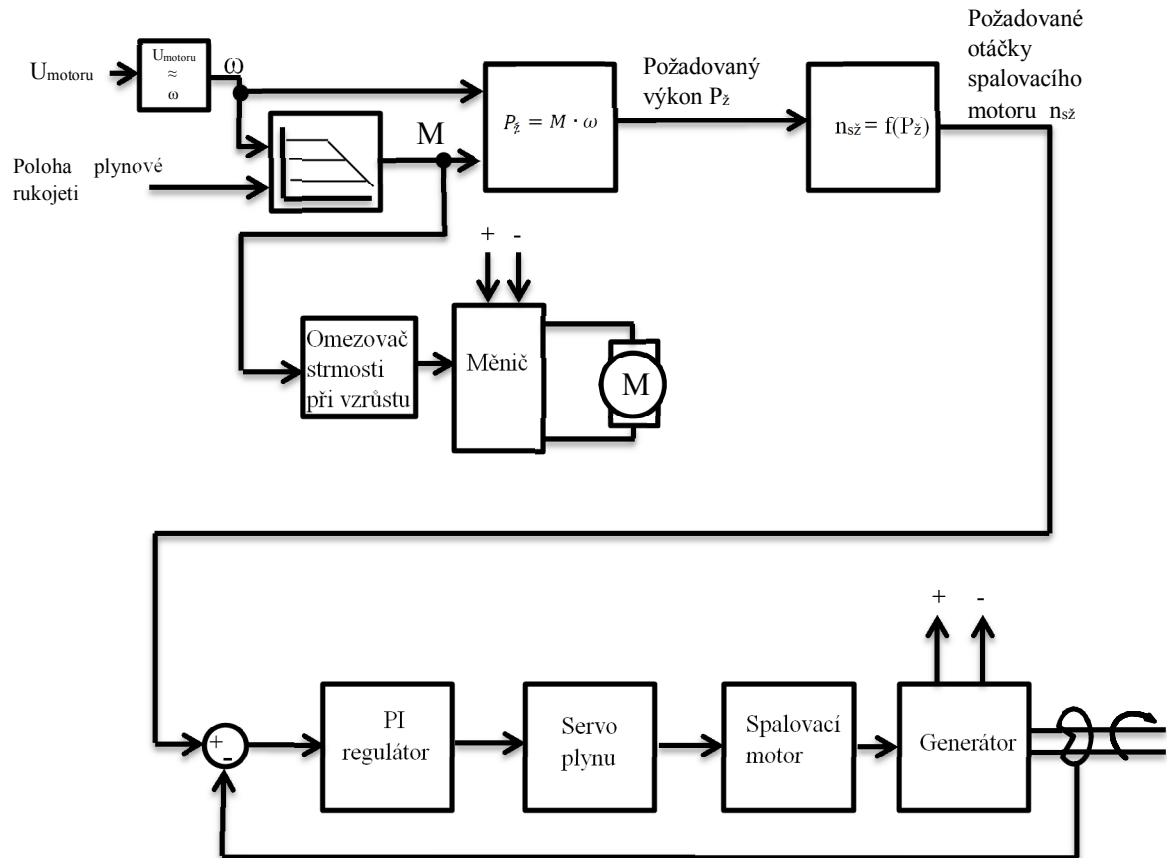
4 REGULAČNÍ STRUKTURA

Na obr. 4.1 lze vidět závislost momentu, proudu, výkonu a příkonu na napájecím napětí. Jak lze vidět na závislosti, maximální proud potřebný pro dosažení maximálního momentu je roven hodnotě 28 A.



Obr. 4.1: Závislost příkonu, výkonu, otáček a momentu motoru na napájecím napětí[1]

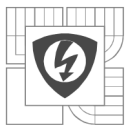
Pro řízení kola bylo tedy třeba navrhnout sofistikovaný systém řízení umožňující funkci elektropohonu v požadovaném rozsahu otáček a momentů a současně optimální chod spalovacího motoru. Tento systém řízení je znázorněn v blokovém schématu na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Blokové schéma celkového řízení pohonu kola

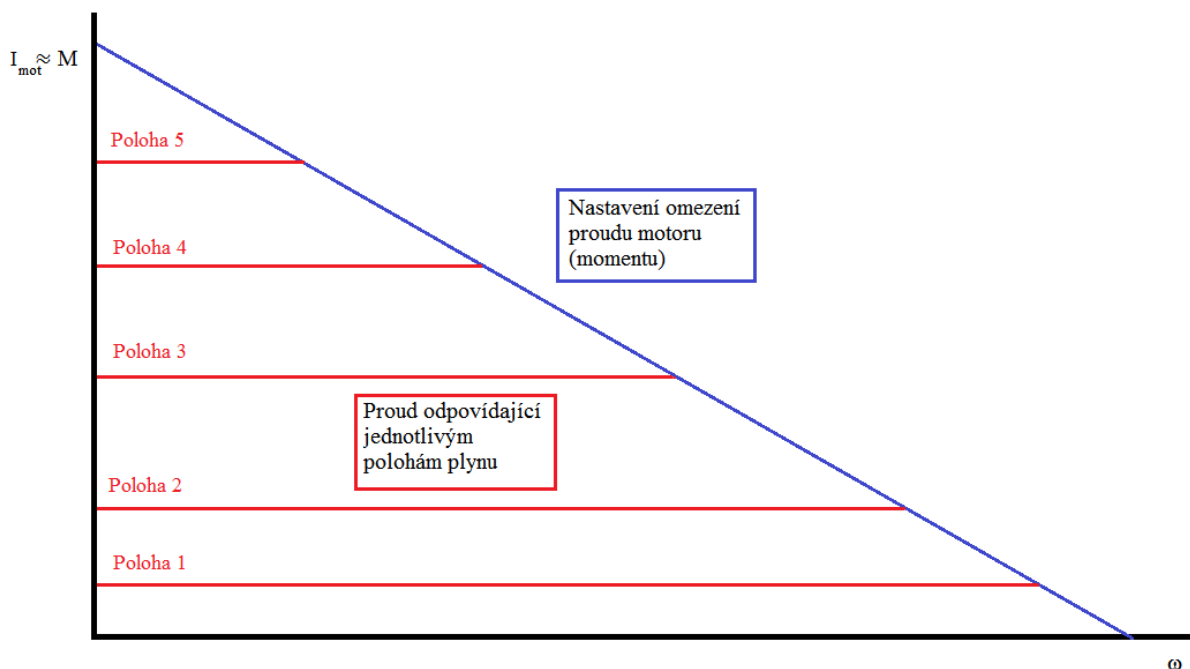
Z principu elektrického přenosu výkonu je nutno zajistit jak ovládání elektropohonu, tak i potřebný dodávaný výkon ze strany spalovacího benzinového motoru. Pokud pomineme startování a vypnutí spalovacího motoru, bude pro ovládání motorového kola použit pouze jeden ovládací prvek, a to plynová rukojeť. Touto rukojetí bude nastavován žádaný moment elektromotoru dle charakteristiky, která je předem nastavena (Obr. 4.3). Nastavení omezení momentu elektromotoru je realizováno v řídicí desce měniče. Tato řídicí deska je součástí měniče a obsahuje mikrokontrolér. Za pomoci mikrokontroléru je nastaveno, aby nebyl překročen maximální výkon.

Měřením napětí na elektromotoru zjišťujeme otáčky, a jelikož již známe žádaný moment, můžeme přes násobičku určit požadovaný výkon, jež očekáváme od spalovacího motoru. Dosažitelný výkon spalovacího motoru je závislý na jeho aktuálních otáčkách (dáno tvarem výkonově-otáčkové charakteristiky spalovacího motoru). Následně tedy požadujeme otáčky spalovacího motoru odpovídající potřebnému výkonu – a to nejnižší možné – s ohledem na účinnost spalovacího motoru.



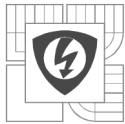
Pozn.: Z dokumentace použitého motoru bylo zjištěno, že maximum účinnosti při dané požadované hodnotě výkonu opravdu leží vždy při dolní hranici pásma otáček, v němž lze tohoto výkonu dosáhnout.

Otáčky jsou nastavovány přes klapku plynu v karburátoru jejím pootvřením nebo přivřením. Tuto klapku bude otvírat nebo přivírat servopohon přes ocelové lanko. Servopohon klapky bude řízen ve zpětnovazební smyčce pro regulaci skutečných otáček spalovacího motoru na výše zmíněnou požadovanou hodnotu. Regulátor bude využit PI naprogramovaný v mikrokontroléru. Jelikož spalovací benzínový motor nelze náhle skokově zatížit, jinak by došlo k jeho „zadušení“ a vypnutí, a také jelikož disponuje jistou setrvačností na odezvu klapky karburátoru, je nutno žádaný moment do elektropohonu zavést přes zpoždění časovou rampou.



Obr. 4.3: Závislost proudu (momentu) motoru na jeho otáčkách a nastavení regulačního omezení

Jelikož je hřídel spalovacího motoru přímo spojena s hřídelí generátoru, lze říct, že nastavováním otáček spalovacího motoru je nastavováno výstupní ss napětí. Měnič pro elektrický motor bude tedy napájen proměnným napětím (podle potřeby spalovacího motoru – pro zajištění jeho výkonu a dobré účinnosti). Díky tomu, že měnič dokáže napětí snižovat i zvyšovat, nepředstavuje proměnné vstupní napětí problém. Proudová (momentová) regulační smyčka zajistí při všech otáčkách elektrického motoru potřebný proud motoru (prostřednictvím správné velikosti svorkového napětí motoru).

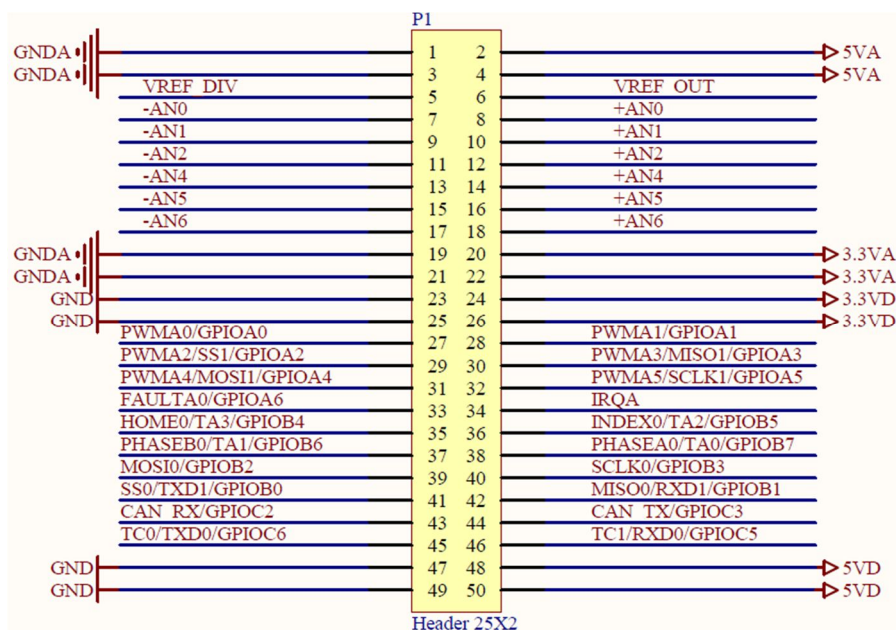


5 ŘÍZENÍ POHONU A POMOCNÉ OBVODY

5.1 Řídící deska s mikrokontrolérem

Pro řízení pohonu moto kola je využit mikrokontrolér, který byl součástí měniče. Jedná se o 16 bit mikrokontrolér od firmy Freescale typ MC56F8322 pro motory, s dvojitou Harvardovou architekturou. Dokáže zpracovat až 60 miliónu instrukcí za sekundu, při taktu jádra 60 MHz, paralelním zpracování instrukcí. Paměť RAM pro program je až 4 KB a flash paměť pro data až 8 KB. Obsahuje 6 PWM výstupů a senzor teploty. Programování probíhá pomocí rozhraní JTAG/EOnCE.

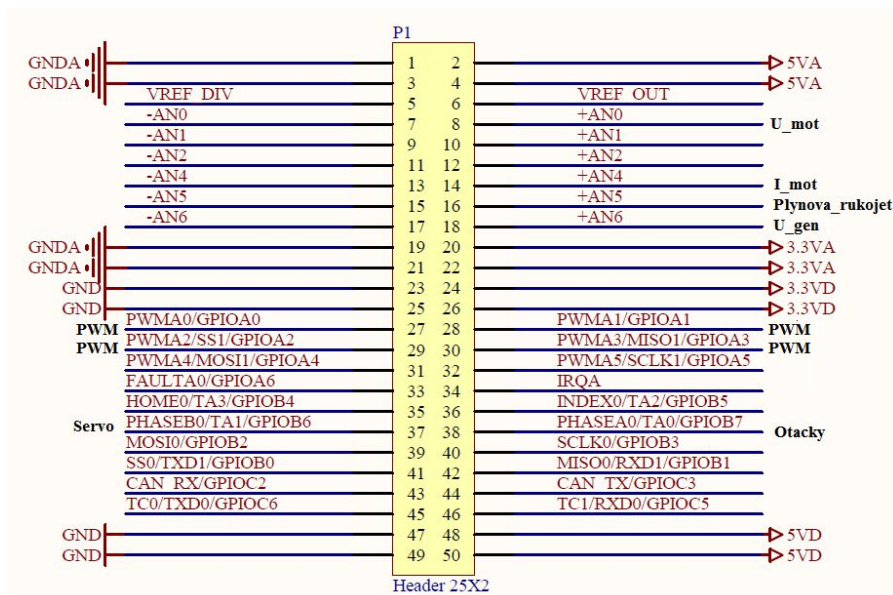
Mikrokontrolér je umístěn na desce o rozměrech 88 x 48.1 mm [11]. Tato deska obsahuje již zmíněný mikrokontrolér, konektor pro JTAG/EOnCE, externí oscilátor, 6 analogových vstupů s operačním zesilovačem, stabilizátor napětí z 5 V na napětí 3,3 V pro mikrokontrolér, další nastavitelné vstupy/výstupy a zásuvný konektor pro připojení desky k měniči. Konektor je 50 pinový a je znázorněn na obr 5.1.



Obr. 5.1: Popis 50-ti pinového konektoru řídicí desky [11]

Na desce je možno nakonfigurovat zapojení operačních zesilovačů. Pro nastavení analogových vstupů bylo využito nastavení operačních zesilovačů do funkce sledovačů. Toho jsme docílili zapojením nulových odporů na příslušné plošky na řídicí desce.

Řídící deska se stará o chod celého kola, a tedy je nutno ovládat a vyhodnocovat mnoho informací. Tyto informace je nutno z různých vstupů číst a následně po zpracování je nutno nastavit výstupy pro ovládané prvky.



Obr. 5.2: Připojení vstupních a výstupních signálů ke konektoru mikrokontroléru

Na analogový vstup +AN0 je přivedeno napětí na motoru. Na vstup +AN4 je přiveden proud motorem, měřený LEM čidlem. Vstup +AN5 je využit pro signál z plynové rukojeti. Vstup +AN6 je pro napětí z usměrňovače (vstupní napětí). Dále jsou využity PWM signály PWMA 0-3. Pro ovládání servopohonu je využit čítač/časovač (č/č) TA1 a pro měření otáček generátoru je využit č/č TA0.

5.2 Pomocné obvody

Pro správnou funkci celého systému je nutno splnit následující požadavky:

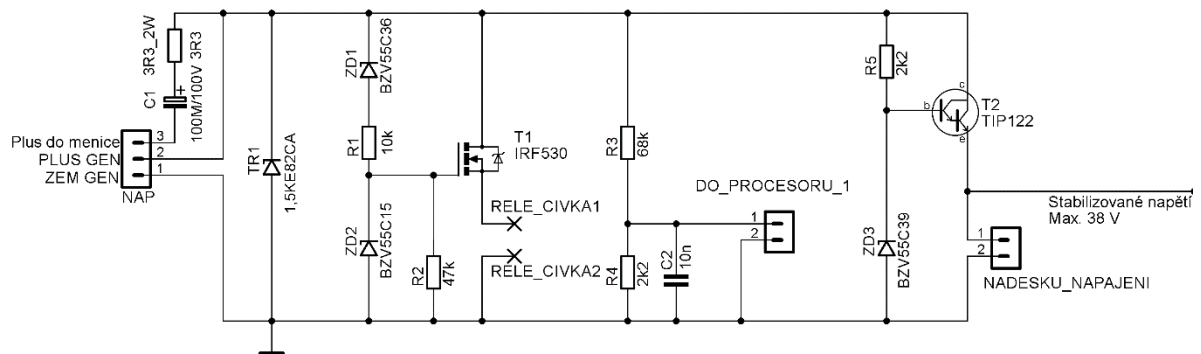
- Měření otáček spalovacího motoru, aby jej bylo možno provozovat v režimu nejvyšší účinnosti a případně zajistit, aby nedošlo k jeho zastavení vlivem nízkých otáček
- Zajistit další zdroj 5 V pro napájení servopohonu, který ovládá klapku karburátoru (měřením bylo zjištěno, že při zatížení odebírá proud cca 800 mA, který není schopen dodat měnič na základní desce).
- Zvýšit napěťovou úroveň signálu z mikrokontroléru (3,3 V) do servopohonu (5 V).
- Zpracovat signál z plynové rukojeti, která disponuje napájením 5 V a výstupem v rozmezí 0,87 V – 4,28 V.
- Zajistit ochranu všech pomocných zdrojů proti přepětí. Tyto zdroje jsou tvořeny integrovanými obvody MC34063 a jejich maximální napájecí napětí je 40 V. Jelikož dokáže generátor dodávat až 60 V na stejnosměrné straně, je nutno tyto zdroje chránit před přepětím.

První část pomocné desky (obr 5.3) slouží ke zpracování napětí z generátoru. Zpracováním napětí zahrnuje stabilizaci výstupního napětí z generátoru na hodnotu cca 38 V, pro napájení pomocných měničů. Při větším přepětí dojde k odpojení generátoru pomocí auto relé NVF4-4



s vypínacím proudem 60 A od výkonového měniče, stabilizátor pro pomocné zdroje zůstává v provozu z důvodu napájení řídicí desky a zajištění schopnosti regulace. Ochranné přepět'ové relé je s rozpínacím kontaktem a při připojení napětí 12 V na jeho cívku dojde k rozpojení kontaktů. Protože relé rozpíná stejnosměrný proud při vyšším napětí než jmenovitém, je paralelně ke kontaktům umístěn RC člen pro zamezení vzniku oblouku při rozpínání kontaktů. Paralelně k usměrněnému výstupu z generátoru je umístěn transil pro zamezení velkých napět'ových špiček zejména z důvodu indukčnosti generátoru. Dále je zde umístěno i měření výstupního stejnosměrného napětí z generátoru, které je řešeno děličem napětí a vyvedeno do procesoru. Ochrana proti přepětí pro pomocné spínané zdroje je řešena pomocí sériového lineárního stabilizátoru, realizovaného Zenerovou diodou a tranzistorem v Darlingtonově zapojení. Stabilizátor omezuje napětí na hodnotu max. 38 V v případě příliš vysokého stejnosměrného napětí z generátoru.

Při vstupním napětí větším než cca 45 V dojde k rozpojení kontaktů ochranného relé. Cívka relé je řízena tranzistorem MOSFET v zapojení emitorového sledovače. Tento tranzistor má mezi řídicí elektrodou a kladným pólem zapojenou Zenerovu diodu o napětí 36 V, která začne na řídicí elektrodu přivádět napětí při překročení této hodnoty. Jelikož relé spíná při napětí cca 6 V a další úbytek cca 3 V vzniká na přechodu G-S tranzistoru, dojde k přitažení cívky relé a následnému rozpojení rozpínacího kontaktu přibližně při požadované hodnotě 45 V.

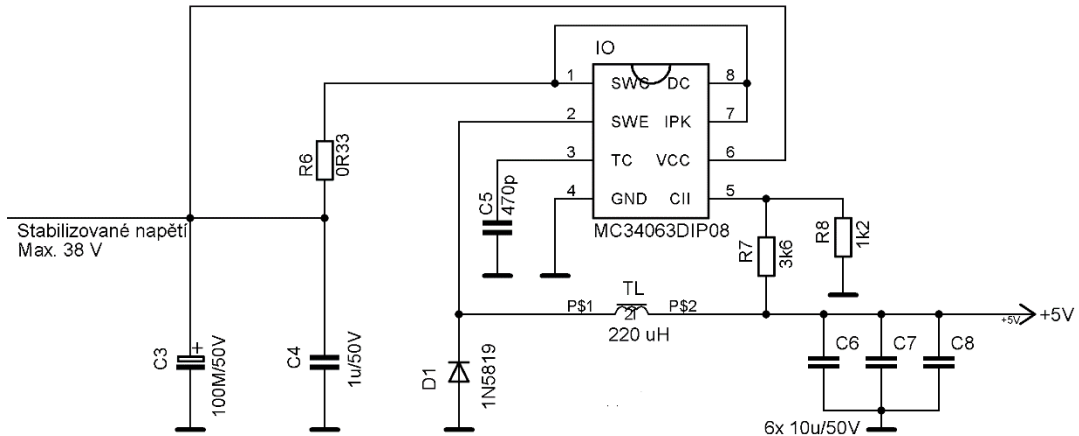


Obr. 5.3: Zpracování vstupního napětí na pomocné desce

Zdroj pro servopohon je tvořen dc/dc měničem ve snižujícím zapojení, viz. obr.5.4. Tento zdroj i zdroje na desce jsou tvořeny pomocí integrovaných obvodu MC34063 [9]. Na desce měniče byly zdroje již navrženy a nebyly upravovány, neboť slouží pro napájení budičů výkonových tranzistorů a napájení řídicí desky. Zdroj pro servopohon byl navrhnut pro výstupní napětí 5 V. Podle katalogového listu pro IO MC34063 [9] je výstupní napětí určeno následujícím vztahem:

$$V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5.1)$$

Ostatní součástky byly zvoleny podle přiložené dokumentace integrovaného obvodu MC34063. Z tohoto pomocného zdroje je taky napájena plynová rukojeť kola.

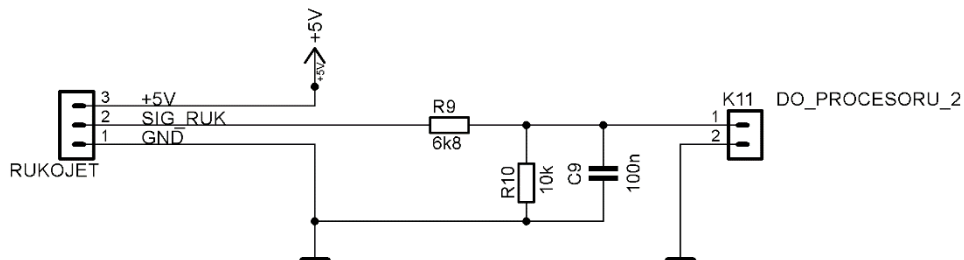


Obr. 5.4: Zdroj pro servopohon realizovaný pomocí IO MC34063

Další částí pomocné desky je obvod zpracující signál z plynové rukojeti. Rukojeť (jak již bylo zmíněno) je napájena z 5 V. Výstupem z této plynové rukojeti je napětí v rozmezí 0,87 V – 4,28 V. Do vstupu mikrokontroléru je možno přivést napětí maximálně 3,3 V. Je tedy nutno změnit rozsah na výstupu z rukojeti, tak aby měl maximální hodnotu 3 V (kvůli jistě rezervě). Toto provedeme odporovým děličem, který určíme dle následujícího vztahu:

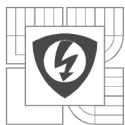
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{3}{5} = 0,6 \Rightarrow \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} = 0,6$$

Je tedy nutno zvolit takovou kombinaci odporů, aby jejich poměr byl shodný s poměrem výstupního a vstupního napětí. Byly tedy zvoleny odpory s hodnotami $R_{10} = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_9 = 6,8 \text{ k}\Omega$. Upravené napětí je následně přivedeno na jeden z analogových vstupů mikrokontroléru. Paralelně k dolnímu odporu děliče je umístěn kondenzátor pro omezení pronikání vysokofrekvenčního rušení.

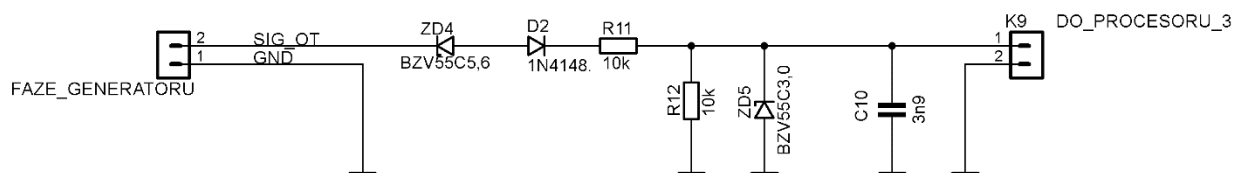


Obr. 5.5: Zpracování signálu z plynové rukojeti

Na pomocné desce se také nachází obvod pro upravení napěťových pulzů vycházejících z jedné fáze generátoru. Rozkmit napětí z fáze je omezen na napětí 0 až 3 V pomocí Zenerovy diody. V sérii se Zenerovou je zapojen rezistor pro omezení proudu a další součástky pro úpravu

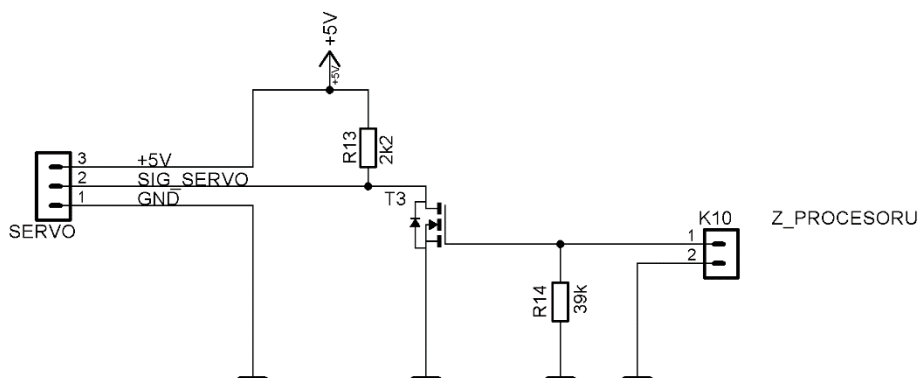


průběhu napětí (prodloužení doby minima, zamezení záporného napětí). Tyto napěťové pulzy jsou následně přiváděny do mikrokontroléru a je z nich počítána rychlost otáčení generátoru resp. otáčky spalovacího motoru.



Obr. 5.6: Úprava signálu pro měření otáček generátoru

Aby bylo možno řídit spalovací motor, je nutno ovládat jeho klapku, která je přes ocelové lanko spojena se servopohonem. Tento servopohon přijímá příkazy z mikrokontroléru. Výstupem z mikrokontroléru jsou PWM pulzy o napětí maximálně 3,3 V. Toto napětí je ovšem nutno zvýšit na potřebných 5 V, které vyžaduje ovládání servopohonu. Toho je docíleno pomocí malého tranzistoru MOSFET v zapojení se společným source na obr. 5.7. Toto zapojení ovšem invertuje výstupní signál a je tomu proto nutno přizpůsobit řízení servopohonu z mikrokontroléru. Jedná se tedy o negativní logiku řízení.



Obr. 5.7: Obvod pro posílení signálu z mikrokontroléru pro servopohon

5.3 Popis a řízení servomotoru

Jak již bylo řečeno, pro ovládání klapky karburátoru spalovacího motoru je použit modelářský servopohon. Jedná se o typ HS – 311 ECO bulk o parametrech uvedených v tab. 5. Tento servopohon je vhodný pro rozmanité aplikace. Díky tahu až 3 kg.cm při napájecím napětí 4,8 V je dostačující pro plné otevření klapky spalovacího motoru. Servopohon se prodává s různými rotorovými nastavci pro přizpůsobení obr. 5.9.



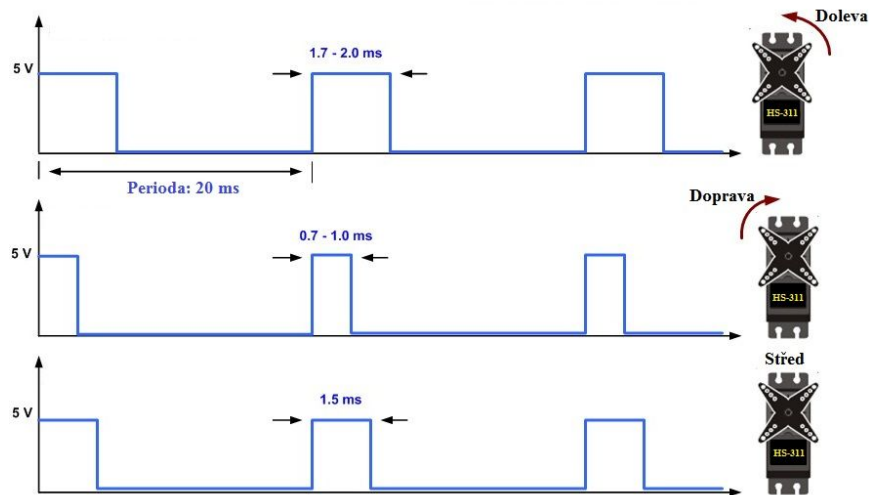
Obr. 5.9: Příslušenství pro servopohon HS-311[7]

Obr. 5.8: Servopohon HS-311[7]

Tab. 5: Parametry servopohonu HS-311[7]

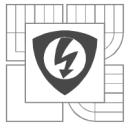
Typ servopohonu	Analogové
Tah při 4,8 V	3 kg.cm
Tah při 6 V	3,5 kg.cm
Rychlost při 4,8 V	0,19 s/60°
Rychlost při 6 V	0,15 s/60°
Převody serva	Plastové
Napájení	4,8 - 6 V
Hmotnost	43 g
Rozměry (d x š x v)	40 x 20 x 36,5 mm

Ovládání probíhá pomocí PWM signálu s periodou 50 Hz a výškou pulzů 5 V, přičemž natočení servopohonu je řízeno pomocí šířky pulzů. Při šířce pulzu 1,5 ms je servopohon v neutrální poloze, přičemž plný rozsah natočení odpovídá šířce pulzu v rozsahu cca 1-2 ms, viz obr. 5.10. Rozsah otáčení servopohonu je 60° doleva i doprava a tohoto úhlu je schopno dosáhnout za 0,19 s při napájení 4,8 V. Experimentálně bylo zjištěno, že je možno servopohon provozovat s úhlem až 90° na obě strany. Při maximálním momentu (při zablokování) servopohon odebírá až 0,8 A



Obr. 5.10: Ukázka PWM signálu ovládající servopohon [10]

Pro připojení k pomocné desce slouží kabel s třípinovým konektorem. Tento kabel je barevně označen a červená barva na kabelu značí napájení +5 V, černý GND (zem) a žlutý slouží pro přivedení signálu.



6 ŘÍDICÍ SOFTWARE

Pro vytvoření programu byl využit program CodeWarrior s možností programování v jazyce C. K tomuto programu byl využit doplněk DSC56800EX_Quick_Start_r2.6, konkrétně jedná se o nástroj Graphical Configuration Tool (GCT) a jak již název napovídá je zde možno graficky měnit nastavení mikrokontroléru a jeho registrů pomocí výběru z nabídek či zapisovacích oken. Tyto nastavení se zapíší do kódu bez nutnosti znát jejich přesnou syntaxi a umístění. Dále byl využit program FreeMASTER pro zobrazování výstupů a možností zapisování do proměnných. V tomto programu je možno i zobrazovat aktuální hodnoty proměnných do grafů v závislosti na čase a hodnoty z těchto grafů ukládat do textového souboru pro pozdější zpracování.

6.1 Nastavení mikroprocesoru

Pomocí GCT byly vybrány části mikrokontroléru, se kterými se pracuje dále v programu. V grafickém prostředí se tak nastavují parametry, které se následně automaticky zapisují přímo v jazyce C do hlavičkového souboru `appconfig.h` s nastavením mikrokontroléru. Nastavuje se tak přímo chování vstupních či výstupních pinů mikrokontroléru. Těmi částmi jsou:

OCCS (On-Chip Clock Synthesis) – v kterém se nastavují základní frekvence oscilátoru, výběr zda využít externí nebo interní oscilátor, děličku a násobičku frekvence, nastavení přerušení a funkce watchdog, která restartuje mikrokontrolér a tím předejde k zacyklení.

SYS (System Support Control) – zde se povolují hodiny pro periferie, povolení čekání a vypnutí

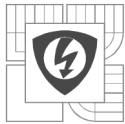
INTC (Interrupt Controller) – v této části se povoluje přerušení, v našem případě je nastaven Level 0 u časovače C na kanálu 0. Název tohoto přerušení je `tc0_isr`. Dalším nastaveným přerušením je Level 1 u ADC A převodníku s názvem `adceos`.

QT (Quad Timers) – slouží pro časové operace čítačů. Je možno využít až 8 čítačů rozdělených do dvou skupin (A a C). Jsou využity čítače 0,1,2 ze skupiny A a čítače 0 a 2 ze skupiny C.

PWM (Pulse Width Modulator) – v tomto modulu lze nastavit všechny parametry pro požadované generování PWM pulzů. Nastavuje se zde povolení, zapisovací ochrana, povolení výstupu atd. Je zde časovač pro PWM a jeho nastavení, dále hardwarova akcelerace a nastavení kanálů, nastavení párů na kanálech 0-5, přerušení a chování při chybě.

GPIO (General Purpose I/O Port) – zde se nastavují všechny účelové piny, které je možno nastavit do příslušných pracovních stavů. Tyto piny jsou rozděleny do skupin A, B a C a v každé skupině se nachází 8 pinů, u který je možno nastavit si mód v kterém bude pin pracovat a další parametry.

ADC (Analog to Digital Converter) – nastavení AD převodníku, jeho pracovní frekvenci, vstupy se kterými pracuje, přerušení, limity registrů a ovládání napájení.



6.2 Nastavení příznaků

Pro zajištění bezproblémového chodu celého systému bylo potřeba definovat a nastavit několik proměnných určující příznak chyby, tzv. flagů, které budou indikovat potíže, které mohou nastat při provozu systému. Tyto příznaky jsou definovány ve struktuře `tMotobikeFlags` takto:

```
typedef struct
{
    unsigned short INVERTER_ON:1;
    unsigned short OVERCURRENT:1;
    unsigned short OVERVOLTAGE:1;
    unsigned short GEN_LOW_SPEED:1;
    unsigned short RESERVED:12;
} tMotobikeFlags;
```

Je zde příznak pro zapnutí/vypnutí měniče, nadproud, přepětí, nízké otáčky spalovacího motoru a 12 hodnot slouží jako rezerva.

Příznak `INVERTER_ON` se nastavuje podle toho, zda je plynová rukojeť v klidové pozici nebo je s ní otáčeno. V klidové pozici je nastavena „0“, jinak „1“ a měnič je zapnutý

Další příznak `OVERCURRENT` je nastaven do „1“, pokud dojde k nadproudu, jenž je nastaven na hodnotu 45 A. Tento stav je tedy kritický a je okamžitě vypnut měnič při nastavení tohoto příznaku.

Následným příznakem je `OVERVOLTAGE`, který má za úkol hlídat, aby díky přepětí na výstupu z generátoru nedošlo k poškození součástek. Hodnota přepětí je nastavena na hodnotu 45 V.

Posledním používaným příznakem je `GEN_LOW_SPEED`, který slouží pro indikaci nízkých otáček spalovacího motoru vlivem velkého zatížení, či špatnému nastavení servopohonu.

Měření napětí a proudu bude popsáno dále. Všechny příznaky jsou nulovány vypnutím a zapnutím kola vypínacím tlačítkem.

6.3 Nastavení PWM signálů

Pro nastavení PWM slouží následující série příkazů v hlavičkovém souboru `appconfig.h`.

```
#define PWM_A_PMCTL_INIT           0x0003U
#define PWM_A_PMOUT_INIT          0x8000U
#define PWM_A_PWMCM_INIT          0x04B0U
#define PWM_A_PMDEADTM_INIT       0x003CU
#define PWM_A_PMDISMAP1_INIT      0x0000U
#define PWM_A_PMDISMAP2_INIT      0x0000U
#define PWM_A_PMCFG_INIT          0x0331U
```

Tímto jsou nastaveny PWM signály pro jednotlivé tranzistory. Je nastavena časovací perioda pro PWM na 0,01667 μ s, frekvence PWM je 25 kHz a tedy perioda PWM je 40 μ s. Dále je zde nastaven Deadtime na 1 μ s. Nastavena negativní logika u výstupního signálu a vybrány kanály 0-3. Pro práci s PWM byl využit tzv. „rychlý“ interrupt na frekvenci PWM a to 25 kHz, který je využíván při práci se silovými tranzistory.



6.4 Měření otáček generátoru

Pro měření otáček generátoru byl využit tzv. „pomalý“ interrupt na frekvenci 400 Hz. Tato frekvence bude dostatečná pro měření otáček v celém pracovním rozmezí spalovacího motoru. Měření je realizováno jako prosté čítání pulzů, které byly pomocnými obvody natvarovány a ořezány na obdélníkové pulzy o výšce 3 V. V programu je měření zapsáno následujícím způsobem.

```
prevGenPulses = genPulses; //proměnná pro měření pulzů
prevClocks = clocks; // proměnná časovač
genPulses = ioctl(QTIMER_A0, QT_READ_CAPTURE_REG, NULL);
                // časovač, pro načítání pulzů generátoru

clocks = ioctl(QTIMER_A2, QT_READ_CAPTURE_REG, NULL); //odměření periody
ioctl(QTIMER_A0, QT_CLEAR_FLAG,QT_INPUT_EDGE_FLAG); //vymazání časovače 0
ioctl(QTIMER_A2, QT_CLEAR_FLAG,QT_INPUT_EDGE_FLAG); // vymazání časovače 2

genPulsesDiff = genPulses - prevGenPulses;
                //výpočet počtu pulzů generátoru

clocksDiff = clocks - prevClocks; // výpočet měřené periody

motobike.engineSpeed = (Frac16)((unsigned long)genPulsesDiff *
GENSPEED_CALIBRATING_CONST/ clocksDiff);
```

Je tedy vytvořena proměnná, do které jsou ukládány počty pulzů a proměnná pro čas neboli periodu po kterou se budou pulzy čítat. Následně jsou načítány pulzy za pomoci čítače/časovače A0 a odměřena perioda za pomoci čítače/časovače A2. Po zapsání údajů do proměnných jsou čítače/časovače vymazány a přichystány pro další přerušení. Dalším krokem je vypočtení pulzů od poslední známé skutečnosti a vypočtení délky periody. Jedná se o odečtení aktuální hodnoty od hodnoty na začátku. Posledním krokem je určení samotných otáček generátoru respektive spalovacího motoru, která je uložena do proměnné `motobike.engineSpeed`. Tyto otáčky dostaneme jednoduchým přepočtem:

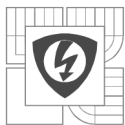
$$\text{motobike.engineSpeed} = \frac{\text{genPulsesDiff} \cdot \text{GENSPEED_CALIBRATING_CONST}}{\text{clocksDiff}}$$

Počet pulzů v měřené periodě vydělíme měřenou periodou, výsledek vynásobíme kalibrační konstantou, jež je nastavena na hodnotu $2 \cdot 10^6$ pro přepočet na skutečné otáčky spalovacího motoru.

6.5 Měření napětí a proudu

Důležitým prvkem pro regulaci a ovládání je měření jednotlivých veličin. Těmito veličinami jsou vstupní napětí do měniče (na výstupu z usměrňovače), proud tekoucí do motoru (proud tlumivkou) a napětí na výstupu z měniče (napětí na motoru). Čtení AD převodníků je řešeno následující syntaxí:

```
ioctl(ADC_A, ADC_CLEAR_STATUS_EOSI, NULL); //priznak EOS interruptu
motobike.motorVoltage = ioctl(ADC_A, ADC_READ_SAMPLE, 0);
motobike.generatorVoltage = ioctl(ADC_A, ADC_READ_SAMPLE, 1);
tmpF16 = ioctl(ADC_A, ADC_READ_SAMPLE, 4);
motobike.motorCurrent = mult_r(tmpF16, motobike.stepUpDutyCycle);
                //Násobení proudu motoru střídou zvyšujícího měniče
```



Měření na vstupu do měniče je realizováno pomocnými obvody a přivedeno na AD převodník s číslem 1 a hodnota je uložena do proměnné `motobike.generatorVoltage`. Napětí na výstupu z měniče je čtena z AD převodníku 0 a zapisována do `motobike.motorVoltage`. Poslední je měření proudu, které je realizováno na AD převodníku 4. Proud je potřeba vynásobit střídou zvyšujícího měniče, neboť měřený proud při zvyšujícím režimu měniče neodpovídá reálnému proudu tekoucímu do motoru. Neboť neměříme skutečný proud motoru, ale proud společnou tlumivkou. Přepočet je proveden takto:

```
motobike.motorCurrent = tmpF16 · motobike.stepUpDutyCycle
```

6.6 Zpracování signálu z rukojeti

Pro nastavování proudu motoru a tedy pro změnu střídy měniče je nutno správně číst a pracovat se signálem z rukojeti. V prvním kroku je třeba zajistit, aby nebyl měnič aktivní při klidové poloze rukojeti a případně nešel signál do záporných hodnot. Toho je zajištěno takto:

```
motobike.thorttle = ioctl(ADC_A, ADC_READ_SAMPLE, 0);  
//zvolení převodníku pro výstup pwm signálu pro servo  
  
if(motobike.thorttle <= 0)  
//zajištění kladné hodnoty plynové rukojeti, povolení měniče  
{  
    motobike.flags.INVERTER_ON = 0;  
    motobike.thorttle = 0;  
}  
else  
{  
    motobike.flags.INVERTER_ON = 1;  
}
```

Jakmile je zajištěna kladná hodnota signálu plynové rukojeti, je dále tento signál zpracován takto:

```
if(motobike.generatorVoltage > OVERVOLTAGE_TRESHOLD)  
{  
    motobike.flags.OVERVOLTAGE = 1;  
}  
  
if(motobike.flags.INVERTER_ON && !motobike.flags.OVERCURRENT &&  
!motobike.flags.OVERVOLTAGE)  
{  
  
    motobike.desiredPower =  
    mult_r(motobike.generatorVoltage, motobike.thorttle);  
  
    motobike.engineDesiredSpeed = ENGINE_IDLE_SPEED +  
    mult_r(motobike.desiredPower, POWER_TO_GEN_SPEED_SCALE);  
  
    if(motobike.engineDesiredSpeed > ENGINE_MAX_SPEED)  
        motobike.engineDesiredSpeed = ENGINE_MAX_SPEED;  
  
    motobike.desiredMotorCurrent =  
    div_ls4q(L_mult(mult_r(motobike.thorttle, THROTTLE_TO_CURRENT_SCALE),  
    (motobike.engineSpeed - ENGINE_IDLE_SPEED)),  
    (motobike.engineDesiredSpeed - ENGINE_IDLE_SPEED));
```



```
if(motobike.desiredMotorCurrent > MOTOR_CURRENT_LIMIT)
    motobike.desiredMotorCurrent = MOTOR_CURRENT_LIMIT;
}
else
{
    motobike.engineDesiredSpeed = ENGINE_IDLE_SPEED;
    motobike.desiredMotorCurrent = 0;
}

if(motobike.flags.OVERVOLTAGE == 0)
{
    motobike.accelLever = pidRecurent (motobike.engineDesiredSpeed,
    motobike.engineSpeed, &motobike.engineSpeedControllerData);
}
else
{
    motobike.accelLever = ACCEL_SERVO_MIN_DUTY_CYCLE;
}
```

Pokud je tedy napětí generátoru větší než prahové napětí pro detekci přepětí, je nastaven příznak `OVERVOLTAGE` do „1“, v případě že je napětí nižší, je nastaven žádaný výkon spalovacího motoru, vynásobením hodnoty napětí generátoru a signálu z rukojeti. Tento žádaný výkon (`motobike.desiredPower`) je potřeba nastavit na spalovacím pohonu. Výkon je úměrný otáčkám spalovacího motoru, a proto žádaná hodnota otáček spalovacího motoru (`motobike.engineDesiredSpeed`) je nastavována jako:

$$\begin{aligned} \text{motobike.engineDesiredSpeed} = \\ = \text{ENGINE_IDLE_SPEED} + (\text{motobike.desiredPower} \cdot \text{POWER_TO_GEN_SPEED_SCALE}) \end{aligned}$$

Kde `ENGINE_IDLE_SPEED` je nastavena minimální hodnota otáček spalovacího motoru, tato hodnota je nastavena na 2000 otáček za minutu, a otáčky by neměly pod tuto hodnotu klesat. Žádaný výkon je násoben měřítkem, které je rovno 0,25. Pokud jsou poté žádané otáčky větší než nejvyšší možné povolené (z hlediska ochrany před poškozením měniče), nastaví se maximální povolené otáčky. A provede se výpočet žádaného proudu:

$$\begin{aligned} \text{motobike.desiredMotorCurrent} = \\ = \frac{(\text{motobike.throttle} \cdot \text{THROTTLE_TO_CURRENT_SCALE}) \cdot (\text{motobike.engineSpeed} - \text{ENGINE_IDLE_SPEED})}{\text{motobike.engineDesiredSpeed} - \text{ENGINE_IDLE_SPEED}} \end{aligned}$$

Je třeba ověřit, zda tento žádaný proud nepřekračuje povolený limit., který je nastaven na hodnotu 30 A. Poté se nastaví žádaný proud motoru na hodnotu limitu v případě, že byl větší. Posledním krokem v tomto úseku je nastavení klapky pomocí servopohonu, pomocí výstupu z PID regulátoru po splnění podmínky, že není nastaven příznak pro přepětí. Pokud je příznak nastaven, nastaví se krajní poloha servopohonu, která odpovídá klidové poloze klapky neboli volnoběhu.

V kapitole 6.5, jsme měřením zjistili aktuální proud motorem. Tento proud je důležitý pro ovládání měniče, respektive změnu střídavy pro jednotlivé tranzistory. Opět je zde hlavní podmínkou, aby nebyly nastaveny příznaky indikující zakázaný stav a systém mohl být řízen bez poškození.

```
if(motobike.motorCurrent > OVERCURRENT_THRESHOLD)
{
    motobike.flags.OVERCURRENT = 1;
}
```



```
}  
  
if(motobike.flags.INVERTER_ON &&  
    !motobike.flags.OVERCURRENT &&  
    !motobike.flags.OVERVOLTAGE)  
{  
    motobike.controlDutyCycle = pidRecurent (motobike.desiredMotorCurrent,  
        motobike.motorCurrent, &motobike.motorCurrentControllerData);  
  
    if(motobike.controlDutyCycle < INVERTERS_CONTROL_RATIO)  
    {  
        motobike.stepDownDutyCycle =  
            div_ls(L_deposit_h(motobike.controlDutyCycle), INVERTERS_CONTROL_  
                RATIO);  
        motobike.stepUpDutyCycle = FRAC16(1.0);  
    }  
    else  
    {  
        motobike.stepDownDutyCycle = FRAC16(1.0);  
        motobike.stepUpDutyCycle = FRAC16(1.0) -  
            div_ls(L_mult((motobike.controlDutyCycle -  
                INVERTERS_CONTROL_RATIO), (FRAC16(1.0) - STEPUP_MIN_DUTY)),  
                (FRAC16(1.0) - INVERTERS_CONTROL_RATIO));  
    }  
    ioctl(PWM_A, PWM_UPDATE_VALUE_REG_0, motobike.stepDownDutyCycle);  
    ioctl(PWM_A, PWM_UPDATE_VALUE_REG_2, motobike.stepUpDutyCycle);  
}  
else  
{  
    ioctl(PWM_A, PWM_UPDATE_VALUE_REG_0, 0);  
    ioctl(PWM_A, PWM_UPDATE_VALUE_REG_2, FRAC16(0.999));  
    motobike.motorCurrentControllerData.yk1 = 0;  
}
```

Pokud je tedy proud motorem větší než dovolená prahová hodnota, je nastaven příznak pro nadproud a měnič přestane reagovat na příkazy z plynové rukojeti a dojde k vypnutí všech tranzistorů a nastavení otáček spalovacího motoru na minimální otáčky. Pokud je proud menší a nejsou nastaveny výše zmíněné příznaky, je třeba nastavit hlavní ovládací signál, která je výstupem z PID regulátoru. Jestliže je tato střída menší než řídicí poměr, je ve funkci snižující měnič a jeho střída je určena jako:

$$\text{motobike.stepDownDutyCycle} = \frac{\text{motobike.controlDutyCycle}}{\text{INVERTERS_CONTROL_RATIO}}$$

Střída pro zvyšující měnič je nastavena do „1“, čímž je prozatím vyřazen z činnosti. Jakmile se ale ovládací střída snižujícího měniče změní, a je větší než řídicí poměr dojde k nastavení střídy pro snižující měnič do „1“ a střída pro zvyšující měnič je vypočítávána jako:

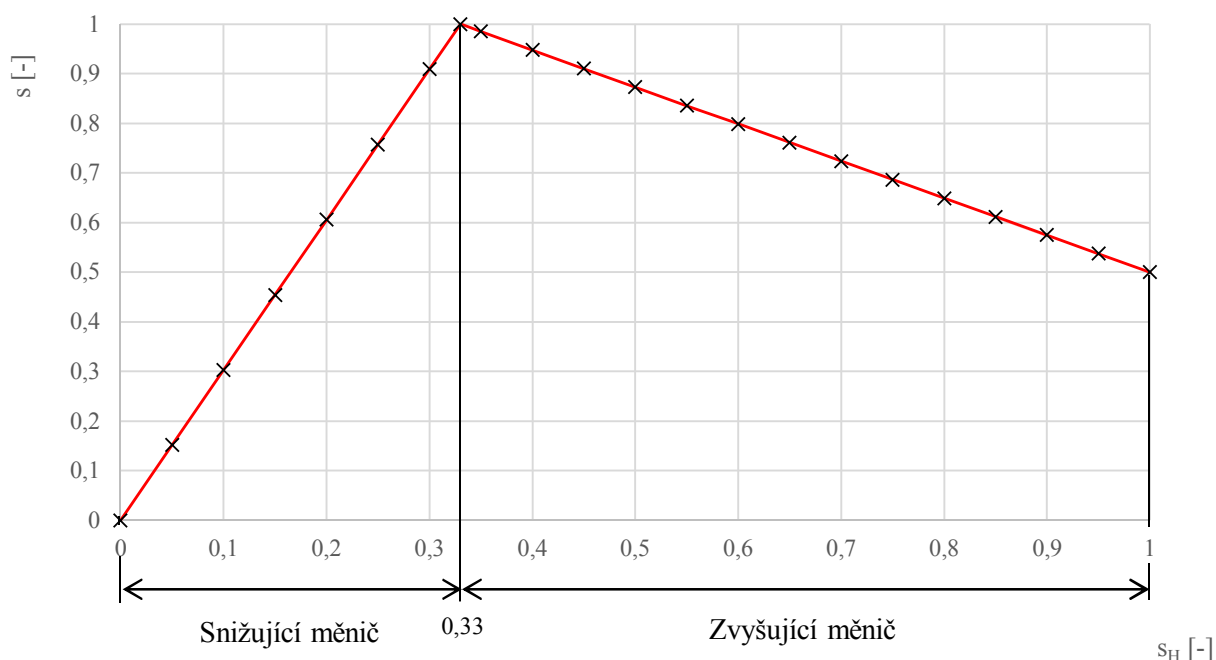
$$\text{motobike.stepUpDutyCycle} = \frac{(\text{motobike.controlDutyCycle} - \text{INVERTERS_CONTROL_RATIO}) \cdot (1 - \text{STEPUP_MIN_DUTY})}{1 - \text{INVERTERS_CONTROL_RATIO}}$$



Zde je nutno omezit střihu zvyšujícího měniče pomocí proměnné `STEPUP_MIN_DUTY`. Hodnota proměnné je 0,5 a určuje minimální střihu zvyšujícího měniče, při vyšší střídě by rostlo napětí na elektromotoru nad povolené hodnoty a došlo by k jeho zničení.

Řídicím poměrem se tedy myslí rozmezí, kdy dojde ke změně režimu měniče ze snižujícího na zvyšující a naopak. Rozděluje tedy hlavní ovládací signál pro měnič.

Rozdělení střídý mezi zvyšující a snižující měnič je znázorněno na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Závislost střídý snižujícího a zvyšujícího měniče na hlavním ovládacím signálu s_H

Jakmile je hlavní ovládací signál pro měnič, je možno nastavit PWM výstup z mikrokontroléru a sepnout příslušné tranzistory.

6.7 Regulátory

Pro naši potřebu jsou využity dva předprogramované PID regulátory. Jeden pro regulaci proudu a druhý pro regulaci otáček spalovacího motoru. U obou regulátorů je využita pouze P a I složka. Tyto regulátory jsou umístěny v `pidrecurrent.c` a `pidparallel.c`. V hlavním programu celého systému lze nastavovat jen jejich zesílení, ať už se jedná o P, I nebo D složku zesílení.

Pro regulátor proudu jsou nastaveny tyto hodnoty:

```
volatile float motorCurrentCOntroller_D = 0.0;  
volatile float motorCurrentCOntroller_I = 2000.0;  
volatile float motorCurrentCOntroller_P = 0.05;
```

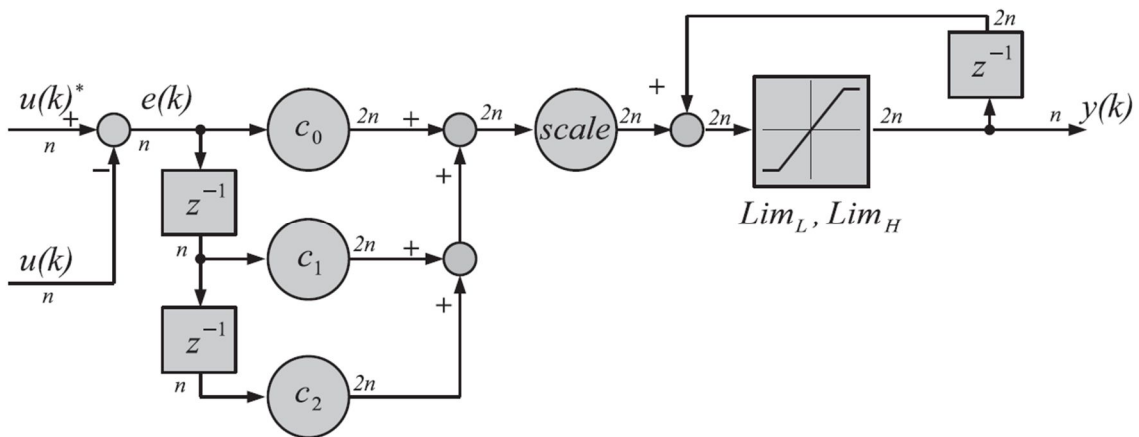


Pro regulátor otáček spalovacího motoru jsou nastaveny tyto hodnoty:

```
volatile float engineSpeedController_D = 0.0;  
volatile float engineSpeedController_I = 3.0/3;  
volatile float engineSpeedController_P = 0.05/3;
```

Oba regulátory jsou pomocí iterační metody odhadnuty pro aktuální systém. Navrzení za pomoci výpočtu není zcela vhodné, díky proměnné časové konstantě spalovacího motoru. Odhadnuté regulátory pracují s ideálním překmitem a rychlostí.

Jako základ pro předprogramované regulátory slouží blokové schéma na obr. 6.2.



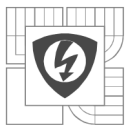
Obr. 6.2: Blokové schéma zvolených regulátorů v rekurentním tvaru [12]

Diferenční tvar regulátoru ve složkovém tvaru:

$$y(k) = y(k-1) + \left(K_P + K_I T_S + \frac{K_D}{T_S}\right) e(k) - \left(K_P + 2 \frac{K_D}{T_S}\right) e(k-1) + \left(\frac{K_D}{T_S}\right) e(k-2)$$

Diferenční rovnice po nahrazení závorek parametry c_0 , c_1 a c_2 má tvar:

$$y(k) = y(k-1) + c_0 e(k) + c_1 e(k-1) + c_2 e(k-2)$$



7 UVEDENÍ DO PROVOZU A MĚŘENÍ

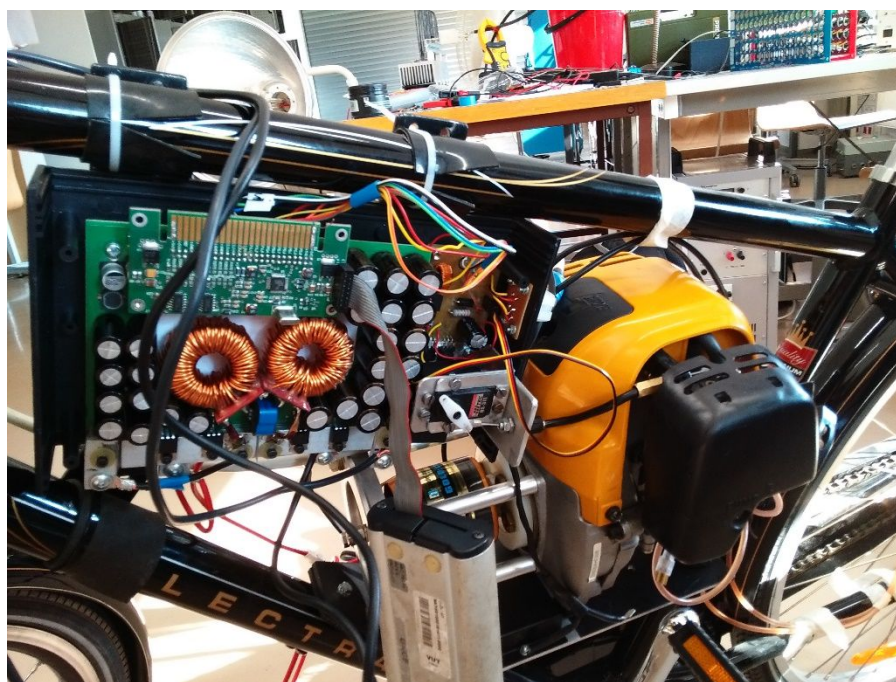
Pro uvedení celého pohonného systému kola bylo zapotřebí zkontrolovat všechny potřebné komponenty, zda pracují správně. Největší problém nastal u spalovacího motoru, který nechtěl nasávat benzín, neboť nebyl příliš dlouho používán. Bylo tedy nutno rozmontovat karburátor a zkontrolovat membrány, které sání benzínu do prostoru karburátoru zajišťují. Jako účinné se ukázalo zvlhčit tyto membrány benzínem. Po tomto zákroku byl motor funkční. Z hlediska dlouhé nečinnosti byl pro jistotu vyměněn i olej, aby nedošlo k zadření motoru vlivem jeho zvodnatění.

Dalším prvkem, který bylo potřeba zkontrolovat, byl měnič. Tento měnič byl zkonstruován před delší dobou a bylo tedy třeba ověřit, zda je funkční. Během připojení k napájení bylo zjištěno, že je nefunkční řídicí deska. Tato skutečnost celou stavbu jízdního kola s elektrickým přenosem výkonu zkomplikovala. Naštěstí byla nalezena shodná deska, která byla funkční a připravena k použití. Při vytváření programu bylo potřeba vytvořit regulátor pro regulaci proudu, tento regulátor byl využit předprogramovaný. Jednotlivé prvky jeho zesílení byly odhadnuty a pomocí softwaru FreeMaster odladěny, aby splňovaly požadavky na plynulou a bezproblémovou regulaci. Ověření funkčnosti regulace proudové smyčky probíhalo připojenou tlumivkou na výstup z měniče. V tuto chvíli ještě probíhalo napájení měniče z laboratorního zdroje. Po nastavení regulátorů byl vytvořen PWM signál pro servopohon, aby mohla být ovládána klapka spalovacího motoru. Jakmile byl připraven servopohon, bylo zapotřebí opět využít předprogramovaný regulátor pro regulaci otáček spalovacího motoru. Tento regulátor byl opět odhadnut a pomocí programu FreeMaster byla jeho zesílení doladěna k optimálnímu chodu.



Obr. 7.1: Kolo připraveno na vložení měniče a pomocných obvodů, včetně servopohonu

V této části bylo vše připraveno pro montáž na jízdní kolo a ověření funkčnosti regulátorů, jak na elektromotoru, tak na spalovacím motoru. Toto ověření již proběhlo na ostrém systému se stejnosměrným napětím generátoru připojeným ke vstupu měniče.



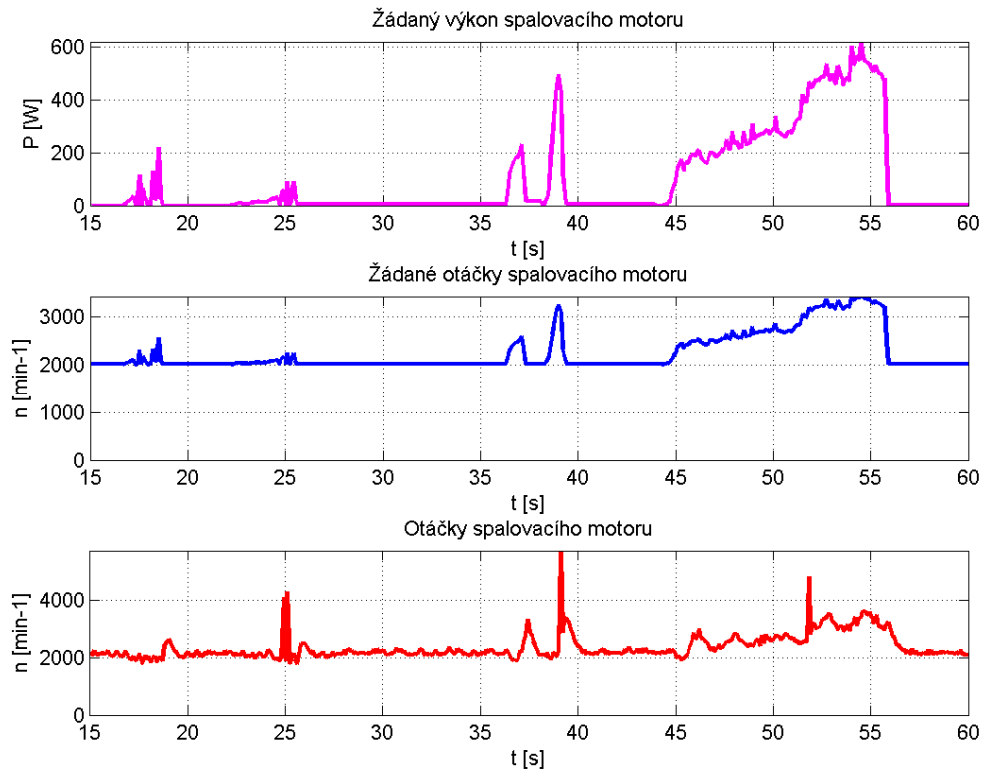
Obr. 7.2: Ukázka prvotního programování

V tuto chvíli bylo potřeba ocejchovat měření otáček, napětí a proudu, aby docházelo ke správné funkci obou regulátorů. Opět byl využit program FreeMaster pro určení převodních konstant a kalibrování měření. Pro ověření správného nastavení měření byl využit klešťový ampérmetr pro měření proudu do motoru a voltmetr pro měření napětí na usměrňovači a motoru. Měření otáček nebylo možno ověřit, ale jelikož napětí odpovídalo po přepočtení přes napěťovou konstantu generátoru nastaveným otáčkám, nebylo třeba otáčky měřit.

Jakmile byly tyto formality nastaveny a ověřeny, byla naprogramována změna střidy pro zvyšující a snižující měnič a proběhly první testovací jízdy. Zpočátku systém nefungoval dle předvoleného schématu, ale postupným laděním a upravováním programu jsme docílili funkčnosti. Funkčnost se ale od očekávání mírně liší. Z důvodu velkého poklesu napětí na stejnosměrné straně generátoru při jeho zatížení, dojde k podpětí na budičích výkonových tranzistorů a jejich vypnutí. Zamezení tohoto jevu bylo docíleno zvýšením otáček spalovacího motoru, aby bylo napětí na stejnosměrné straně generátoru vyšší a k podpětí nedocházelo. Pro ověření poklesu napětí na stejnosměrné straně generátoru, byla změřena charakteristika pro jednotlivé konstantní otáčky. Toto napětí a jeho změna s narůstajícím zatížením je zanesena v obr. 7.4.

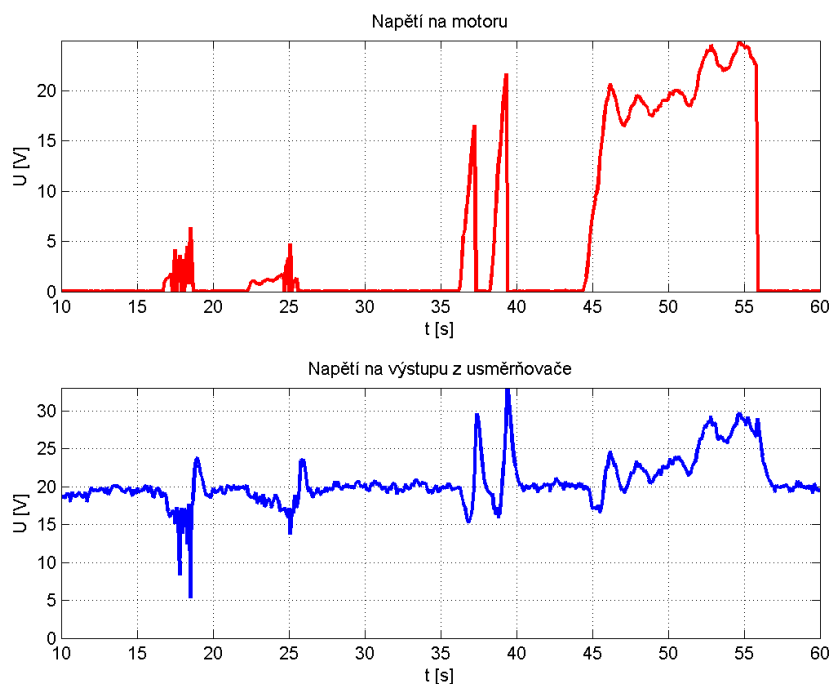
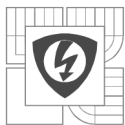
7.1 Měření během jízdy

Během programování řídicího softwaru a testování byly naměřeny zaznamenány stavy důležitých proměnných pomocí programu FreeMaster.



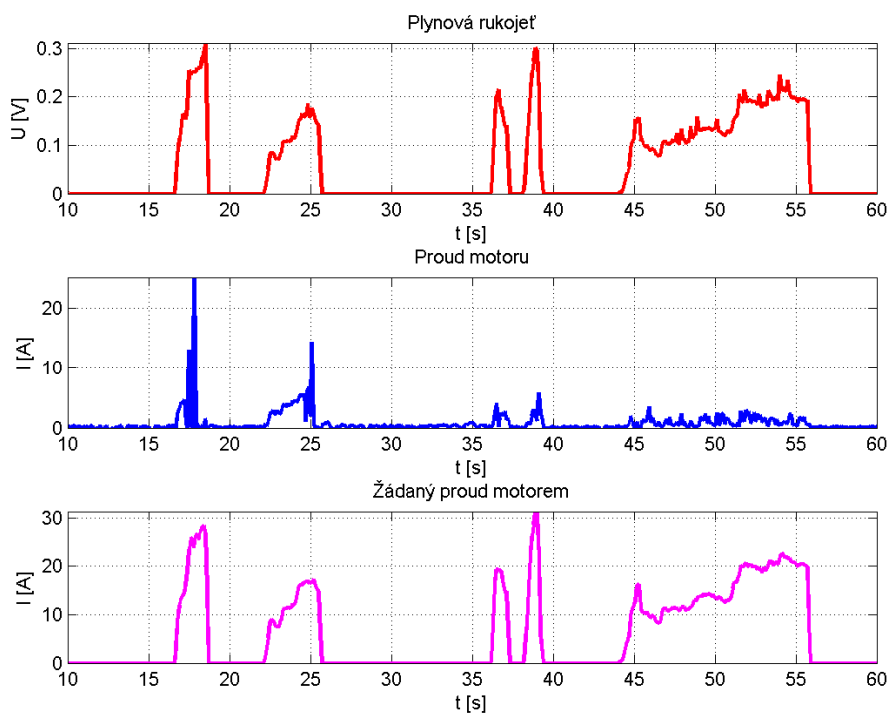
Obr. 7.3: Naměřené průběhy z programu FreeMaster

Na obr. 7.3 lze vidět aktuální otáčky spalovacího motoru, dále žádaný výkon, který je požadován po spalovacím motoru a následně žádané otáčky, které jsou vnucovány spalovacímu motoru, aby bylo tohoto výkonu dosaženo. Prudké zvýšení otáček spalovacího motoru je zapříčiněno náhlým snížením zatížení (vypnutím měniče vlivem uvolnění plynové rukojeti).

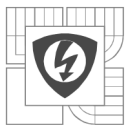


Obr. 7.4: Měření napětí na motoru a výstupu z usměrňovače

Na obr. 7.4 lze vidět, jak napětí do motoru roste, to znamená, že dochází k rozjezdu kola. Zvlnění napětí na usměrňovači vlivem odlehčení generátoru, kdy dojde k malému přepětí. Na toto přepětí zapůsobí regulace a stáhne klapku karburátoru spalovacího motoru, pro snížení otáček.

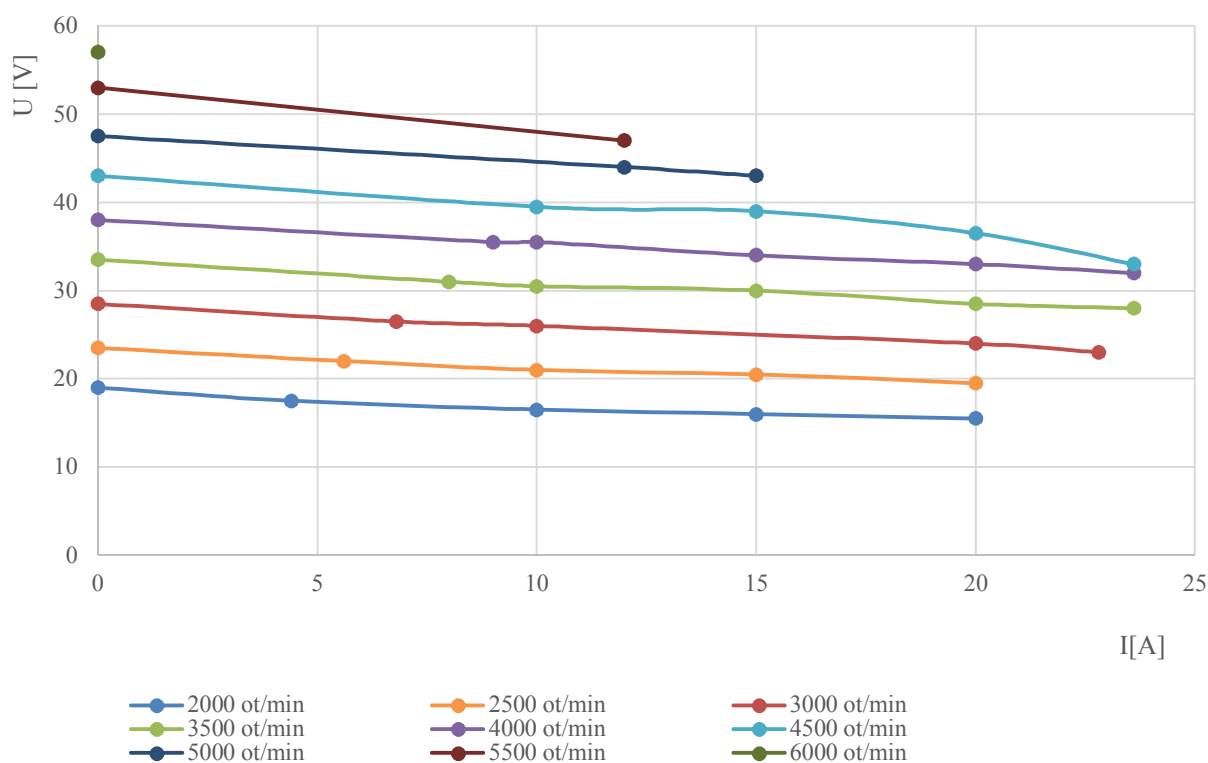


Obr. 7.5: Průběh signálu plynové rukojeti, proudu motoru a žádaného proudu



Na obr. 7.5 je vidět signál z plynové rukojeti a nastavení žádaného proudu motoru. Skutečný proud motorem neodpovídá žádanému, vlivem nedoladěného softwaru jízdního kola.

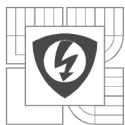
7.2 Měření na synchronním generátoru s PM



Obr. 7.6: Závislost napětí na stejnosměrné straně generátoru při zatěžování pro jednotlivé otáčky spalovacího motoru

Z obr. 7.6 je jasně vidět, že při nízkých otáčkách dochází k poklesu napětí až na 15 V. Toto napětí je nedostatečné pro správnou funkci budičů výkonových tranzistorů, které mají nastavenou podpětovou ochranu na 12 V a vlivem úbytků je na budičích i nižší napětí.

Z hlediska správné funkce se tedy jeví provozovat celý systém při vyšších otáčkách spalovacího motoru, ovšem za cenu vyšší spotřeby spalovacího motoru. Nejvýhodnější by tedy bylo zvolit jiné budiče, které by měly nižší podpětovou ochranu nebo by byly napájeny konstantním napětím z měniče pracujícího s napětím od cca 10 V do 60 V.



8 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

8.1 Výběr kola

Pro projekt jízdního kola s elektrickým přenosem výkonu a benzínovou elektrocentrálou, bylo vybráno pánské kolo Amsterdam Original 3i v černo-zlaté barvě od firmy Electra. Jedná se o klasické městské kolo s koženým sedlem a rukojeťmi na řídících. Kolo je vyrobeno ze slitiny hliníku s označením 6061-T6. Tato slitina propůjčuje kolu lehkost a pevnost potřebnou pro každodenní jízdu.

Kolo je osazeno městskými plášti a 3 stupňovou přehazovačkou, pro jednoduchou jízdu ve městě. Pro zastavení kola slouží dva typy brzd. Klasické čelist'ová brzda na předním kole a brzda typu torpédo na kole zadním. [6]



Obr. 8.1: Použité kolo Amsterdam Original 3i od firmy Electra [6]

8.2 Úprava kola

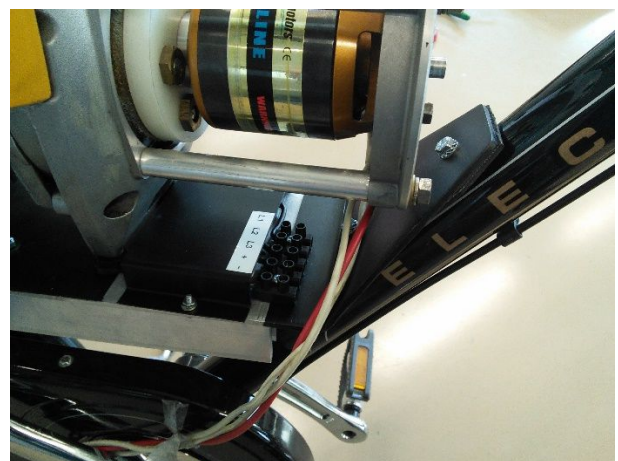
Jelikož se jedná o stylově založené kolo, požadavkem bylo, aby nebyl nijak zásadně ovlivněn ráz kola a nedošlo k rozsáhlému zásahu do rámu kola. Protože toto kolo není od výrobce určeno přímo pro přestavbu na elektro nebo moto kolo, bylo nutno vhodně umístit všechny komponenty motorového kola se sériovým hybridním pohonem tak, aby kolo bylo vyvážené a během jízdy žádná z komponent řidiči nevadila. Proto bylo nutno vytvořit systém úchopů a držáků pro tyto komponenty. Jisté usnadnění nabídl elektromotor, neboť (jak již bylo zmíněno) je vpleten do náboje předního kola a tedy není třeba vytvářet žádné složité podstavce pro jeho uchycení. Uchycení kola s elektromotorem je prostřednictvím středové hřídelky a objímky na vidlici kola. Další důležitá komponenta motorového kola je jeho zdroj energie neboli soustava spalovacího benzínového motoru a synchronního generátoru s PM. Pro umístění této soustavy se nabízely tři možnosti. Vepředu nad přední kolo - negativně by bylo ovlivněno řízení a komfort řidiče díky váze



této soustavy a výfukovým plynům, které by byly hnány na řidiče. Další možností by bylo uchycení soustavy vzadu nad zadní kolo na nosič. Díky tomuto uspořádání by se ovšem nedalo kolo využít pro převoz menších nákladů, jako je taška či batoh. Bylo tedy vybráno umístění uprostřed rámu kola, kde svou hmotností a umístěním níže než v předešlých případech zvýšilo celkovou stabilitu a rozložení váhy kola. Pro toto umístění bylo nutno vytvořit držák motoru, který je uchycen na jedné straně v předvrtaných dírách, jež se používají pro uchycení držáku na pítí a na druhé straně objímkou přichycenou k rámu kola. Tento držák je vyroben ze silného hliníku, aby byl pevný a zároveň lehký a svou hmotností nezatěžoval kolo. Motor je k němu uchycen přes gumové podložky, pro omezení přenosů vibrací ze spalovacího motoru na kolo. Na tomto držáku je také umístěn šestipulzní usměrňovací můstek pro usměrnění napětí z generátoru. Pro lepší chlazení usměrňovače je ze spodní strany umístěn chladič. Další komponentou kola je měnič, který je také umístěn uprostřed rámu kola, před soustavou generátoru a motoru. Pro tento měnič byla pořízena ochranná krabice s uchycením za pomoci objímek k rámu kola. Vývody měniče směřují k zemi a jsou odkryté pro snadnou montáž, či demontáž přívodních kabelů. Poslední částí je plynová rukojeť, která je umístěna na řídicích a s jejíž pomocí je kolo ovládáno.



Obr. 8.2: Umístění spalovacího motoru, generátoru a usměrňovače uprostřed kola



Obr. 8.3: Detail umístění usměrňovače pod generátorem



Obr. 8.4: Uchycení elektromotoru a napájecí kabel



Obr. 8.5: Celý systém namontovaný na kole během testování

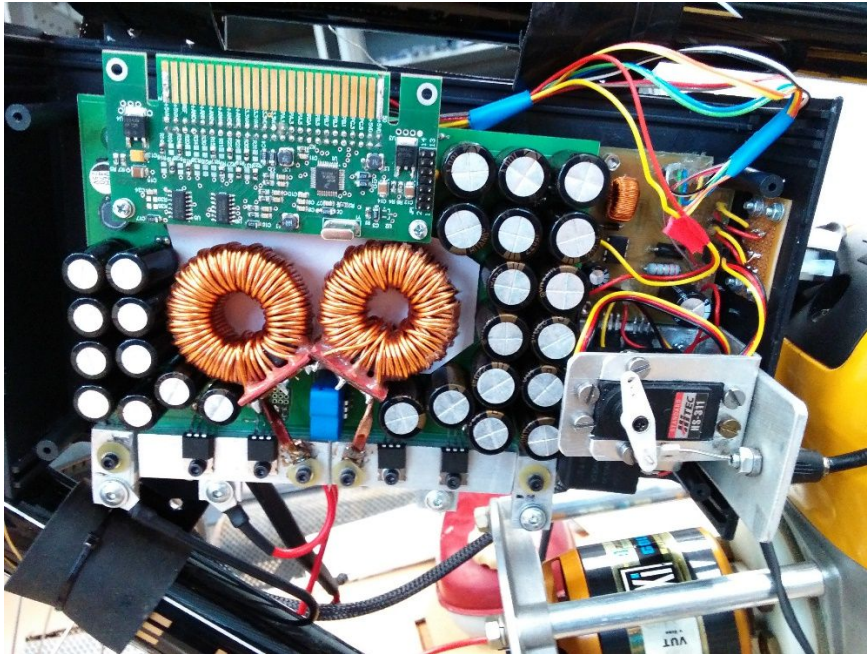
8.3 Zabudování měniče na jízdní kolo

Měnič je zabudován do plastové krabice, která je umístěna pomocí přišroubovaných držáků nad generátorem uprostřed rámu kola. V krabici se nachází jak držák pro servopohon (který zároveň slouží i jako chladič součástek pomocných obvodů), tak i měnič, pomocné obvody a ochranné relé.

Pomocné obvody jsou s měničem propojeny barevnými vodiči. Pro ovládání servopohonu je využit černo-bílý vodič, pro měření otáček generátoru je využit žluto-oranžový a pro signál z plynové rukojeti je využit zeleno-modrý vodič. Napájení pro pomocné napěťové zdroje umístěné



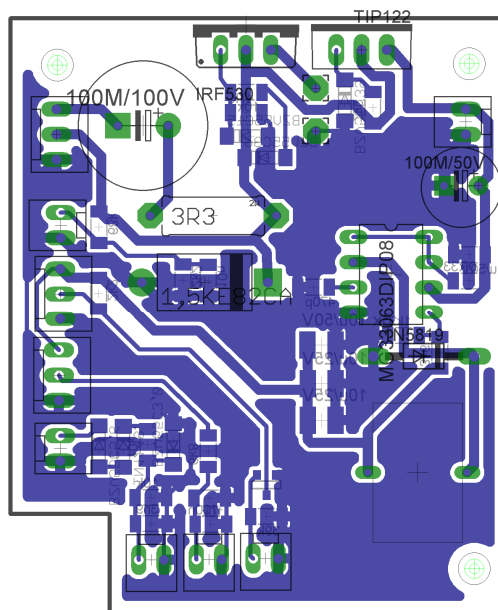
na měniči je přivedeno pomocí červeno-žlutého vodiče, který je silnější (přenos většího výkonu než v případě signálových vodičů). Pro měření tohoto napětí, které je shodné s napětím na vstupu, je využit hnědo-červený vodič.



Obr. 8.2: Ukázka umístění měniče v plastové krabici s pomocnými obvody a servopohonem

8.3.1 Návrh pomocné desky

Na obr. 5.11 je ukázána navrhnutá pomocná deska se všemi potřebnými obvody pro zpracování signálů a stabilizování vstupního napětí.



Obr. 8.3: Layout spodní strany pomocné desky



Pomocná deska je navrhnutá jako doplněk ke stávající desce měniče. Při návrhu bylo zvoleno, že tranzistor IRF530 a TIP122 budou umístěny na hliníkovém držáku servopohonu, který bude sloužit zároveň i jako chladič pro tyto součástky. Na levé straně desky jsou umístěny výstupy (či vstupy) pro konektory. Je zde umístěno napájení pomocné desky, konektor pro servopohon, výstup z plynové rukojeti a vstup z generátoru pro měření otáček. Na spodní straně desky jsou umístěny konektory (barevně odlišené drátky) pro vstup do řídicí desky procesoru. Jelikož předchozí zapojení měniče neuvažovalo proměnlivé napájecí napětí s možností překročení napětí nad 40 V, kdy by došlo k destrukci integrovaných obvodů MC34063, byl na pomocné desce vyveden napájecí výstup, který je přiveden na místo kde je vstup z „baterie“ (jak již bylo zmíněno v původním konceptu měniče se počítalo s napájením z baterie) ke zmíněným integrovaným obvodům MC34063. Je zde i jeden integrovaný obvod MC34063 pro servopohon a plynovou rukojeť umístěn. Dále se na desce nachází přepěťová ochrana v podobě transilu a Zenerových diod. Ochranné relé je umístěno mimo pomocnou desku a spojeno pomocí drátové propojky. Měnič s řídicí deskou, pomocná deska, servopohon a relé jsou umístěny v klasické plastové krabici.



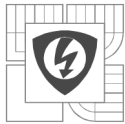
ZÁVĚR

V této práci bylo cílem navrhnout pohon motorového kola se spalovacím motorem, synchronním generátorem s PM, usměrňovačem, DC/DC měničem a stejnosměrným motorem. Některé komponenty tohoto pohonného řetězce již byly realizovány a bylo nutno je zkontrolovat, seznámit se s nimi a následně je oživit. Nejdůležitější bylo navrhnout vhodný algoritmus řízení celého systému pro minimalizaci spotřeby paliva a zvolit nejvhodnější řešení pro zástavbu celého systému na jízdní kolo.

Dost času praktické části připadlo na zprovoznění spalovacího motoru. Tento motor nebyl delší dobu spouštěn a bylo nutno jej hlouběji prozkoumat, zda nejsou zanesené palivové cesty atd. Po výměně oleje a doplnění paliva byl motor nastartován a kontrolně změřen výstup z generátoru, čímž jsme ověřili jeho funkčnost. Následně byl proveden návrh pomocných obvodů a koupě ovládacích prvků, tedy plynové rukojeti a servopohonu pro ovládání klapky spalovacího motoru. Pomocné obvody bylo potřeba přidat jako doplněk ke stávajícímu měniči, aby bylo možno regulovat celý systém jízdního kola s elektrickým přenosem výkonu.

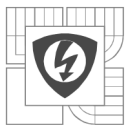
Po vytvoření pomocných obvodů a zabudování ovládacích prvků bylo na řadě vyvinout ovládací software, který by dostatečně přesně splnil požadavky na regulaci celého systému. Tento software byl postupně vyvíjen a upravován, dle aktuální problematiky. Při vývoji softwaru byl nastaven regulátor pro otáčky spalovacího motoru a regulátor proudu motoru. Systém byl uveden do provozu a jeho funkčnost otestována.

Během testování došlo k vypínání budičů výkonových tranzistorů, vlivem zapůsobení podpěťové ochrany. Po proměření synchronního generátoru s PM, byl zjištěn pokles napětí, až na kritickou mez při rostoucím zatížení. Při vývoji byla tato skutečnost vyřešena zvýšením otáček spalovacího motoru. Toto řešení ovšem zvyšuje spotřebu spalovacího motoru a tedy snižuje účinnost celého systému. Jako vhodné řešení by bylo využít pomocný zdroj pro napájení budičů tranzistorů, který by dodával konstantní napětí pro budiče a pracoval s proměnlivým vstupním napětím v rozsahu cca 10 – 60 V. Nejvhodnějším řešením by bylo pomocné obvody v této diplomové práci i s navrženými úpravami zapracovat do měniče, aby vznikl jeden ovládací prvek. Z naměřených průběhů lze vyčíst, že nelze zcela využít výkon generátoru, kvůli vysokým otáčkám, které odpovídají požadovanému výkonu. Tyto otáčky jsou úměrné napětí vlivem převodní konstanty generátoru, a tedy čím vyšší jsou otáčky, tím vyšší je napětí na vstupu do měniče. Bylo by tedy nutno zvolit generátor s jinou napětíovou konstantou nebo součástky na vyšší napětí, aby byl zcela využit výkon generátoru.



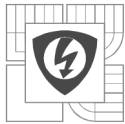
LITERATURA

- [1] NĚMEC, Petr. *Trakční pohon elektrokola s motorem Heinzmann*. Brno, 2008. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně.
- [2] PRUDÍK, Martin. *Trakční měnič pro motorové kolo se stejnosměrným motorem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] VLK, František. Alternativní pohony motorových vozidel. *Soudní inženýrství*. Brno: CERM, 2004, roč. 15, č. 4, s. 212-224. DOI: 1211-443X. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-04-212-224.pdf>
- [4] *SERVICE MANUAL EH025/EH035 ENGINE* [online]. USA: Inc. Robin America, 2003 [cit. 2014-11-28]. ISBN PUB-ES1740.
- [5] DOUBLE AXI 5345/18 HD GOLD LINE. MODEL MOTORS. *Model motors: modelářské elektromotory AXI, MiniAC, VM* [online]. 2006 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z: <http://www.modelmotors.cz/cz/index.php?page=61&product=5345%20HD&serie=18&line=GOLD>
- [6] Original 3i: Electra Bikes. *Electra Bicycle Company: Bikes & Accessories* [online]. 2014 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z: <http://www.electrabike.com/bikes/amsterdam/original-3i?g=mens>
- [7] 2015. HS-311 ECO bulk s příslušenstvím - Serva | Reichard Modelsport. *Reichard Modelsport* [online]. Available from: <http://eshop.reichard.cz/serva/hs-311-eco-bulk-s-prislusenstvim.html> [Accessed 2015-05-18]
- [8] Gme.cz. 2015. *Datasheet: NVF4-3&NVF4- 4*. Available from: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/634/554/relauto12v-60a-datasheet-1.pdf>
- [9] Gme.cz. 2015. *Datasheet: MC34063A, MC33063A, NCV33063A*. Available from: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/104/mc34063ap1-datasheet-1.pdf>
- [10] 2015. RC Servo Control. *Electronics & Control Projects* [online]. Available from: <https://sites.google.com/site/controlandelectronics/rc-servo-control> [Accessed 2015-05-18]
- [11] VACULÍK, J. Svářečka pro obloukové svařování se spínaným zdrojem [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2011
- [12] Klima, B., Střídavé pohony, Mikroprocesorové řízení elektrických pohonů, Pracovní verze učebního textu, Brno 2012 (cs)
- [13] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.II. (CS)



PŘÍLOHA 1: SEZNAM SOUČÁSTEK POMOCNÝCH OBVODŮ

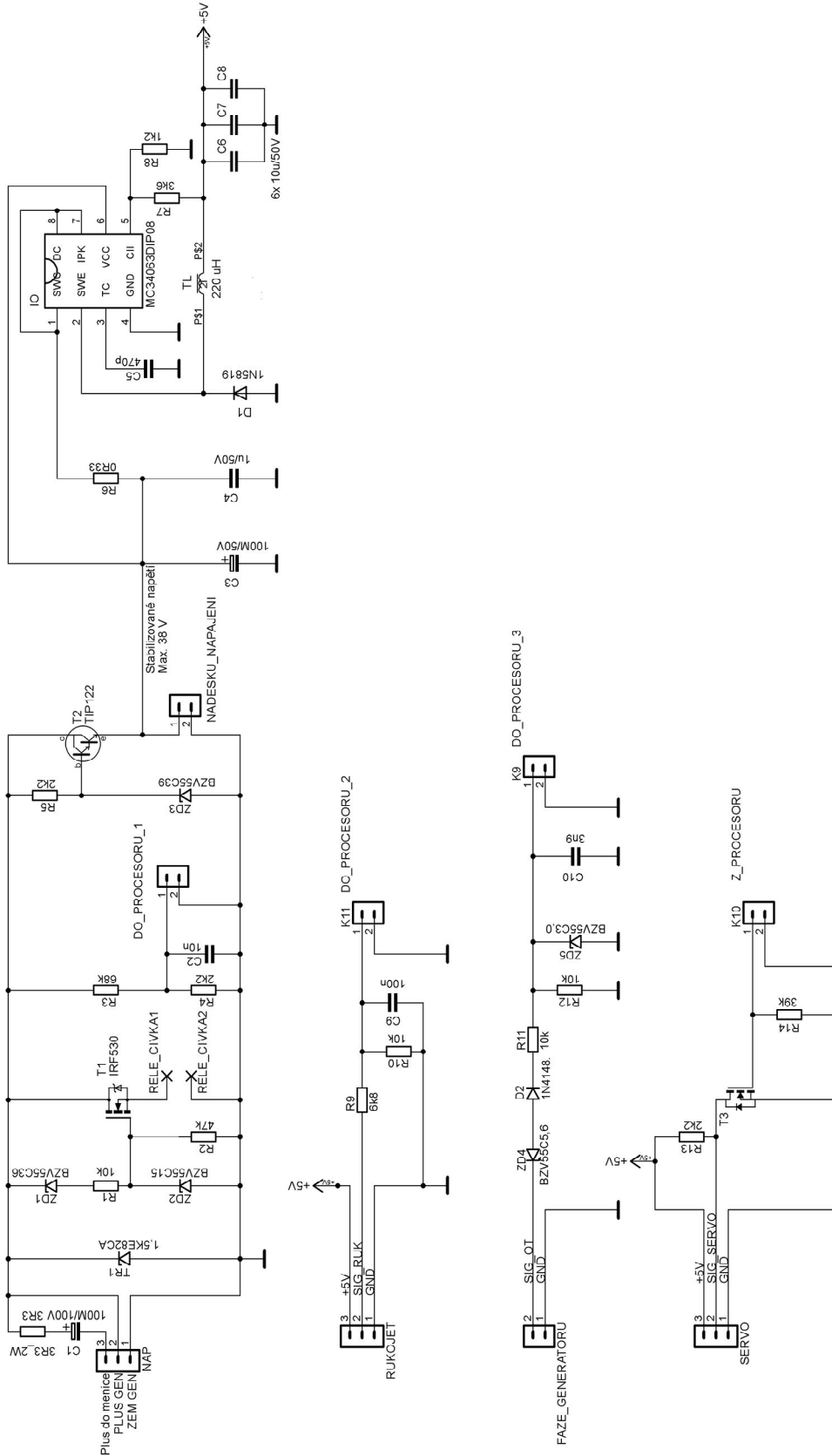
Název	Označení	Hodnota	Pouzdro
Odpor	3R3_2W	3R3	
Odpor	R1	1k2	1206
Odpor	R2	0R33	1206
Odpor	R3	3k6	1206
Odpor	R4	10k	1206
Odpor	R5	10k	1206
Odpor	R6	47k	1206
Odpor	R7	68k	1206
Odpor	R8	2k2	1206
Odpor	R9	2k2	1206
Odpor	R10	10k	1206
Odpor	R11	6k8	1206
Odpor	R12	10k	1206
Odpor	R13	2k2	1206
Odpor	R14	39k	1206
Kondenzátor	C1	100M/100V	
Kondenzátor	C2	100M/50V	
Kondenzátor	C3	10n	1206
Kondenzátor	C4	10u/25V	1210
Kondenzátor	C5	10u/25V	1210
Kondenzátor	C6	6x10u/50V	1210
Kondenzátor	C10	100n	1206
Kondenzátor	C11	3n9	1206
Kondenzátor	C12	1u/50V	1206
Kondenzátor	C13	470p	1206
Dioda	D1	1N5819	DO041-10
Dioda	D5	1N4148	SOD-80
Tranzistor	Q1	IRF530	TO220BV

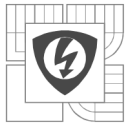


Tranzistor	T1	BSS138	SOT-23
Tranzistor	T2	TIP122	TO-220S
DC/DC měnič	MC1	MC34063	DIL8
Transil	TR1	1,5KE82CA	DO201
Zenerova dioda	ZD2	BZV55C5,6	SOD-80
Zenerova dioda	ZD3	BZV55C3,0	SOD-80
Zenerova dioda	ZD4	BZV55C36	SOD-80
Zenerova dioda	ZD5	BZV55C15	SOD-80
Zenerova dioda	ZD6	BZV55C39	SOD-80



PŘÍLOHA 2: CELKOVÉ SCHÉMA POMOCNÝCH OBVODŮ





PŘÍLOHA 3: NAMĚŘENÉ HODNOTY NA STEJNOSMĚRNÉ STRANĚ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S PM

2000 ot/min		2500 ot/min		3000 ot/min	
I	U	I	U	I	U
[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]
0	19	0	23,5	0	28,5
4,4	17,5	5,6	22	6,8	26,5
10	16,5	10	21	10	26
15	16	15	20,5	15	24
20	15,5	20	19,5	20	23

3500 ot/min		4000 ot/min		4500 ot/min	
I	U	I	U	I	U
[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]
0	33,5	0	38	0	43
8	31	9	35,5	10	39,5
10	30,5	10	35,5	15	39
15	30	15	34	20	36,5
20	28,5	20	33	23,6	33
23,6	28	23,6	32		

5000 ot/min		5000 ot/min		6000 ot/min	
I	U	I	U	I	U
[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]
0	47,5	0	53	0	57
12	44	12	47		
15	43				