

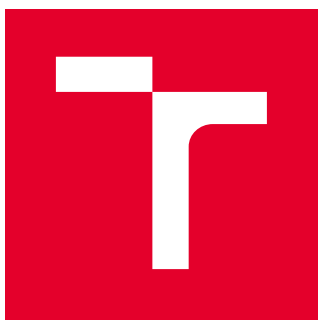
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Lukáš Doležal



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## PŘÍDAVNÝ POHON JÍZDNÍHO KOLA S BENZINOVÝM MOTOREM A ELEKTRICKÝM PŘENOSEM VÝKONU

BICYCLE ADDITIONAL DRIVE WITH A COMBUSTION ENGINE AND AN ELECTRIC POWERTRAIN

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Doležal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2018



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Lukáš Doležal

**ID:** 164259

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### **Přídavný pohon jízdního kola s benzinovým motorem a elektrickým přenosem výkonu**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Osadte oživte desky plošných spojů navržené v semestrálním projektu.
2. Proveďte mechanickou montáž měniče a ovladače klapky plynu.
3. Dostavte regulátory pro reálný provoz celého pohonu.
4. Proveďte sérii ověřovacích měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice.
- [2] VOREL, Pavel. Řídicí členy v elektrických pohonech, skriptum VUT.
- [3] VOREL, Pavel. Průmyslová elektronika, skriptum VUT.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

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

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Víték, 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 diplomové práce je navrhnout nový výkonový měnič pro motokolo s elektrickým přenosem výkonu. Měnič je řízen mikroprocesorem a řídicí algoritmus je navržen s ohledem na maximální účinnost spalovacího motoru. V práci je navržen hardware, firmware i kovová krabice, ve které je umístěn měnič a servopohon ovládající škrtkící klapku spalovacího motoru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

DC/DC měnič, Blokující měnič s transformátorem, Snižující měnič, Zvyšující měnič, Elektrokolo, Spalovací motor, Stejnoseměrný motor, Nadproudová ochrana, Přepětová ochrana, PWM

## **ABSTRACT**

The objective of this master's thesis is new power converter design for bicycle with combustion engine and electric power transmission. The power converter is control by microprocessor and control algorithm is designed to achieve maximum efficiency of combustion engine. Converter and servomotor for controlling combustion engine throttle are located in metal box. Hardware, firmware and metal box are designed in the thesis.

## **KEYWORDS**

DC/DC Converter, Flyback converter, Buck converter, Boost Converter, Electrobike, Combustion Engine, DC motor, Overcurrent protection, Overvoltage protection, PWM

DOLEŽAL, Lukáš. *Motokolo s benzinovým motorem a elektrickým přenosem výkonu*. Brno, 2018, 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Motokolo s benzinovým motorem a elektrickým přenosem výkonu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Pavlu Vorlovi Ph.D. a také Ing. Janu Martišovi a Ing. Janu Knoblochovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora

# OBSAH

Úvod	10
<b>1 Popis stávajícího řešení elektrokola</b>	<b>11</b>
1.1 Mechanická konstrukce . . . . .	11
1.2 Generátor . . . . .	11
1.3 Spalovací motor . . . . .	12
1.4 Stejnosměrný motor Heinzmann . . . . .	13
1.4.1 Výpočet maximálního zatížení elektromotoru . . . . .	14
<b>2 Návrh Hardware měniče pro elektrokolo</b>	<b>17</b>
2.1 Výkonová část . . . . .	17
2.1.1 Snižující měnič . . . . .	17
2.1.2 Zvyšující měnič . . . . .	18
2.1.3 Obvodová analýza měniče . . . . .	18
2.1.4 Návrh bočníku . . . . .	21
2.1.5 Návrh zesilovače bočníku . . . . .	21
2.1.6 Dimenzování snižujícího měniče . . . . .	22
2.1.7 Dimenzování zvyšujícího měniče . . . . .	24
2.1.8 Budiče výkonových tranzistorů . . . . .	25
2.2 Napájecí obvody . . . . .	26
2.3 Řídicí obvody . . . . .	31
2.4 Návrh plošného spoje a chladiče . . . . .	36
<b>3 Firmware měniče</b>	<b>37</b>
3.1 Blokové schéma pohonu . . . . .	37
3.2 Otáčková regulační smyčka . . . . .	38
3.3 Proudová regulační smyčka . . . . .	39
3.4 Zdrojový kód . . . . .	42
<b>4 Mechanická konstrukce</b>	<b>45</b>
<b>5 Měření</b>	<b>47</b>
<b>6 Závěr</b>	<b>53</b>
Literatura	55
Seznam symbolů, veličin a zkratk	56

<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>
<b>A Katalogový list motoru Heinzmann</b>	<b>60</b>
<b>B Obsah přiloženého CD</b>	<b>61</b>
<b>C Schémata</b>	<b>62</b>
<b>D Plošný spoj - strana TOP</b>	<b>67</b>
<b>E Plošný spoj - strana BOT</b>	<b>68</b>
<b>F Osazovací plán strana TOP</b>	<b>69</b>
<b>G Soupiska materiálu</b>	<b>70</b>
<b>H Fotodokumentace</b>	<b>71</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Výchozí podoba elektrokola . . . . .	11
1.2	Závislost otáček a napětí meziobvodu na žádaném výkonu . . . . .	13
1.3	Výkon na motoru při maximálním proudu v závislosti na rychlosti . .	16
2.1	Ilustrační schéma výkonové části měniče . . . . .	17
2.2	Proudy motorem v závislosti na rychlosti elektrokola . . . . .	19
2.3	Proud tlumivkou . . . . .	20
2.4	Odvození efektivního proudu kondenzátorem . . . . .	23
2.5	Procesorová deska . . . . .	32
2.6	Schéma komparátoru s hysterezí . . . . .	34
2.7	Schématický náskres umístění tranzistoru . . . . .	36
3.1	Diagram řízení pohonu . . . . .	37
3.2	Regulační schéma otáčkové smyčky . . . . .	38
3.3	Diagram regulace proudu . . . . .	40
3.4	Časový diagram programu . . . . .	43
4.1	Náskres těla a jednoho víka krabice . . . . .	45
4.2	Náskrtek krabice . . . . .	46
5.1	Provoz blokujícího měniče při vstupním napětí 60 V . . . . .	47
5.2	Budící signály snižujícího měniče . . . . .	49
5.3	Měření na snižujícím měniči . . . . .	49
5.4	Měření na zvyšujícím měniči . . . . .	51
5.5	Měření přechodové charakteristiky regulátoru proudu motorem . . . .	51
5.6	Měření přechodové charakteristiky regulátoru otáček motorem . . . .	52
H.1	Kompletní měnič umístěný v navržené krabici . . . . .	72

## SEZNAM TABULEK

1.1	Katalogové hodnoty motoru AXI 5345/18 . . . . .	12
1.2	Katalogové hodnoty motoru Subaru Robin EH03 . . . . .	12
1.3	Jmenovité hodnoty motoru . . . . .	14
1.4	Konstanty motoru . . . . .	14

# ÚVOD

V diplomové práci je proveden komplexní návrh a realizace pohonné jednotky jízdního kola s elektrickým přenosem výkonu. V principu jde o jízdní kolo osazené spalovacím motorem s generátorem tvořícím elektrocentrálu. Ta je zdrojem elektrické energie pro měnič, který napájí stejnosměrný motor umístěný ve výpletu kola.

Tato koncepce je svým principem zcela netradiční. Úvodem je ale třeba podotknout, že vývoj pohonu nebyl iniciován snahou vytvořit nový komerčně využitelný pohon jízdního kola, nýbrž z důvodů experimentálních. Již po prvotním zamýšlení nad danou problematikou docházíme k závěru, že daný pohon může se svou složitostí a cenou jen stěží konkurovat klasickému elektrickému pohonu s bateriemi nebo motokolu se spalovacím motorem a mechanickým přenosem energie.

Naproti tomu výhodou elektrického přenosu výkonu ze spalovacího motoru je, že motor může vždy pracovat na otáčkách, které jsou optimální vzhledem k mechanickému výkonu na hřídeli. Docílíme tak snížení spotřeby paliva a delší životnosti motoru než kdyby byl spojen s kolem přes přímý mechanický převod.

Návrhem měniče a řídicího algoritmu jízdního kola se již zabývali studenti v předchozích diplomových pracích [6], [12], [5], [4]. Postupně byly navrženy dílčí části pohonu, ale doposud nedošlo k vhodnému uspořádání do jednoho funkčního celku. Za vyhovující lze považovat soustavu generátoru a spalovacího motoru, která byla použita beze změny. K pohonu kola byl použit stávající stejnosměrný motor, který je umístěn ve výpletu předního kola.

Tato práce si klade za cíl na základě získaných poznatků z předchozích diplomových prací a využití současné mechanické konstrukce elektrokola, vyvinout spolehlivý měnič pro stejnosměrný motor, který bude napájen ze stávající elektrocentrály. Tento měnič musí vhodně řídit elektrocentrálu v závislosti na požadovaném výkonu pohonu a zároveň je třeba navrhnout mechanickou konstrukci měniče tak, aby jej bylo možné vhodně umístit do rámu použitého jízdního kola.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V první je proveden rozbor vlastností stávajících komponent elektrokola a v části druhé je proveden obvodový návrh měniče, návrh plošných spojů, firmware pro mikroprocesor a návrh mechanické konstrukce krabice měniče.

# 1 POPIS STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé celky stávajícího řešení a budou diskutovány jejich možnosti a omezení.

## 1.1 Mechanická konstrukce

Stávající mechanické provedení elektrokola je zachyceno na obrázku 1.1. Ve výpletu předního kola je umístěn stejnosměrný motor Heinzmann RN120 a v rámu kola je umístěna elektrocentrála. Ta sestává z benzinového motoru Subaru Robin EH035 a generátoru. Na obrázku je také pomocí modrého kartonu naznačeno budoucí umístění navrhovaného měniče.



Obr. 1.1: Výchozí podoba elektrokola se znázorněním umístění měniče

## 1.2 Generátor

Jako generátor byl použit modelářský synchronní motor AXI 5345/18 Gold Line firmy Model Motors. Katalogové hodnoty motoru jsou shrnuty v tabulce 1.1.

Za generátorem je umístěn trojfázový šesti pulsní usměrňovač. Je zkonstruován z diod B20100 firmy International Rectifier s prahovým napětím  $U_{dr} = 0,45 \text{ V}$  a dynamický odpor  $R_{dr} = 15,8 \text{ m}\Omega$ . Pro další výpočty budeme uvažovat, že napětí za usměrňovačem je vyhlazeno kondenzátorem o dostatečné kapacitě a tedy velikost napětí stejnosměrného meziobvodu  $U_d$  pro měnič je shodná s amplitudou sdruženého

Otáčková konstanta	$k_g$	170	$[\text{min}^{-1}/\text{V}]$
Účinnost (25-63 A)	$\eta_g$	> 80	%
Maximální proud (30 s)	$I_{gmax}$	75	[A]
Odpor vinutí	$R_g$	42	$[\text{m}\Omega]$
Počet pólpárů	$p$	7	[-]

Tab. 1.1: Katalogové hodnoty motoru AXI 5345/18

napětí generátoru  $U_g$ :

$$U_d = U_g \cdot \sqrt{2} = \frac{n}{k_g} \cdot \sqrt{2} \quad [\text{V}] \quad (1.1)$$

Kde:  $n_g$   $[\text{min}^{-1}]$  jsou otáčky generátoru a  $k_g$   $[\text{min}^{-1}/\text{V}]$  je otáčková konstanta generátoru.

### 1.3 Spalovací motor

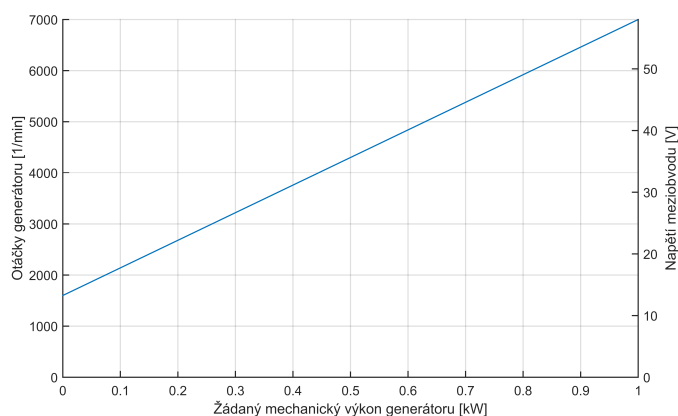
Při předchozí přestavbě byl použit vzduchem chlazený čtyřtákní spalovací motor Subaru Robin EH03 spojený mechanickou spojkou s generátorem. Škrtková klapka motoru je ovládána ocelovým lankem, které bylo připevněno na páku modelářského serva určeného pro nastavování potřebných otáček motoru. Pro motor je doporučen automobilový olej SAE 20 nebo 30, třídy SF nebo vyšší. Katalogové hodnoty motoru jsou shrnuty v tabulce 1.2 :

Objem válce	33,5	$[\text{cm}^3]$
Maximální trvalý výkon (7000 $\text{min}^{-1}$ )	1,18	[kW]
Volnoběžné otáčky	1600	$[\text{min}^{-1}]$
Maximální moment	1,67	[Nm]
Množství oleje	0,1	[l]
Měrná spotřeba paliva	340	$[\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}]$
Hmotnost	3,5	[kg]

Tab. 1.2: Katalogové hodnoty motoru Subaru Robin EH03

Pohon elektrokola bude navržen s ohledem na maximální dojezd a životnost spalovacího motoru. Je tedy nutné zajistit optimální chod spalovacího motoru tak, aby spotřeba motoru byla minimální a motor pracoval v pracovní oblasti, která by nepůsobovala zvýšené opotřebení. Měrná spotřeba paliva spalovacího motoru závisí na otáčkách a aktuální zátěži motoru. Pro optimální chod motoru je nutné tuto závislost (mapu účinnosti) znát a dle požadovaného výkonu nastavit otáčky tak,

aby měl motor co nejmenší spotřebu paliva. Účinnostní mapu motoru výrobce v dokumentaci neuvádí a její měření je nad rámec této diplomové práce. Zvolíme tedy intuitivně následující závislost (obrázek 1.2) otáček spalovacího motoru na žádaném příkonu měniče  $P_0$ : Pokud je žádaný výkon nulový jsou na motoru volnoběžné otáčky



Obr. 1.2: Závislost otáček a napětí meziobvodu na žádaném výkonu

$1600 \text{ min}^{-1}$  a následně jsou s požadovaným výkonem přímo úměrně zvyšovány. Maximální odebíraný výkon generátoru  $P_{g,max}$  byl stanoven na 1 kW a je odebíráán při maximálních otáčkách  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Napětí stejnosměrného meziobvodu je dáno rovnicí 1.1. Volnoběžným otáčkám odpovídá napětí  $U_{d,min} = \frac{1600 \cdot \sqrt{2}}{170} = 13,2 \text{ V}$  a při maximálních otáčkách  $U_{d,max} = \frac{7000 \cdot \sqrt{2}}{170} = 58 \text{ V}$ . Potom je závislost napětí meziobvodu měniče  $U_d$  na žádaném výkonu generátoru (potřebném příkonu měniče  $P_0$ ):

$$U_d = 45,8 \cdot P_0 + 13,2 \quad [\text{V} ; \text{kW}] \quad (1.2)$$

a podobně závislost otáček generátoru  $n$  na žádaném výkonu generátoru:

$$n = 5400 \cdot P_0 + 1600 \quad [1/\text{min} ; \text{kW}] \quad (1.3)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že pro optimální chod spalovacího motoru, musí být měnič pro hnací elektromotor navržen tak, aby otáčky spalovacího motoru byly nastavovány v souladu se závislostí na obrázku 1.2.

## 1.4 Stejnosměrný motor Heinzmann

Pro pohon elektrokola byl zvolen stejnosměrný motor s planetovou převodovkou. Hlavní výhoda motoru spočívá v nízké hmotnosti a vysokém momentu, který motor vyvíjí i při malých rychlostech. Díky planetové převodovce může hnací stejnosměrný motor pracovat na vysokých otáčkách při nízkém momentu. Vzhledem k tomu, že velikost motoru je dána momentem, je takto uspořádaný pohon lehký a méně rozměrný, než motor navržený jako nízko-otáčkový s vysokým momentem. Nevýhodou

takového pohonu je především vysoká hlučnost způsobená použitou převodovkou, ale také omezená životnost pohonu. Tu snižuje především opotřebení uhlíků komutátoru a převodů. Při výběru pohonu s převodovkou je tedy vždy třeba dbát zvýšené pozornosti na kvalitu provedení.

V elektrokole je osazen motor Heinzmann RN120. Motor má zabudovanou volnoběžku a vratnou teplotní pojistku. Katalogový list je uveden v příloze A. Důležité katalogové hodnoty jsou shrnuty v tabulce:

Jmenovité napětí	$U_{jm}$	24	[V]	Jmenovitý výkon	$P_{jm}$	250	[W]
Jmenovitý moment	$M_{jm}$	24,4	[Nm]	Ztrátový výkon	$P_{jztr}$	67	[W]
Jmenovité otáčky	$n_{jm}$	97	[min <sup>-1</sup> ]				
Jmenovitý proud	$I_{jm}$	13,2	[A]				
Účinnost	$\eta_{jm}$	78,9	[%]				

Tab. 1.3: Jmenovité hodnoty motoru (Teplota kotvy 60°C, Teplota magnetů 40°C)

Napěťová konst.	$k_u$	0,21	[V/min <sup>-1</sup> ]	Odpor kotvy	$R_a$	0,24	[Ω]
Momentová konst.	$k_m$	2,01	[Nm/A]	Indukčnost kotvy	$L_a$	60	[μH]
Úbytek na kartáčích	$U_b$	0,6	[V]	Třecí moment	$M_r$	0,5	[Nm]
Tlumení otáček	$k_n$	-0,6	[min <sup>-1</sup> /Nm]				
Tlumení momentu	$k_d$	0,01	[Nm/min <sup>-1</sup> ]				

Tab. 1.4: Konstanty motoru

### 1.4.1 Výpočet maximálního zatížení elektromotoru

Motor elektrokola bude pracovat v proudové smyčce, kde žádanou hodnotu proudu nastavuje jezdec pomocí páky plynu. Moment motoru je úměrný proudu a je dán s ohledem na výše uvedené koeficienty rovnicí:

$$M = I \cdot k_m - M_r - k_d \cdot n \quad (1.4)$$

Napětí na motoru je dáno součtem indukovaného napětí, úbytku na odporu vinutí a napěťovým úbytkem na kartáčích:

$$U_m = U_i + I \cdot R_a + U_b = n \cdot k_u + I \cdot R_a + U_b \quad (1.5)$$

Potom elektrický příkon, v závislosti na otáčkách motoru a proudu motorem, je dán rovnicí:

$$P_0 = I \cdot U_m = n \cdot k_u \cdot I + I^2 \cdot R_a + U_b \cdot I \quad (1.6)$$

Předpokládejme, že motor bude od nulových otáček buzen konstantním proudem o maximální velikosti 28 A a maximální výkon, který budeme odebírat z generátoru je 950 W. Otáčky, při kterých bude dosaženo tohoto maximálního příkonu, vypočteme dosazením do rovnice 1.6:

$$n = \frac{P_0 - I^2 \cdot R_a - U_b \cdot I}{k_u \cdot I} = \frac{950 - 28^2 \cdot 0,24 - 0,6 \cdot 28}{0,21 \cdot 28} = 127 \text{ ot/min} \quad (1.7)$$

Rychlost elektrokola je při těchto otáčkách:

$$v = \frac{60 \cdot \pi}{1000} \cdot D \cdot n = \frac{60 \cdot \pi}{1000} \cdot 0,71 \cdot 127 = 17 \text{ km/h} \quad (1.8)$$

Kde:  $D$  [m] je průměr kola. Od této rychlosti je třeba, s ohledem na maximální možný příkon a ztráty v motoru, proud s narůstajícími otáčkami snižovat. Snižování provozního proudu má též pozitivní dopad na životnost kartáčů. Bylo zvoleno, že při maximální rychlosti elektrokola budeme požadovat přibližně třetinu maximálního proudu, tedy 9 A. Proud je od mezní rychlosti snižován lineárně až na hodnotu 9 A, která je nastavena při maximální rychlosti elektrokola 35 km/hod.

Průběh maximálního proudu motoru s popsáním omezením v závislosti na rychlosti elektrokola je vyneseno společně s příkonem v grafu na obrázku 1.3. Průběhy byly vypočteny skriptem v prostředí MATLAB. Zdrojový kód skriptu je umístěn v příloze B. Průběh maximálního proudu v závislosti na rychlosti je nutné uvažovat v řídicím algoritmu měniče. Jezdec totiž může nastavit hodnotu maximálního proudu v jakékoli rychlosti. Pokud bude žádaná hodnota proudu při konkrétní rychlosti větší než je zde uvedeno, bude přenastavena tak, aby odpovídala maximální hodnotě dle uvedené závislosti.

Dále je v grafu vynesena účinnost vypočtená jako poměr mechanického výkonu k elektrickému příkonu:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_0} \quad (1.9)$$

Mechanický výkon motoru je dán rovnicí (za moment byla dosazena rovnice 1.4):

$$P_{mech} = M \cdot \omega = (I \cdot k_m - M_r - k_d \cdot n) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad (1.10)$$

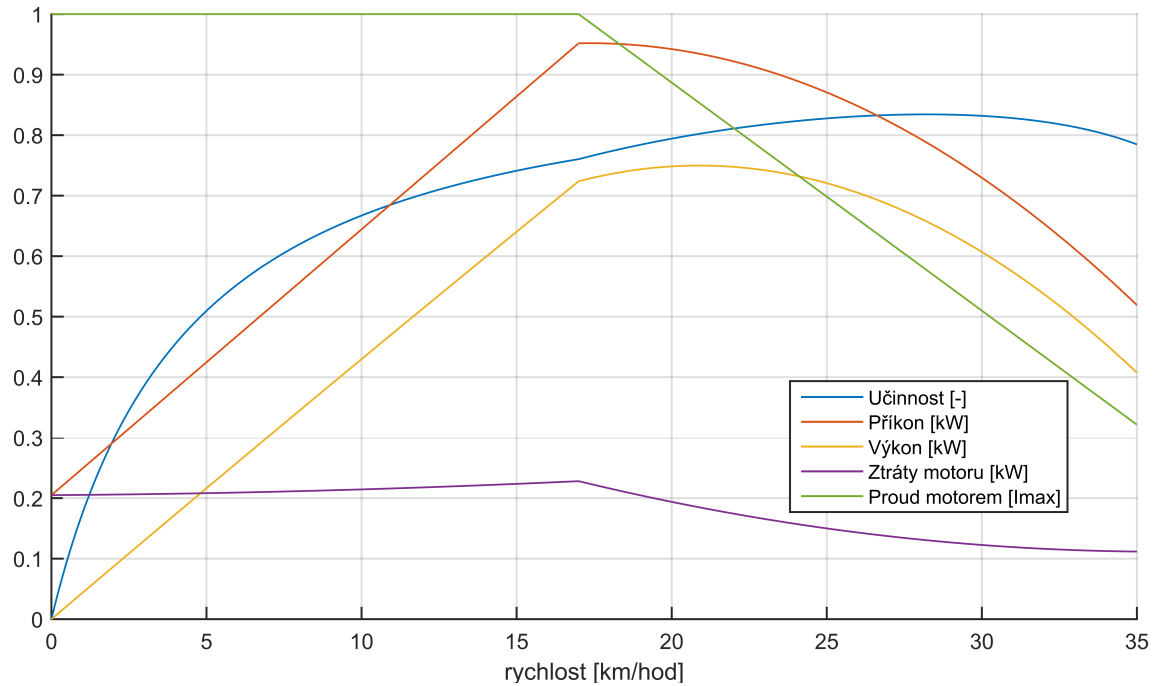
Výsledný vztah pro účinnost motoru v závislosti na otáčkách (rychlosti) a proudu motorem získáme dosazením rovnic 1.10 a 1.6 do rovnice 1.9:

$$\eta = \frac{(I \cdot k_m - M_r - k_d \cdot n) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n}{n \cdot k_u \cdot I + I^2 \cdot R_a + U_b \cdot I} \quad (1.11)$$

V grafu je dále vyneseno mechanický výkon (dle rovnice 1.10) a ztrátový výkon motoru, který je dán rozdílem mechanického výkonu  $P_{mech}$  a elektrického příkonu  $P_0$ :

$$P_{ztr} = P_0 - P_{mech} \quad (1.12)$$





Obr. 1.3: Výkon na motoru při maximálním proudu v závislosti na rychlosti

Ztráty v motoru jsou největší při maximálním příkonu motoru a dosahují velikosti více než 200 W. Tento ztrátový výkon je relativně vysoký a motor takto nelze provozovat trvale. Toto zatížení však bude probíhat pouze při rozjezdech a překonávání většího stoupání a je tedy možné předpokládat, že se motor tepelně nepřetíží. Pro případ přetížení je v motoru zabudována vratná teplotní pojistka, která se přeruší v případě dosažení teploty vinutí  $T_{max} = 140^\circ \text{C}$ . Stav pojistky je vyhodnocován v řídicí elektronice a v případě vybavení nebude možné motor dále provozovat.

Velikost napětí na motoru pro dosažení maximální rychlosti  $v = 35 \text{ km/h}$  a proudu motorem 9 A určíme dosazením do rovnice 1.5:

$$U_m = \frac{1000}{60\pi D} \cdot v \cdot k_u + I \cdot R_a + U_b = \frac{1000}{60\pi \cdot 0,71} \cdot 35 \cdot 0,21 + 9 \cdot 0,24 + 0,6 = 58 \text{ V} \quad (1.13)$$

Kde:  $D$  [m] je průměr kola

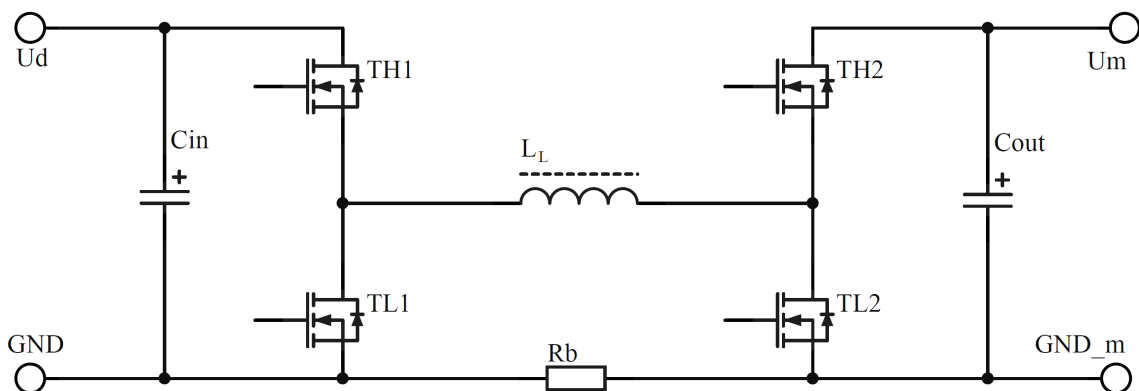
## 2 OBVODOVÝ NÁVRH MĚNIČE

V následující kapitole bude proveden návrh všech obvodů měniče a příslušných tištěných spojů. Kompletní schémata a výrobní podklady tištěných spojů jsou umístěny v přílohách práce C až G.

### 2.1 Výkonová část

Požadavky na měnič vyplývají z předchozích kapitol a jsou následující: rozsah provozního napětí na stejnosměrného meziobvodu 13 – 58 V, výstupní napětí měniče 0 – 58 V, výstupní proud 0 – 28 A. Přičemž měnič požadované hodnoty výstupního napětí a proudu musí poskytovat nezávisle na velikosti vstupního napětí. Pouze za tohoto předpokladu bude možné spalovací motor provozovat dle zvolené závislosti otáček na požadovaném aktuálním výkonu generátoru (obr. 1.2). S ohledem na přepínací ztráty byla zvolena spínací frekvence měniče  $f_m = 25$  kHz.

Z výše uvedeného vyplývá, že zkonstruovaný měnič musí umět pracovat ve zvyšujícím i snižujícím režimu. Z tohoto důvodu byla zvolena topologie tvořená kombinací klasických měničů zvyšujícího (Step-Up) a snižujícího (Step-Down). Rozbor funkce bude proveden na ilustračním schématu z obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Ilustrační schéma výkonové části měniče

#### 2.1.1 Snižující měnič

Je tvořen tranzistory  $TL1$ ,  $TH1$  a kondenzátorem  $C_{in}$ . Pokud má měnič pracovat ve snižujícím režimu, bude trvale sepnutý tranzistor  $TH2$  a tranzistor  $TL2$  je vypnutý. Funkce snižujícího měniče se potom docílí komplementárním spínáním dvojice tranzistorů  $TH1$  a  $TL1$ . Tranzistor  $TL1$ , který v měniči nahrazuje svou funkcí diodu, je v měniči umístěn z důvodu snížení vodivostních ztrát, které jsou oproti ztrátám na

diodě podstatně nižší. Předpokládejme stejnosměrné vstupní napětí na meziobvodu  $U_d$ . Pokud bude tranzistor  $TH1$  spínán střídou  $s_1$  a  $TL1$  doplňkovou střídou  $(1 - s_1)$ , bude výstupní napětí dáno vztahem:

$$U_m = s_1 \cdot U_d \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Zvyšující měnič

Je tvořen tranzistory  $TL2$ ,  $TH2$ , tlumivkou  $L_L$  a kondenzátorem  $C_{out}$ . Ve zvyšujícím režimu zůstává trvale sepnutý tranzistor  $TH1$  a tranzistor  $TL1$  je vypnutý. Tranzistory  $TH2$  a  $TL2$  jsou spínány komplementárně. Pokud budeme spínat tranzistor  $TL2$  střídou  $s_2$  a  $TH2$  doplňkovou střídou  $(1 - s_2)$  bude výstupní napětí:

$$U_m = U_d \cdot \frac{1}{1 - s_2} \quad (2.2)$$

Pro činnost zvyšujícího měniče je nezbytná tlumivka vřazená mezi zdroj napětí a spínač měniče. Byla zvolena již navinutá tlumivka na toroidním jádře z prachového železa s parametry:  $L_{L0} = 75 \mu\text{H}$ ,  $N_L = 3 \cdot 30$  vodičem o průřezu  $S_{cu,L} = 1,5 \text{ mm}^2$ . V měniči budou použity dvě tyto tlumivky spojeny paralelně. Výsledná indukčnost tlumivky bude mít tedy velikost  $L_L = L_{L0}/2 = 35 \mu\text{H}$ . Proud se rozdělí rovnoměrně mezi obě vinutí a snížíme tak proudovou hustotu a tepelné ztráty na tlumivkách. Permeabilita tlumivky na prachovém železe značně klesá se zvyšující se intenzitou magnetického pole (proudem tlumivkou). Menším proudem tedy docílíme lepšího zachování jmenovité indukčnosti tlumivky.

### 2.1.3 Obvodová analýza měniče

Cílem kapitoly je vypočítat velikost obvodových veličin v závislosti na pracovním bodu měniče. Pracovní bod měniče je definován žádaným proudem na plynové rukojeti a aktuální rychlostí elektrokola (otáčkami motoru). Tyto dvě hodnoty udávají žádaný mechanický výkon elektromotoru. Na základě mechanického výkonu je s ohledem na účinnost motoru stanoven potřebný příkon motoru. Žádaným příkonem motoru je dle závislosti 1.2 určeno napětí meziobvodu měniče:

$$U_d = 45,8 \cdot P_0 + 13,2 \quad [\text{V} ; \text{kW}] \quad (2.3)$$

kde:

$$P_0 = I \cdot U_m = n \cdot k_u \cdot I + I^2 \cdot R_a + U_b \cdot I \quad (2.4)$$

a napětí na motoru je dáno vztahem:

$$U_m = n \cdot k_u + I \cdot R_a + U_b \quad (2.5)$$

Z předchozích rovnic vyplývá, že napětí na motoru i napětí meziobvodu jsou funkcí žádaného proudu motorem a otáček motoru (rychlosti elektrokola):

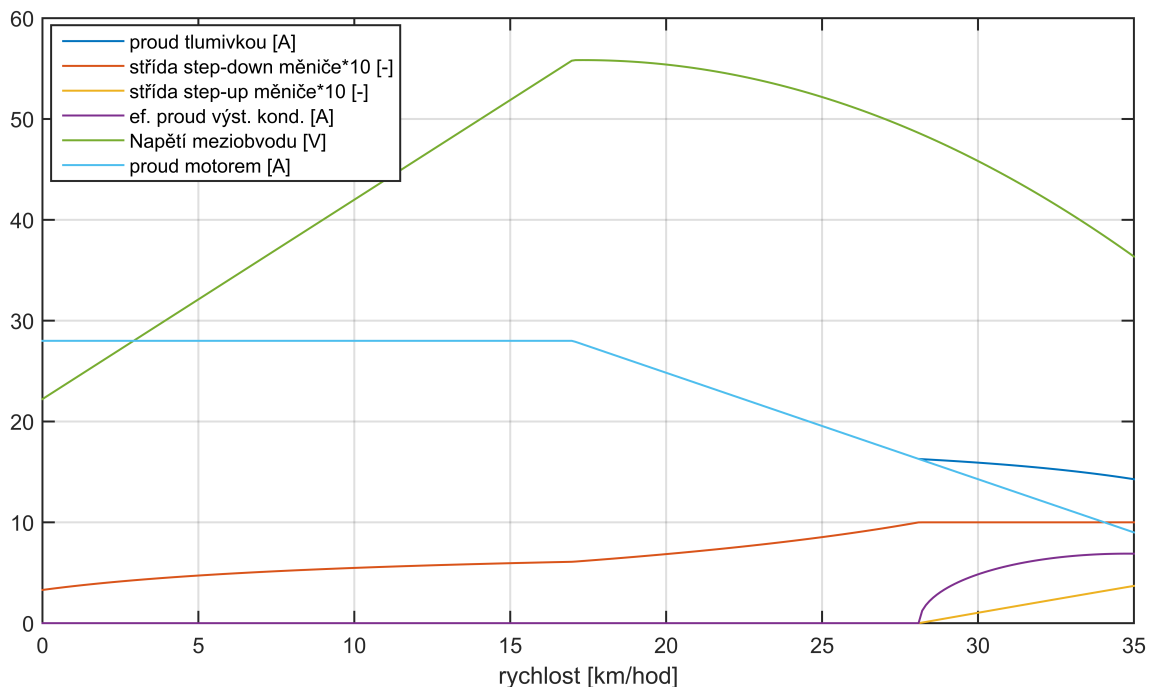
$$U_m = f(I_{\text{žad}}, n) \sim f(I_{\text{žad}}, v) \quad (2.6)$$

$$U_d = g(I_{\text{žad}}, n) \sim g(I_{\text{žad}}, v) \quad (2.7)$$

Pokud je  $U_d < U_m$  je v činnosti zvyšující měnič pracující se střídou dle rovnice 2.2 a v případě  $U_d > U_m$  snižující měnič se střídou dle rovnice 2.1. Při činnosti snižujícího měniče je proud tlumivkou  $I_L$  shodný s proudem motorem  $I$  a při činnosti zvyšujícího měniče je dán rovnicí:

$$I_L = \frac{I}{(1 - s_2)} \quad (2.8)$$

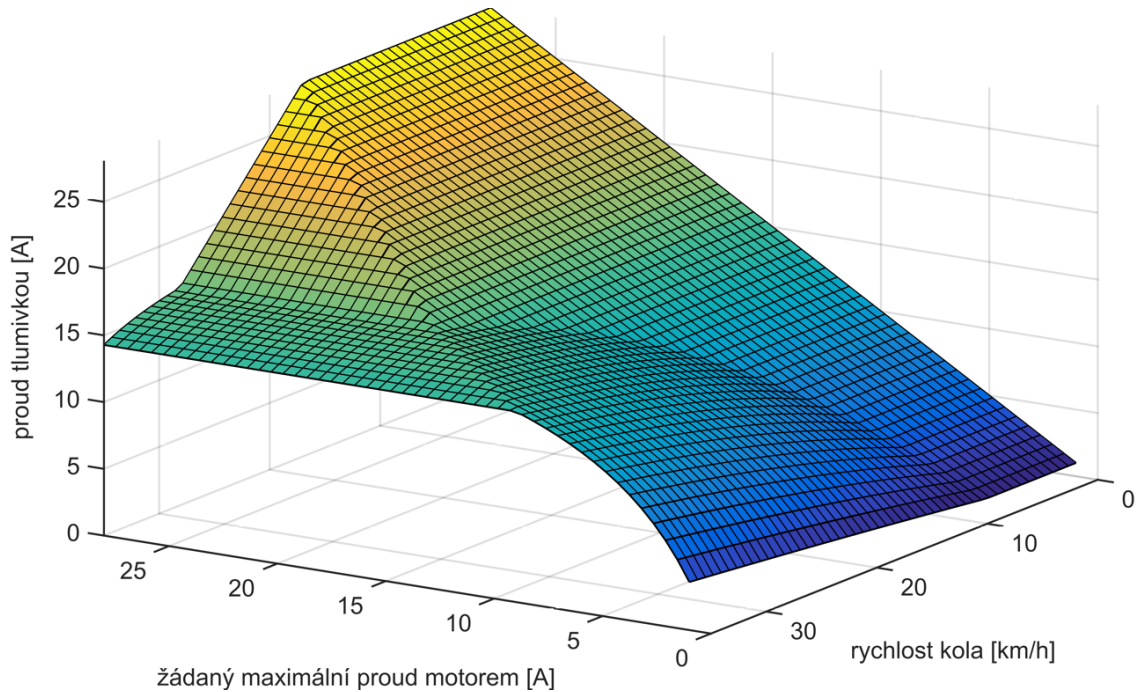
Na obrázku 2.2 jsou v závislosti na rychlosti elektrokola vyneseny obvodové veličiny měniče a střídou zvyšujícího a snižujícího měniče. Průběhy byly vypočteny skriptem v prostředí MATLAB vytvořeným aplikací rovnic 2.1 až 2.8. Zdrojový kód skriptu je umístěn v příloze práce B. Při výpočtu byl uvažován maximální žádaný proud, který byl definován na obrázku 1.3.



Obr. 2.2: Proudové veličiny při maximálním žádaném momentu v závislosti na rychlosti elektrokola

Na obrázku 2.3 byla pomocí téhož skriptu vypočtena závislost proudu tlumivkou na rychlosti a na žádaném proudu motorem. Proud tlumivkou je zde vynesena s ohledem na omezení žádaného proudu v závislosti na rychlosti elektrokola. Z 3D

zobrazení je zřejmé, že maximální proud tlumivkou nastane při maximálním žádaném proudu motorem a rychlostech menších než 17 km/h. Důležitým poznatkem, který vyplývá z grafů, je, že proud tlumivkou při činnosti zvyšujícího měniče dosahuje maximální hodnoty 16 A a při dimenzování bočnicku a tlumivky tedy můžeme vycházet z maximálního proudu snižujícího měniče, který je 28 A.



Obr. 2.3: Proud tlumivkou v závislosti na žádaném maximálním proudu motorem a rychlostí elektrokola

Nyní nalezneme pracovní bod měniče, kdy nastane maximální zvlnění proudu tlumivkou a určíme jeho velikost. Nejprve vyšetříme maximální zvlnění při činnosti snižujícího měniče. Hledáme tedy napětí meziobvodu a střidu měniče, při které dojde k maximálnímu zvlnění. Pracovní frekvence je  $f_m = 25$  kHz a měnič pracuje do tlumivky  $L_L = 35\mu\text{H}$  a výstupního kondenzátoru, ke kterému je potom paralelně připojen motor. Zvlnění proudu se proto dáno pouze indukčností tlumivky  $L_L$ . Pro výpočet velikost zvlnění platí vztah[9]:

$$\Delta I_d = \frac{U_d}{2 \cdot f_m \cdot L_L} \cdot (s_1 - s_1^2) \quad (2.9)$$

derivací funkce  $\Delta I_d = f(s_1)$  podle střidy dostaneme:

$$\frac{d\Delta I_d}{ds} = \frac{U_d}{2 \cdot f_m \cdot L_L} \cdot (1 - 2 \cdot s_1) = 0 \Rightarrow s_1 = 0,5 \quad (2.10)$$

Tedy maximální zvlnění při konkrétním  $U_d$  nastane pro střidu 0,5. Pomocí výpočetního skriptu byl vytvořen graf 2.2, z něhož potom bylo zjištěno, že maximální

zvlnění proudu nastane pro hodnoty:  $U_d = 54 \text{ V}$  a  $s_1 = 0,6$  a má velikost:

$$\Delta I_d = \frac{U_d}{2 \cdot f_m \cdot L_L} \cdot (s_1 - s_1^2) = \frac{54}{2 \cdot 25 \text{ kHz} \cdot 35 \mu\text{H}} \cdot (0,6 - 0,6^2) = 7,4 \text{ A} \quad (2.11)$$

Při činnosti zvyšujícího měniče vzniká zvlnění proudu opět pouze na tlumivce  $L_L = 35 \mu\text{H}$ . Stejně jako u snižujícího měniče vyjdeme z rovnice 2.9 a grafu na obrázku 2.2. Bylo zjištěno, že maximální zvlnění proudu nastane pro hodnoty:  $U_d = 36 \text{ V}$  a  $s_2 = 0,36$  a má velikost:

$$\Delta I_u = \frac{U_d}{2 \cdot f_m \cdot L_L} \cdot (s_2 - s_2^2) = \frac{36}{2 \cdot 25 \text{ kHz} \cdot 35 \mu\text{H}} \cdot (0,36 - 0,36^2) = 4,7 \text{ A} \quad (2.12)$$

### 2.1.4 Návrh bočnicku

Proud je měřen bočníkem, jehož umístění je naznačeno na obrázku 2.1. Pokud je v provozu snižující měnič protéká bočníkem proud  $I_b$  který je shodný s proudem motoru  $I$ . Při činnosti zvyšujícího měniče je proud motorem dán vztahem:

$$I = I_b \cdot (1 - s_2) \quad (2.13)$$

Kde:  $I_b$  je proud bočníkem a  $s_2$  je střída zvyšujícího měniče. Bočník navrhne pro maximální proud bočníkem  $I_{b,max} = 30 \text{ A}$ . Zvolíme výkonovou ztrátu na bočníku  $P_{b,max} = 1,5 \text{ W}$ . Odpor bočnicku tedy je:

$$R_b = \frac{P_{b,max}}{I_{b,max}^2} = \frac{1,5}{30^2} = 1,7 \text{ m}\Omega \quad (2.14)$$

Bočník byl realizován z odporového drátu, který byl zaletován do desky plošných spojů. Napětí na bočníku při maximálním proudu má velikost:

$$U_{b,max} = I_{b,max} \cdot R_b = 30 \cdot 1,9 \text{ m}\Omega = 57 \text{ mV} \quad (2.15)$$

### 2.1.5 Návrh zesilovače bočnicku

Napětí bočnicku bylo zesíleno tak, aby při proudu bočníkem 30 A dosahovalo velikosti 3 V a tedy i horní hranice měřicího rozsahu AD převodníku. Zesílení tedy má velikost:

$$K_b = \frac{3 \text{ V}}{U_{b,max}} = \frac{3 \text{ V}}{57 \text{ mV}} = 52,6 \quad (2.16)$$

Vzhledem k relativně velkému zesílení bude zesilovač navržen jako dvoustupňový. Zajistíme tak vysoký horní mezní kmitočet zesilovače. Zesílení každého stupně zesilovače zvolíme:

$$K_{b,1} = K_{b,2} = \sqrt{K_b} = \sqrt{52,6} = 7,25 \quad (2.17)$$

Na schématickém listu 5. v příloze C je zakresleno schéma navrženého dvoustupňového zesilovače. Každý stupeň je tvořen operačním zesilovačem v neinvertujícím zapojení s vypočteným zesílením 7,25 a měřený signál z bočnicku je filtrován dolní propustí s časovou konstantou 10  $\mu\text{s}$ .

## 2.1.6 Dimenzování snižujícího měniče

### Dimenzování tranzistorů

Při proudovém dimenzování zanedbáme zvlnění proudu. Tranzistory potom dimenzujeme na maximální proud motorem  $I_m = 28$  A. Byly vybrány MOSFET tranzistory NXP, PSMN5R6 [7] s katalogovou hodnotou proudu  $I_C = 100$  A a závěrným napětím  $U_{ds} = 100$  V. Z důvodu snížení tepelných ztrát budou vždy použity dva tranzistory spojené paralelně. Volba tranzistoru s velkým kolektorovým proudem je výhodná zejména proto, že daný tranzistor má nízký odpor v sepnutém stavu  $R_{DS,on} = 4,3$  m $\Omega$ . Maximální napětí na tranzistoru je dáno maximálním napětím na meziobvodu, které má velikost  $U_{d,max} = 58$  V. Na meziobvodu při maximálním napětí tedy nesmí nastat překmit větší než 42 V. Na tištěném spoji bude proto kladen důraz na maximální potlačení parazitní indukčnosti, která tento překmit způsobuje.

Efektivní proud horní dvojicí tranzistorů je dán rovnicí  $I_{1H,ef} = I_m \cdot \sqrt{s_1}$  a maximální efektivní proud (obr. 2.2) jimi protéká při žádaném proudu motorem  $I_m = 28$  A a střídě 0,6. Jeho hodnota je  $I_{1H,ef} = 28 \cdot \sqrt{0,6} = 21,7$  A.

### Tepelné ztráty

Výpočet ztrát provedeme pro plně zatížený měnič, kdy jsou ztráty maximální. Uvedené vztahy jsou odvozeny v [10]. Při plném výkonu protéká každou dvojicí tranzistorů proud s maximální hodnotou  $I_m = 28$  A. Protože jsou tranzistory buzeny komplementárně, pro výpočet přepínacích i vodivostních ztrát měniče platí, že součet ztrát na všech tranzistorech je při střídě v intervalu  $s_1 \in < 0; 1 >$  konstantní. Pokud budeme pro výpočet vodivostních ztrát uvažovat střídu 0,5, ztráty na všech tranzistorech jsou stejné a pro každý tranzistor mají velikost:

$$\Delta P_{v,1} = R_{DS,on} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 = 4,3 \text{ m}\Omega \cdot \left(\frac{28 \cdot \sqrt{0,5}}{2}\right)^2 = 0,42 \text{ W} \quad (2.18)$$

Přepínací ztráty jednoho tranzistoru určíme dle rovnice:

$$\Delta P_{p,1} = \frac{1}{4} \cdot f_m \cdot U_d \cdot \frac{I_m}{2} \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad [\text{W}] \quad (2.19)$$

kde:  $t_{on} = 77$  ns je zapínací doba a  $t_{off} = 117$  ns je vypínací doba tranzistoru podle katalogu [7]. Vypínací a zapínací časy jsou platné pro zátěž:  $R_L = 0,6$   $\Omega$ ,  $V_{GS} = 10$  V,  $U_{ds} = 50$  V a  $R_G = 1,5$   $\Omega$ . Podle grafu na obrázku 2.2 je při maximálním výkonu napětí meziobvodu měniče  $U_d = 54$  V a proud dvojicí tranzistorů  $I_m = 28$  A: Frekvence spínání tranzistoru je  $f = 25$  kHz. Velikost přepínacích ztrát na jednom tranzistoru potom je:

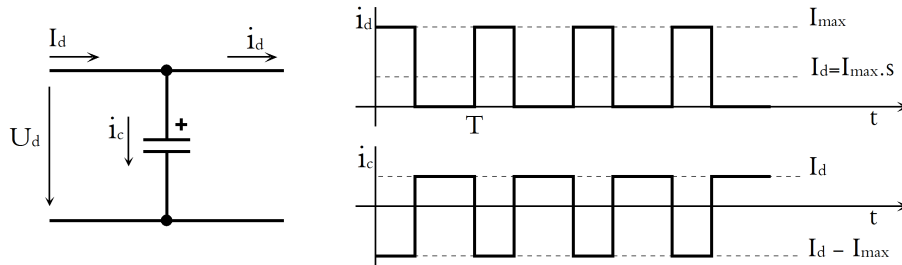
$$\Delta P_{p,1} = \frac{1}{4} \cdot 25 \text{ kHz} \cdot 54 \cdot \frac{28}{2} \cdot 194 \text{ ns} = 0,9 \text{ W} \quad (2.20)$$

a celkové ztráty na snižujícím měničích při maximálním přenášeném výkonu jsou:

$$\Delta P_1 = 4 \cdot (\Delta P_p + \Delta P_v) = 4 \cdot (0,42 + 0,9) = 5,28 \text{ W} \quad (2.21)$$

### Dimenzování kondenzátoru meziobvodu

Určujícím parametrem pro dimenzování je efektivní proud, který kondenzátorem protéká a tepelně jej namáhá. Odvození efektivního proudu kondenzátorem vychází z obrázku 2.4, na kterém je schématicky vyobrazen kondenzátor umístěný v meziobvodu snižujícího měniče. Předpokládejme, že zvlnění usměrněného napětí je zanedbatelné a na kondenzátoru je konstantní napětí  $U_d$ . Do snižujícího měniče teče obdélníkový proud  $i_d(t)$  se střední hodnotou  $I_d = I_{max} \cdot s_1$ . Základní fyzikální vlastností kondenzátoru je, že v ustáleném stavu jím protéká proud s nulovou střední hodnotou. Potom z I. Kirchhoffova zákona vyplývá, že proud odebíraný z usměrňovače je konstantní, má velikost  $I_d$  a kondenzátorem protéká pulsní proud s časovým průběhem daným rovnicí  $i_c(t) = I_d - i_d(t)$ .



Obr. 2.4: Odvození efektivního proudu kondenzátorem

Efektivní hodnota proudu je dána vztahem:

$$I_{cef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_c(t)^2 dt} \quad (2.22)$$

Určitý integrál vypočteme z geometrie uvedeného časového průběhu:

$$\int_0^T i_c(t)^2 dt = (I_{max} - I_d)^2 \cdot t_{zap} + I_d^2 \cdot (T - t_{zap}) = \quad (2.23)$$

$$= I_{max}^2 \cdot (1-s)^2 \cdot T \cdot s + I_d^2 \cdot T \cdot (1-s) = I_{max}^2 \cdot (1-s)^2 \cdot T \cdot s + I_{max}^2 \cdot s^2 \cdot T \cdot (1-s) \quad (2.24)$$

a po dosazení do rovnice 2.22 dostáváme vztah pro efektivní hodnotu proudu:

$$I_{cef} = \sqrt{I_{max}^2 \cdot (1-s)^2 \cdot s + I_{max}^2 \cdot s^2 \cdot (1-s)} = I_{max} \cdot \sqrt{s \cdot (1-s)} \quad (2.25)$$

Derivací funkce  $I_{cef} = f(s)$  podle střídavy nalezneme střídavu pro kterou nastane maximální efektivní hodnota proudu kondenzátorem:

$$\frac{dI_{cef}}{ds} = I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cdot (s - s^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot (1 - 2s) = 0 \Rightarrow s = 0,5 \quad (2.26)$$



A po dosazení dostáváme finální vztah:

$$I_{cef,max} = I_{max} \cdot \sqrt{0,5 \cdot (1 - 0,5)} = 0,5 \cdot I_{max} \quad (2.27)$$

Z předchozí analýzy vyplývá, že  $I_{max} = 28$  A. Potom je třeba kondenzátor meziobvodu dimenzovat na efektivní proud:

$$I_{cef,max} = 0,5 \cdot I_{max} = 0,5 \cdot 28 = 14 \text{ A} \quad (2.28)$$

Kondenzátor meziobvodu byl vytvořen baterií elektrolytických kondenzátorů spojených paralelně. Bylo použito 10 kondenzátorů  $470 \mu\text{F}$  o rozměrech RM5 13x26 mm s maximálním efektivním proudem 1620 mA.

## 2.1.7 Dimenzování zvyšujícího měniče

### Dimenzování tranzistorů

Horní dvojice tranzistorů zvyšujícího měniče je namáhána maximálním proudem  $I_m = 28$  A a to pouze pokud je v činnosti snižující měnič a tyto tranzistory jsou trvale sepnuty.

Z grafu na obrázku 2.2 bylo zjištěno, že při činnosti zvyšujícího měniče teče motorem maximální proud  $I_m = 16$  A. Maximální proud dolní dvojici tranzistorů je tedy pouze 16 A. Napětově jsou tranzistory namáhány výstupním napětím měniče. Maximální výstupní napětí měniče je dáno rovnicí 1.13 a má velikost 58 V. Bylo zvoleno, že ve zvyšujícím měniči budou použity stejné tranzistory jako ve snižujícím měniči. Stejně jako u snižujícího měniče je tedy nutné dbát na maximální potlačení parazitní indukčnosti tak, aby nedošlo k napětovému průrazu.

### Tepelné ztráty

Pracovní bod, při kterém nastanou maximální ztráty na zvyšujícím měniči, určíme opět z obrázku 2.2. Tranzistory protéká maximální špičkový proud (v obrázku značen jako proud tlumivkou) při střídě  $s_2 \rightarrow 0$  a má velikost  $I_m = 17$  A. Stejně jako u snižujícího měniče jsou tranzistory buzeny komplementárně a pro výpočet přepínacích i vodivostních ztrát měniče platí, že součet ztrát na všech tranzistorech je při střídě v intervalu  $s_2 \in \langle 0; 1 \rangle$  konstantní. Provedeme výpočet pro jeden tranzistor a střidu 0,5 kdy jsou ztráty na všech tranzistorech stejné a mají velikost:

$$\Delta P_{v,2} = R_{DS,on} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 = 4,3 \text{ m}\Omega \cdot \left(\frac{17 \cdot \sqrt{0,5}}{2}\right)^2 = 0,16 \text{ [W]} \quad (2.29)$$

Přepínací ztráty jednoho tranzistoru určíme dle rovnice:

$$\Delta P_{p,2} = \frac{1}{4} \cdot f_m \cdot U_m \cdot \frac{I_m}{2} \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad \text{W} \quad (2.30)$$

kde:  $t_{on} = 77$  ns je zapínací doba a  $t_{off} = 117$  ns je vypínací doba tranzistoru za předpokladu:  $U_{ds} = 50$  V,  $R_L = 0,6$   $\Omega$ ,  $V_{GS} = 10$  V a  $R_G = 1,5$   $\Omega$ . Při maximálním výkonu je napětí na motoru  $U_m = 58$  V a maximální proud každou dvojicí tranzistorů  $I_m = 17$  A. Frekvence spínání tranzistoru je  $f = 25$  kHz. Velikost přepínacích ztrát na jednom tranzistoru je:

$$\Delta P_{p,2} = \frac{1}{4} \cdot 25 \text{ kHz} \cdot 58 \cdot \frac{17}{2} \cdot 194 \text{ ns} = 0,59 \text{ W} \quad (2.31)$$

a celkové ztráty na snižujícím měniči při maximálním přenášeném výkonu jsou:

$$\Delta P_2 = 4 \cdot (\Delta P_p + \Delta P_v) = 4 \cdot (0,16 + 0,59) = 3 \text{ W} \quad (2.32)$$

Předchozí výpočet ztrát je proveden pro případ, že měnič pracuje ve zvyšujícím režimu. Pokud pracuje pouze snižující měnič, může protékat trvale sepnutými horními tranzistory zvyšujícího měniče maximální proud  $I_m = 28$  A. Horní tranzistory jsou trvale sepnuty a proto jsou v tomto režimu celkové ztráty zvyšujícího měniče:

$$\Delta P_{vh} = 2 \cdot R_{DS,on} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 = 2 \cdot 4,3 \text{ m}\Omega \cdot \left(\frac{28}{2}\right)^2 = 1,68 \text{ W} \quad (2.33)$$

### Dimenzování výstupního kondenzátoru

Určujícím parametrem pro dimenzování, je stejně jako u vstupního kondenzátoru, efektivní proud, který kondenzátorem protéká a tepelně jej namáhá. Proud výstupním kondenzátorem má obdélníkový průběh se střídou  $s_c = (1 - s_2)$  kde:  $s_2$  je střída zvyšujícího měniče. Do grafu na obrázku 2.2 byl vynesena průběh maximálního efektivního proudu výstupním kondenzátorem, který byl vypočten v programu MATLAB podle dříve odvozeného vztahu 2.25:

$$I_{cef} = I_{max} \cdot \sqrt{s \cdot (1 - s)} = I_t \cdot \sqrt{s_c \cdot (1 - s_c)} \quad (2.34)$$

kde:  $I_t$  je proud tlumivkou. Pomocí výpočetního skriptu bylo zjištěno, že maximální proud  $I_{cef}$  nastane při střídě  $s_c = (1 - s_2) = 1 - 0,37 = 0,63$  a při proudu tlumivkou  $I_t = 14,3$  A. Číselně má proud velikost:

$$I_{cef} = 14,3 \cdot \sqrt{0,63 \cdot (1 - 0,63)} = 6,9 \text{ A} \quad (2.35)$$

Kondenzátor na výstupu měniče byl vytvořen baterií elektrolytických kondenzátorů spojených paralelně. Bylo použito 10 kondenzátorů 220 $\mu$ F/100 V o rozměrech RM5 16x26 mm s maximálním efektivním proudem 1200 mA.

### 2.1.8 Budiče výkonových tranzistorů

Budiče tranzistorů jsou zakresleny v příloze C, na schématickém listu 4. Pro buzení tranzistorů byl vybrán obvod ACPL-P341. V jednom pouzdře obsahuje řídicí

optočlen se stínící mřížkou a „rail to rail“ koncový stupeň, který může dodat špičkový budičící proud až 3 A. Optočleny zajišťují galvanické oddělení řídicích signálů. Napájecí napětí budičů je pro horní spínače *TH1* a *TH2* přivedeno z galvanicky oddělených zdrojů realizovaných blokujícím měničem. Napájení budiče dolního spínače snižujícího měniče je přivedeno ze zdroje 15 V, který je spojen se signálovou zemí měniče GND. Z téhož zdroje je přes tlumivku L2 napájen i budič dolního spínače zvyšujícího měniče. Tlumivkou zamezíme průchodu impulsních proudů, které by jinak vznikaly v kapacitně zkratovaném bočníku.

## 2.2 Napájecí obvody

Napájení řídicích obvodů a budičů bylo realizováno pomocí blokujícího měniče s transformátorem řízeného integrovaným obvodem UC3844 [8]. Schéma napájecích obvodů s blokujícím měničem je uvedeno v příloze C, na schématickém listu 3.

Napájecí napětí měniče je dáno rozsahem napětí generátoru:  $U_{d,max} = 58$  V a  $U_{d,min} = 13$  V. Transformátor je tvořen jednou primární cívkou s  $N_1$  závitů a třemi sekundárními cívkami, kde na každé je  $N_2$  závitů. Na sekundárních cívkách požadujeme napětí 15 V. Odbočka 1. primární cívky má  $\frac{N_2}{2}$  závitů a je na ní tedy napětí 7,5 V. Referenční napětí pro řídicí obvod je měřeno na 1. sekundárním vinutí.

S ohledem na minimalizaci transformátoru byla zvolena spínací frekvence měniče 100 kHz. Vzhledem k takto vysoké frekvenci byl použit algoritmus řízení měniče s nepřerušovaným magnetickým tokem v jádře. Návrh je z energetického hlediska neoptimální, protože podle vztahu pro přenesenou energii v jednom pracovním cyklu platí [11]:

$$\Delta W = \frac{1}{2 \cdot L_1} \cdot (2 \cdot \Psi_{min} \cdot \Delta \Psi + \Delta \Psi^2) \quad (2.36)$$

Tedy přenesená energie je úměrná kvadrátu zdvihu magnetického toku a pouze první mocnině minimálního toku. Protože je ale měnič provozován na vysoké frekvenci 100 kHz je z hlediska tepelných ztrát výhodnější provozovat transformátor s nepřerušovaným magnetickým tokem. Navržený transformátor bude sice objemnější, ale vyjde menší zdvih magnetické indukce  $B$ . Protože v jádře transformátoru jsou dominantní hysterezní ztráty, které jsou úměrné právě změně magnetické indukce, snížením zdvihu  $B$  se docílí snížení ztrát v jádře a transformátor se nebude tepelně přetěžovat.

## Výpočet transformátoru měniče

Po dobu zapnutí tranzistoru je na primární vinutí připojeno napětí meziobvodu  $U_d$  a probíhá magnetizace jádra. Dioda na sekundární straně transformátoru je uzavřená a neprotéká tedy žádný sekundární proud. Po uplynutí doby  $t_{on}$  se tranzistor vypne. Otevírá se dioda a sekundární vinutí je tak připojeno k napětí  $U_z$ , kterým se začíná demagnetizovat. Spřažený magnetický tok v jádře transformátoru je dán rovnicí:

$$\Psi(t) = \Psi_{poč} + \int_0^{t_{on}} U_d(t) dt$$

V ustáleném stavu zůstává konstantní hodnota  $\Psi_{poč}$  a zdvih magnetického toku  $\Delta\Psi_{mag}$ , vytvořený v jádru během magnetizace, je eliminován během demagnetizace poklesem toku  $\Delta\Psi_{demag}$ . Z tohoto předpokladu vyplývá rovnice:

$$\Delta\Psi_{mag} = \Delta\Psi_{demag} \quad (2.37)$$

$$\int_0^{t_{on}} U_d = \int_{t_{on}}^{t_{off}} U_z \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (2.38)$$

$$U_d \cdot t_{on} = U_z \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot (T - t_{on}) \quad (2.39)$$

$$U_d \cdot s = U_z \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot (1 - s) \quad (2.40)$$

Kde:  $s = \frac{t_{on}}{T}$ . Z rovnice 2.40 vyjádříme střídu:

$$s = \frac{1}{1 + \frac{U_d \cdot N_2}{U_z \cdot N_1}} \quad (2.41)$$

A pro převod transformátoru platí vztah:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_d \cdot s}{U_z \cdot (1 - s)} \quad (2.42)$$

Použitý řídicí obvod umožňuje maximální střídu  $s = 0,5$ . Výstupní napětí měniče je  $U_z = 15$  V. Maximální žádaná střída je největší při minimálním napětí generátoru  $U_d = 13$  V. Maximální střídu volíme  $s = 0,47$ . Dosazením do rovnice 2.42 dostáváme potřebný převod transformátoru:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{13 \cdot 0,47}{15 \cdot (1 - 0,47)} = 0,77 \quad (2.43)$$

Dosazením do rovnice 2.41 získáme minimální střídu měniče:

$$s_{min} = \frac{1}{1 + \frac{U_{d,max}}{U_z} \cdot \frac{N_2}{N_1}} = \frac{1}{1 + \frac{58}{15} \cdot 1,3} = 0,17 \quad (2.44)$$

V průběhu demagnetizace je na tranzistoru napětí  $U_{CE,max}$  dané součtem napájecího napětí  $U_{d,max}$  a transformovaného napětí ze sekundáru na primár.

$$U_{CE,max} = U_{d,max} + U_z \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (2.45)$$

Nejméně příznivý případ nastane při maximálním napětí generátoru  $U_{d,max} = 58$  V:

$$U_{CE,max} = 58 + 15 \cdot 0,77 = 70 \text{ V} \quad (2.46)$$

Pro maximální magnetický tok v jádře platí vztah:

$$\Phi_{max} = \frac{L_1 \cdot I_{1,max}}{N_1} = \frac{L_2 \cdot I_{2,max}}{N_2} \quad (2.47)$$

Dosadíme za  $L = N^2 \cdot \Lambda$ , kde:  $\Lambda$  je magnetická vodivost jádra:

$$\Phi_{max} = \frac{N_1^2 \cdot \Lambda \cdot I_{1,max}}{N_1} = \frac{N_2^2 \cdot \Lambda \cdot I_{2,max}}{N_2} \quad (2.48)$$

a po úpravě dostáváme vztah mezi primárním a sekundárním proudem:

$$I_{1,max} \cdot N_1 = I_{2,max} \cdot N_2 \quad (2.49)$$

Za usměrňovací diodou na sekundární straně je připojen kondenzátor s velkou kapacitou. Střední proud na kondenzátorem je v ustáleném stavu vždy roven nule. Z I. Kirchhoffova zákona tedy plyne, že kondenzátorem protéká střídavá složka sekundárního proudu a střední hodnota sekundárního proudu je odebírána zátěží měniče. Platí tedy rovnice:

$$I_z = I_{2,stř} \quad (2.50)$$

$$I_z = \frac{I_{2,max} + I_{2,min}}{2} \cdot (1 - s) \quad (2.51)$$

Zvolíme zvlnění sekundárního proudu:

$$\Delta I_2 = I_{2,max} - I_{2,min} = 0,3 \cdot I_{2,max} \quad (2.52)$$

Dosazením rovnice 2.52 do 2.51 dostaneme vztah pro proud zátěže:

$$I_z = 0,85 \cdot I_{2,max} \cdot (1 - s) \quad (2.53)$$

Z toho maximální proud sekundárním vinutím nastane při  $s_{max} = 0,71$ . Uvažujme, že všechna sekundární vinutí jsou maximálně zatížena. Potom bude výkon odebíraný ze sekundárního vinutí dán rovnicí:

$$P_{2,max} = U_{s1,s3,s4} \cdot (I_{2,s1} + I_{2,s3} + I_{2,s4}) + U_{s2} \cdot I_{2,s2} \quad (2.54)$$

kde:  $U_{s1,s3,s4} = 15$  V je napětí na sekundárních vinutích s  $N$  závitů,  $U_{s2} = 7$  V je napětí na sekundárním vinutí s  $\frac{N}{2}$  závitů. S ohledem na odběr napájených obvodů byly zvoleny maximální proudy do obvodů napájených sekundárními vinutími  $I_{2,s1}$  až  $I_{2,s4}$  a číselně je potom maximální odebíraný výkon:

$$P_{2,max} = 15 \cdot (0,2 + 0,1 + 0,1) + 7,5 \cdot 1 = 13,5 \text{ W} \quad (2.55)$$

Pro snazší návrh, provedeme výpočet pro ekvivalentní sekundární vinutí s počtem závitů  $N_2$ , které bude vykazovat stejné elektromagnetické účinky jako měla původní vinutí. Napětí  $U_2$  na ekvivalentním vinutí je 15 V. Musí tedy platit, že maximální střední proud náhradním vinutím je:

$$I_{2,max} = \frac{P_{2,max}}{U_2} = \frac{13,5}{15} = 0,9 \text{ A} \quad (2.56)$$

Transformátor navrhujeme s rezervou na maximální střední sekundární proud  $I_z = 1 \text{ A}$ . Maximální hodnota sekundárního proudu potom bude:

$$I_{2,max} = \frac{I_z}{0,85 \cdot (1 - s)} = \frac{1}{0,85 \cdot (1 - 0,45)} = 2,14 \text{ A} \quad (2.57)$$

a minimální proud z rovnice 2.52:

$$I_{2,min} = I_{2,max} - 0,3 \cdot I_{2,max} = 0,7 \cdot 3 = 2,14 \text{ A} \quad (2.58)$$

Maximální proud primárem je dán převodem transformátoru:

$$I_{1,max} = I_{2,max} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 2,14 \cdot 1,3 = 2,78 \text{ A} \quad (2.59)$$

A podobně minimální proud primárem:

$$I_{1,min} = I_{2,min} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 2,14 \cdot 1,3 = 2,78 \text{ A} \quad (2.60)$$

Proud primárním vinutím je dán rovnicí:

$$i(t) = I_{poč} + \frac{1}{L_1} \int u_1(t) dt = I_{1,min} + \frac{U_d \cdot t}{L_1} \quad (2.61)$$

Maximální proud  $I_{1,max}$  je možné za pomoci rovnice 2.61 vyjádřit jako:

$$I_{1,max} = I_{1,min} + \frac{U_d \cdot t_{on}}{L_1} \quad (2.62)$$

Zvolíme spínací frekvenci měniče  $f = 100 \text{ kHz}$  a z rovnice 2.62 vypočteme primární indukčnost:

$$L_1 = \frac{U_{d,min} \cdot s_{max}}{f \cdot (I_{1,max} - I_{1,min})} = \frac{13 \cdot 0,45}{100 \cdot 10^3 \cdot (2,78 - 1,95)} = 70 \mu\text{H} \quad (2.63)$$

Pro realizaci měniče bylo vybráno feritové jádro s průřezem  $S_{Fe} = 50 \text{ mm}^2$ . Počet závitů primárního vinutí  $N_1$  bude navržen s ohledem na maximální sycení v jádře transformátoru. Jádro je vyrobeno z feritu proto:  $B_{max} = 0,3$ . Maximální magnetická indukce  $B_{max}$  nastane pokud bude měnič provozován s maximální střídou a primární proud na transformátoru  $I_1$  tak na konci doby zapnutí dosáhne svého maxima  $I_{1,max}$ . Velikost magnetické indukce potom bude:

$$B_{max} = \frac{L \cdot I_{1,max}}{N_1 \cdot S_{Fe}} \quad (2.64)$$

Ze vztahu vyjádříme  $N_1$  a po číselném dosazení dostáváme počet primárních závitů:

$$N_1 = \frac{L \cdot I_{1,max}}{B_{max} \cdot S_{Fe}} = \frac{L \cdot 2,78}{0,3 \cdot 50\text{mm}^2} = 13 \quad (2.65)$$

a počet sekundárních závitů:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 13 \cdot 1,3 = 17 \quad (2.66)$$

Nyní můžeme pro získání lepší představy o ztrátách v jádře spočítat maximální zdvih magnetické indukce, který nastane pokud bude měnič napájen maximálním napětím  $U_d = 58$  V a bude tedy pracovat se střídou  $s_{min} = 0,17$ . Zdvih magnetické indukce po uplynutí zapínací doby je dán rovnicí:

$$\Delta B_{max} = \frac{1}{N_1 \cdot S_{Fe}} \int_0^{t_{on,min}} U_{d,max} dt = \frac{1}{N_1 \cdot S_{Fe}} \cdot U_{d,max} \cdot T \cdot s_{min} = 0,15 \text{ T} \quad (2.67)$$

Jádro transformátoru musí vykazovat primární indukčnost  $L_1$ . Zvolená indukčnost se realizuje vložením vzduchové mezery o délce  $l_v$  do magnetického obvodu. Pokud budeme uvažovat, že zvolený materiál má relativní permeabilitu  $\mu_r \rightarrow \infty$  pak platí vztah pro magnetickou vodivost:

$$\Lambda = \frac{L_1}{N_1^2} = \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l_v} \quad (2.68)$$

a z této rovnice:

$$l_v = \frac{\mu_0 \cdot S_{Fe}}{L_1} \cdot N_1^2 = \frac{\mu_0 \cdot 50 \text{ mm}^2}{70 \text{ } \mu\text{H}} \cdot 13^2 = 0,15 \text{ mm} \quad (2.69)$$

Na schématickém listu 3. v příloze C je uvedeno celkové schéma měniče s navrženým transformátorem. Měnič je řízen integrovaným obvodem UC3844 (IC6), který je napájen ze stejnosměrného meziobvodu výkonového měniče napěťovým stabilizátorem se Zenerovou diodou. Po naběhnutí měniče se na sekundární straně objeví žádané napětí 15 V a přes diodu D1 je obvod dále napájen ze sekundárního vinutí.

Princip řízení měniče spočívá v regulaci velikosti špičkového proudu primárním vinutím. Po sepnutí tranzistoru narůstá proud primární indukčností lineárně a jakmile dosáhne žádané hodnoty tranzistor je vypnut. Takto je tedy prostým porovnáním žádané a měřené hodnoty proudu nastavena střída měniče. Skutečný proud je měřen bočníkem R31. Žádaný proud je nastaven PI regulátorem, jehož žádanou hodnotou je napětí z interní reference a referenční hodnotou napětí na pinu 2. Střída je vnitřně omezena a může nabývat pouze hodnot 0 - 0,5.

Z výpočtů uvedených výše vyplývá, že maximální proud bočníkem je  $I_{1,max} = 2,78$  A. Napěťový úbytek na bočníku je snímán vnitřním komparátorem a porovnáván s žádanou maximální hodnotou proudu. Žádaná hodnota proudu je

reprezentována napětím 0 - 1 V. Velikost bočníku zvolíme tak, aby maximální žádaný proud byl 4 A. Velikost bočníku potom bude:

$$R_{31} = \frac{1 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 0,25 \Omega \quad (2.70)$$

Zvolíme tedy odpor z řady  $R_{31} = 0,22 \Omega$ . S ohledem na ztráty zvolíme pouzdro s maximálním ztrátovým výkonem 2 W. Signál z bočníku je filtrován kondenzátorem C59 a následně dolnoproputným filtrem tvořeným prvky R30 a C58.

Pro regulaci žádaného proudu byl použit regulátor typu PI, který je realizován vnitřním operačním zesilovačem. Ve zpětné vazbě regulátoru jsou zapojeny R24 a C47. Konkrétní hodnoty budou stanoveny experimentálně. Žádanou hodnotou regulátoru je napětí z vnitřní napěťové reference o velikosti 2,5 V. Skutečnou hodnotu regulátoru přivádíme na pin 2. Napětí ze sekundární strany je proto sníženo odporovým děličem tvořeným odpory R22 a R23. Skutečné napětí na sekundární straně je dáno vztahem:

$$U_2 = \frac{R_{22} + R_{23}}{R_{22}} \cdot 2,5 \text{ V} = \frac{6\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \cdot 2,5 = 15,4 \text{ V} \quad (2.71)$$

Kmitočet vnitřního oscilátoru byl nastaven rezistorem R26 = 18 k $\Omega$  a kondenzátorem C54 = 1 nF na hodnotu 100 kHz. Hodnoty byly zvoleny na základě doporučení výrobce.

Po vypnutí tranzistoru T10 se na primárním vinutí objevuje napěťový překmit způsobený indukovaným napětím na rozptylové indukčnosti transformátoru. Pro potlačení překmitu slouží obvod tvořený C50, R25 a D4. Hodnoty byly zvoleny experimentálně a v průběhu testování budou doladěny tak, aby překmit na tranzistoru při vypnutí maximálního primárního proudu nepřesahoval maximální závěrné napětí 150 V a byl oproti této hodnotě podstatně menší. Dioda D4 má dovolený střední proud 1 A a závěrné napětí 400 V. Stejně diody jsou použity i ve všech sekundárních usměrňovačích. Tam je maximální napětí na diodách D2, D5 a D6 při maximálním napětí meziobvodu:

$$U_{D,max} = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_{d,max} = \frac{17}{13} \cdot 58 = 76 \text{ V} \quad (2.72)$$

Diody jsou tedy napěťově dimenzovány dostatečně. Zenerovy diody ZD2 - ZD4 zabraňují vzrůstu napětí na kondenzátorech v případě odlehčení.

Výstupní napětí 7,5 V je upraveno lineárním stabilizátorem IC7 z jehož výstupu jsou napájeny všechny řídicí obvody.

## 2.3 Řídicí obvody

K řízení měniče byla vybrána procesorová deska vyvinutá na ústavu výkonové elektroniky FEKT. Je navržena jako univerzální modul pro řízení spínaných zdrojů nebo



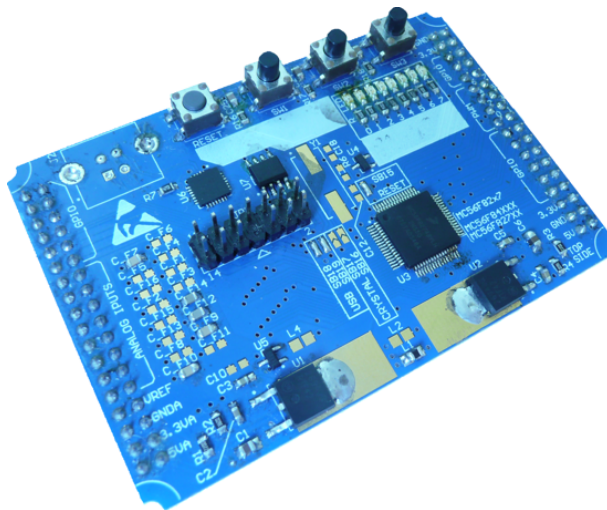
pohonů a osazena mikroprocesorem NXP MC56F8257 [3]. Dvaatřicetibitové jádro (DSP56800EX) procesoru zajišťuje dostatečný výkon pro rychlé zpracování analogových signálů a realizaci regulace. Procesor disponuje širokým množstvím periférií, ze kterých při realizaci měniče použijeme především 16-ti bitový PWM modulátor a ADC převodník. Na plošném spoji jsou dále osazeny filtry pro analogové vstupy, krystal, lineární stabilizátor napětí pro procesor, resetovací tlačítko, tři uživatelská tlačítka, konektor pro připojení JTAG programátoru, LED signalizující stav jednotlivých PWM signálů, napěťová reference pro ADC převodník a obvod pro vytvoření virtuálního sériového portu, který je používán pro komunikaci s nástrojem FreeMaster určeným pro online ladění.

Napájecí napětí procesorové desky je 5 V a lineárním stabilizátorem je potom sníženo na 3,3 V, což je napětí potřebné k provozu procesoru. Ostatní obvody, které komunikují s procesorovou deskou jsou tedy navrženy tak, aby byly kompatibilní s 3,3 V logikou.

AD převodník používá jako napěťovou referenci vlastní napájecí napětí 3,3 V a disponuje tak měřicím rozsahem 0 - 3,3 V. Maximální přípustné vstupní napětí je však dle dokumentace 4 V.

Deska má velikost 80 x 50 mm a s deskou měniče byla propojena pomocí dvou 36-pinových konektorů. Tyto konektory slouží k elektrickému i mechanickému spojení procesorové desky a základní desky měniče.

Schémata procesorové desky jsou uložena na přiloženém CD.



Obr. 2.5: Procesorová deska

Řídicí obvody které navazují na procesorovou desku jsou zakresleny na schématickém listu 2. v příloze C.

### **Obvody buzení výkonových tranzistorů**

Signály pro řízení tranzistorů jsou z procesoru vedeny přes linkový budič IC8

jehož výstupy jsou připojeny na optočleny budičů výkonových tranzistorů. Pomocí povolovacího vstupu OE1-OE4 jsou realizovány hardwarové ochrany měniče před nežádoucím sepnutím tranzistorů. Celkem byly vytvořeny tři ochranné obvody:

### Ochrana při resetu procesoru

Pokud je procesor v resetovaném stavu je na pinu RESET procesorové desky 0 V. Tento stav nastane v případě stisknutí resetovacího tlačítka anebo po připojení procesorové desky na napájecí napětí.

Na procesorové desce je osazen obvod DS1818, který vyhodnocuje napájecí napětí procesoru a pokud je nižší než 3 V udržuje pin RESET v logické nule a činnost procesoru je tedy pozastavena. Po dosažení napájecího napětí 3 V je ještě po dobu 150 ms procesor v resetu a až po uplynutí této doby je na pinu RESET nastavena logická jednička a procesor je spuštěn.

Během resetu procesoru je přes diodu D9 hradlo tranzistoru T11 uzemněno a přes otevřené diody D8 a D11 veden signál, který zablokuje přenos signálu PWM z procesoru do výkonových budičů. Jakmile je na resetovacím pinu procesoru napětí 3,3 V a program je spuštěn, začne se přes odpor R36 nabíjet kondenzátor C65. Za určitý čas dosáhne napětí kondenzátoru prahového napětí tranzistoru T11, ten se otevře a budič IC8 se tímto odblokuje. Tímto způsobem je zabráněno nechtěnému sepnutí výkonových tranzistorů, které by mohlo nastat při inicializaci procesoru, která nastává bezprostředně po resetu procesoru.

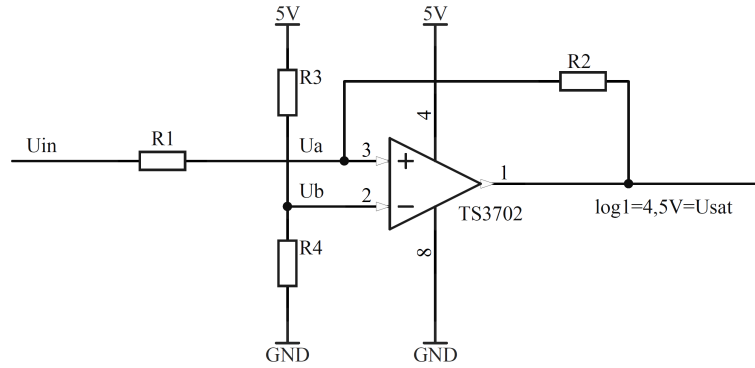
### Ochrana při nadproudu motorem:

Je realizována pomocí komparátoru s hysterezí, který je zapojen dle schématu na obrázku 2.6. K tomuto obrázku se pro přehlednost vztahují výpočty hodnot součástek uvedené níže. Na schématickém listu 2. v příloze C lze zde potom uvedené ilustrační schéma porovnat s reálným zapojením. Nadproudová ochrana je zde tvořena obvodem IC9A. Logická jednička na výstupu komparátoru odpovídá stavu, kdy je detekován nadproud a výstupní napětí komparátoru má velikost  $U_{sat} = 4,5 \text{ V}$ . Pokud dojde k vybavení ochrany, je výstupní signál veden přes diodu D7 a pomocí budiče IC8 dojde k zablokování signálů pro tranzistory snižujícího měniče. Zajistíme tak, že z meziobvodu nemůže měnič odebírat proud. Výstup komparátoru je také veden do procesoru, kde může být vybavení nadproudové ochrany zohledněno. Vstupní napětí  $U_{in} = U_{zap}$ , které uvede výstup z nuly do logické jedničky je dáno vztahem:

$$U_{zap} = U_b \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.73)$$

a pro překlopení výstupu zpět do nuly je nutné vstupní napětí snížit na hodnotu:

$$U_{vyp} = U_b \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (2.74)$$



Obr. 2.6: Schéma komparátoru s hysterezí

Dosazením rovnice 2.73 do 2.74 dostaneme vztah pro výpočet  $R_2$ :

$$R_2 = R_1 \frac{U_{sat}}{U_{zap} - U_{vyp}} \quad (2.75)$$

K překlopení výstupu operačního zesilovače dochází pokud platí  $U_b = U_a$  dosazením tohoto vztahu do rovnice 2.73 dostáváme vztah pro potřebné napětí  $U_b$ :

$$U_b = U_{zap} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.76)$$

Bylo zvoleno, že nadproudová ochrana má vybavit při proudu bočníkem 38 A kterému odpovídá vstupní napětí komparátoru  $U_{in} = U_{zap} = 3,8$  V a při proudu 33 A, který odpovídá napětí  $U_{in} = U_{vyp} = 3,3$  V, se výstup komparátoru překlopí zpět do logické nuly. Zvolíme  $R_1 = 4,7$  k $\Omega$  a vypočteme  $R_2$  dle rovnice 2.75:

$$R_2 = 4,7 \cdot \frac{4,5}{3,8 - 3,3} = 42,3 \text{ k}\Omega \quad (2.77)$$

zvolíme tedy odpor 42 k $\Omega$ . Dosazením do rovnice 2.76 dostáváme napětí  $U_b$ :

$$U_b = U_{zap} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3,8 \cdot \frac{42,3 \text{ k}\Omega}{4,7 \text{ k}\Omega + 42,3 \text{ k}\Omega} = 3,42 \text{ V} \quad (2.78)$$

Napětí  $U_b$  je dáno děličem tvořeným rezistory  $R_3$  a  $R_4$ . Zvolíme proud děličem  $I_{R_3, R_4} = 0,5$  mA. Potom platí:

$$(R_3 + R_4) = \frac{5 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (2.79)$$

Velikost rezistoru  $R_4$  určíme dle rovnice:

$$R_4 = (R_3 + R_4) \cdot \frac{U_b}{U_{cc}} = 10 \text{ k}\Omega \cdot \frac{3,42}{5} = 6,84 \text{ k}\Omega \quad (2.80)$$

a velikost  $R_3$ :

$$R_3 = (R_3 + R_4) - R_4 = 10 \text{ k}\Omega - 6,84 \text{ k}\Omega = 3,16 \text{ k}\Omega \quad (2.81)$$

Byly zvoleny rezistory  $R_4 = 6,8 \text{ k}\Omega$  a  $R_3 = 3,1 \text{ k}\Omega$

### Ochrana při přepětí na motoru

Je tvořena komparátorem IC9B. Pokud dojde k vybavení ochrany, je výstupní signál veden přes diodu D10 a pomocí budiče IC8 dojde k zablokování signálů pro tranzistory zvyšujícího měniče. Výstup komparátoru je také veden do procesoru, kde může být vybavení ochrany zohledněno. Výpočet provedeme analogicky s výpočtem proudové ochrany a vyjdeme tedy opět ze schématu na obrázku 2.6. Napětí motoru je upraveno děličem  $R_{54}$  a  $R_{58}$  s převodem  $k_{um} = 0,0487$  a přivedeno na neinvertující pin komparátoru. Na základě Theveninovy věty můžeme dělič přepočítat na odpor  $R_1$  (zakreslen na obrázku 2.6), který má velikost:

$$R_1 = \frac{R_{54} \cdot R_{58}}{R_{54} + R_{58}} = \frac{43 \text{ k}\Omega \cdot 2,2 \text{ k}\Omega}{43 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = 2,1 \text{ k}\Omega \quad (2.82)$$

Požadujeme vybavení napěťové ochrany při napětí na motoru 70 V a vypnutí ochrany při napětí 65 V. Napětí  $U_{in} = U_{zap}$  při kterém dojde k vybavení napěťové ochrany má tedy velikost  $U_{zap} = k_{um} \cdot 70 \text{ V} = 3,4 \text{ V}$  a vypínací napětí  $U_{vyp} = k_{um} \cdot 65 \text{ V} = 3,17 \text{ V}$ . Dosazením do vztahů 2.75 až 2.76 dostáváme hodnoty odporů:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_{sat}}{U_{zap} - U_{vyp}} = 2,1 \text{ k}\Omega \cdot \frac{4,5}{3,4 - 3,17} = 41 \text{ k}\Omega \quad (2.83)$$

zvolíme tedy odpor 41 kΩ. Dosazením do rovnice 2.76 dostáváme napětí  $U_b$ :

$$U_b = U_{zap} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3,4 \cdot \frac{41 \text{ k}\Omega}{2,1 \text{ k}\Omega + 41 \text{ k}\Omega} = 3,23 \text{ V} \quad (2.84)$$

Napětí  $U_b$  je dáno děličem tvořeným rezistory  $R_3$  a  $R_4$ . Zvolíme proud děličem  $I_{3,4} = 0,5 \text{ mA}$ . Potom platí:

$$(R_3 + R_4) = \frac{5 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (2.85)$$

Velikost rezistoru  $R_4$  určíme dle rovnice:

$$R_4 = (R_3 + R_4) \cdot \frac{U_b}{U_{cc}} = 10 \text{ k}\Omega \cdot \frac{3,23}{5} = 6,46 \text{ k}\Omega \quad (2.86)$$

a velikost  $R_3$ :

$$R_3 = (R_3 + R_4) - R_4 = 10 \text{ k}\Omega - 6,46 \text{ k}\Omega = 3,54 \text{ k}\Omega \quad (2.87)$$

Byly zvoleny rezistory  $R_4 = 6,2 \text{ k}\Omega$  a  $R_3 = 3,3 \text{ k}\Omega$

### Ostatní pomocné obvody

Signál otáček generátoru je získán z napětí měřeného na jedné fázi generátoru proti zemi řídicí elektroniky. Perioda signálu tedy odpovídá době jedné elektrické

otáčky generátoru. Signál je zpracován tvarovačem tvořeným prvky D13, ZD8 R53 a R57.

Řídicí signál pro servo je generován PWM modulem procesoru a zesílen na napěťovou úroveň 5 V tranzistorem T12. Signál má mít dle specifikací výrobce periodu 20 ms a šířka pulsu, která udává výchylku serva, je v rozsahu 0,8 ms až 2,2 ms.

Signál z rukojeti plynu je v rozsahu 0,87 - 4,28 V a obvody rukojeti jsou napájeny napětím 5 V. Napětí je proto zpracováno děličem tvořeným rezistory R49 a R50. Převod děliče je 0,6 a vstupnímu napětí 5 V tedy odpovídá napětí na výstupu 3 V.

Napětí meziobvodu je snímáno děličem tvořeným rezistory R51 a R56 s převodem 3/61,6. Vstupnímu napětí 61,6 V tedy odpovídá napětí na výstupu 3 V. Pro případ přepětí je analogový vstup procesoru chráněn Zenerovou diodou ZD9.

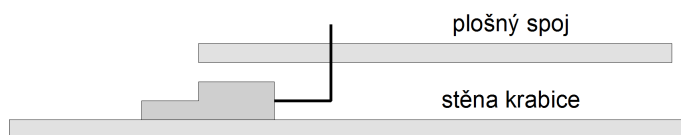
## 2.4 Návrh plošného spoje a chladiče

Plošný spoj byl navržen v software Altium Designer 17.1. Osazovací plán a strany spojů TOP a BOT jsou uvedeny v přílohách F, D, E.

- Plošný spoj je ke stěně krabice přichycen pomocí šesti distančních sloupků.
- Při návrhu byl kladen důraz zejména na potlačení parazitní indukčnosti u jednotlivých výkonových spínačů.
- Toroidní tlumivka L1 byla šrouby přitažena k plošnému spoji.
- Ovládací servo plynu bylo umístěno přímo v desce plošných spojů a připevněno pomocí distančních sloupků.
- Vzhledem k relativně vysokému proudovému namáhání byla pro výrobu zvolena tloušťka mědi 120  $\mu\text{m}$ .

### Chlazení výkonových tranzistorů

Umístění výkonových tranzistorů je schématicky zakresleno na obrázku 2.7. Chladící ploška každého tranzistoru je spojena s elektrodou drain a jednotlivé chladiče se tedy od hliníkové krabice musí elektricky izolovat. Tranzistory jsou proto uchyceny ke dnu krabice pomocí šroubů s izolačními podložkami a přes teplovodivou podložku, která zajistí elektrickou izolaci a dobrou tepelnou vodivost.



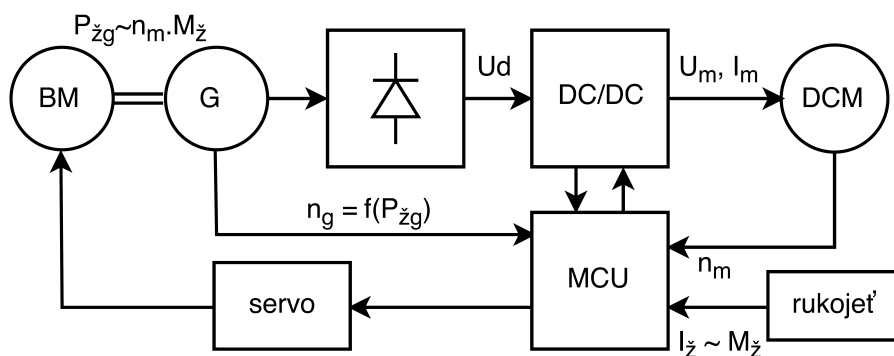
Obr. 2.7: Schématický nákres umístění tranzistoru

### 3 FIRMWARE MĚNIČE

Pro vývoj firmware bylo použito vývojové prostředí Codewarrior (Freescale) a ke snadné konfiguraci periférií procesoru byl použit nástroj Quick Start [2]. Tento nástroj obsahuje odladěné ovladače periférií, pomocí kterých je možné snadno vytvářet konkrétní uživatelskou aplikaci v programovacím jazyce C. Dalším nástrojem používaným při vývoji byl Graphical Configuration Tool, který umožňuje snadnou inicializaci periférií pomocí grafického rozhraní. K nahrávání firmware do procesoru byl použit programátor USB-TAP. Při výběru verze vývojového prostředí však bylo zjištěno, že pro aktuální verzi Codewarrior (11.0) a procesor MC56F8257 není dostupný nástroj Quick Start. Autor měl dále zkušenosti již z bakalářské práce se značnou nespolehlivostí nového vývojového prostředí a častými problémy při připojování programátoru USB-TAP. Z těchto důvodů byla k vývoji firmware použita starší, ale dostačující a spolehlivá verze Codewarrior 5.9.0. Aby byla zajištěna správná funkčnost a přenositelnost vývojového prostředí, bylo provozováno pomocí virtualizačního programu VirtualBox na operačním systému Windows XP. Zdrojová data pro spuštění Windows XP v programu VirtualBox jsou umístěna na příloženém CD diplomové práce.

#### 3.1 Blokové schéma pohonu

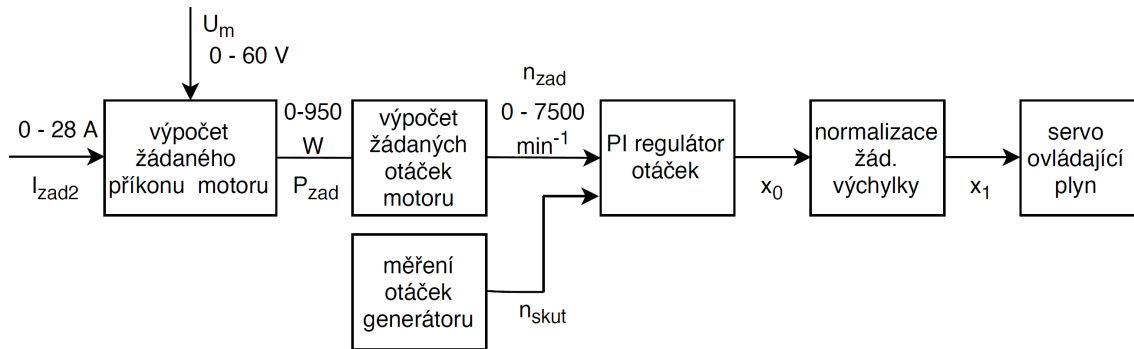
Před popisem návrhu firmware bude nejprve pomocí blokového schématu na obrázku 3.1 znázorněna celková elektromechanická koncepce pohonu elektrokola. Význam jednotlivých bloků je následující. Spalovací motor (*BM*) je hřídelí spojen s generátorem (*G*), trojfázový proud z generátoru je následně usměrněn šestipulsním usměrňovačem a veden do DC/DC měniče, který napájí hnací motor elektrokola (*DCM*). Měnič je řízen digitálním signálovým procesorem MC56F8257 (*MCU*).



Obr. 3.1: Diagram řízení pohonu

Řídicí algoritmus obsahuje dvě regulační smyčky. Otáčkovou, která reguluje otáčky spalovacího motoru v závislosti na žádaném příkonu stejnosměrného motoru. Akčním zásahem otáčkového regulátoru je výchylka serva, které ovládá škrtící klapku spalovacího motoru. Dále algoritmus obsahuje proudovou regulační smyčku, která reguluje proud kotvou motoru. Žádaný proud motorem potom nastavuje jezdec pomocí rukojeti plynu na říditkách. Akčním členem je DC/DC měnič, který může pracovat ve snižujícím i zvyšujícím režimu.

### 3.2 Otáčková regulační smyčka



Obr. 3.2: Regulační schéma otáčkové smyčky

Regulační schéma otáčkové smyčky je na obrázku 3.2. Nejprve je na základě známého napětí na motoru  $U_m$  a žádaného proudu motorem  $I_{zad2}$  dle rovnice 3.1 vypočten žádaný příkon stejnosměrného motoru  $P_{zad}$ :

$$P_{zad} = I_{zad2}^2 \cdot R_a + U_m \cdot I_{zad2} \quad (3.1)$$

Kde:  $R_a = 0,24 \Omega$  je odpor kotvy motoru. Z vypočteného žádaného výkonu jsou potom vypočteny žádané otáčky spalovacího motoru pomocí dříve stanovené funkce 1.3:

$$n_{zad} = 5400 \cdot P_{zad} + 1600 \quad [1/\text{min}; \text{kW}] \quad (3.2)$$

Skutečné otáčky motoru  $n_{skut}$  jsou měřeny pomocí čítače. Proti zemi elektroniky je měřena perioda fázového napětí, které je upraveno tvarovačem (příloha C, list 2, sektor D3). Čítač mezi dvěma náběžnými hranami tohoto signálu počítá náběžné hrany hodinového signálu o frekvenci 1,875 MHz. Motor má 7 pólů tedy vztah mezi hodnotou načítaných impulsů  $x$  a mechanickými otáčkami  $n_{skut}$  je:

$$n_{skut} = \frac{60 \cdot 1,875 \cdot 10^6}{x \cdot p} = \frac{60 \cdot 1,875 \cdot 10^6}{x \cdot 7} \quad [1/\text{min}] \quad (3.3)$$

Otáčkový regulátor je typu PI a byl implementován z knihovny GFLIB určené pro rodinu signálových procesorů NXP s jádrem 56800E. Byla použita funkce GFLIB\_ControllerPIDp [1]. Implementovaný regulátor popisuje přírůstková rovnice 3.4. (V přírůstkové rovnici je záměrně vynechána derivační složka, která nebyla v průběhu nastavování regulátoru použita.):

$$s(k) = K_r \cdot e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) = K_r \cdot e(k) + s(k-1) + K_i \cdot e(k) \quad (3.4)$$

Kde:  $s(k)$  je akční zásah,  $e(k)$  je regulační odchylka,  $K_r$  je proporcionální zesílení,  $T_I$  je integrační časová konstanta,  $T$  je vzorkovací perioda regulátoru,  $K_i = \frac{T}{T_I}$  integrální zesílení regulátoru,  $s(k-1)$  akční zásah regulátoru vypočtený v předchozím kroku. Vzorkovací perioda regulátoru má velikost  $T = 0,4$  ms.

Vzhledem k tomu, že spalovací motor jako regulovaná soustava vykazuje výrazně nelineární chování, byly parametry regulátoru stanoveny experimentálně tak, aby regulační smyčka pracovala spolehlivě ve všech pracovních režimech. Regulátor byl nastaven dle následujícího postupu. 1. byly nastaveny žádané otáčky 4000 ot/min a integrální složka byla vyřazena. 2. proporcionální zesílení bylo zvyšováno až do okamžiku rozkmitání regulovaných otáček, poté bylo sníženo na poloviční hodnotu. 3. integrační zesílení bylo zvyšováno až do okamžiku rozkmitání regulovaných otáček a následně bylo sníženo třikrát. Takto nastavený regulátor byl dále experimentálně dostaven. Výsledné nastavení regulátoru po testování při reálném provozu elektrokola je:  $K_i = 2$ ,  $K_r = 2$ . Příslušné přechodové charakteristiky byly změřeny pomocí nástroje Freemaster a jsou uvedeny v kapitole 5.

### 3.3 Proudová regulační smyčka

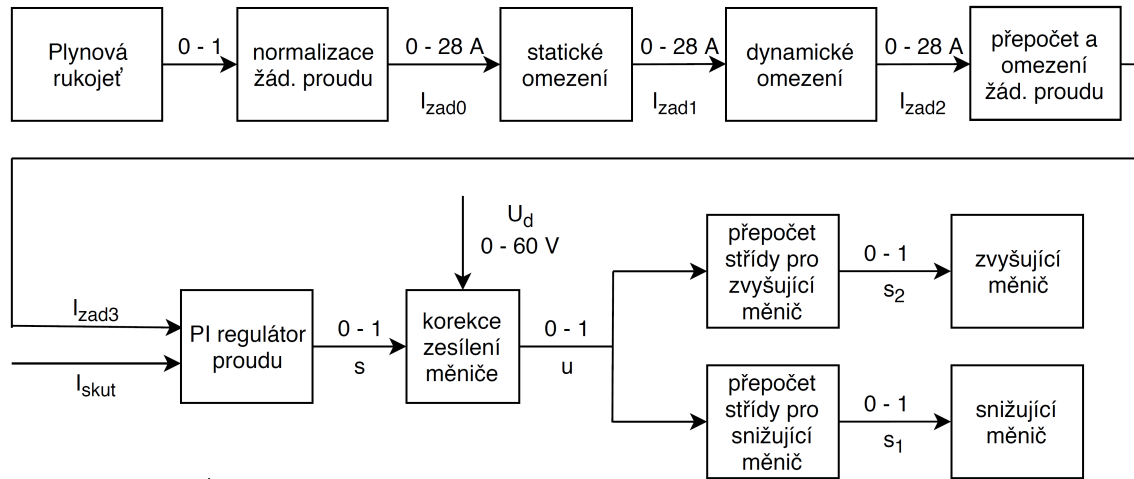
V následujícím textu je popsáno blokové schéma regulačního algoritmu proudové smyčky, které je zakresleno na obrázku 3.3. Signál z rukojeti plynu je vzorkován AD převodníkem a v procesoru normován na rozsah žádaného proudu  $I_{zad0}$ , který nabývá hodnot 0–28 A.

Následně je provedeno statické omezení proudu. Maximální velikost žádaného proudu je dána v závislosti na aktuální rychlosti elektrokola (velikosti indukovaného napětí na motoru). Stanovení této závislosti bylo provedeno v kapitole 1.4.1. Graficky je potom maximální žádaný proud v závislosti na rychlosti elektrokola vynesena na obrázku 1.3 (zeleně). Pokud je žádaný proud při určité rychlosti větší, je omezen na velikost, která je dána právě touto závislostí.

Dále je provedeno dynamické omezení žádaného proudu. Při nárůstu žádaného proudu je jeho strmost omezena na  $7,5 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pokles žádané hodnoty proudu se přenáší přes dynamické omezení okamžitě. Konkrétní hodnota strmosti proudu



byla stanovena experimentálně při jízdách testech. Pomocí omezení nárůstu žádaného proudu je zajištěno, že otáčky spalovacího motoru jsou otáčkovým regulátorem nastaveny v předstihu a předejde se tak případnému „zadušení“ motoru. Regulovaná veličina regulační smyčky proudu je měřený proud bočnickem měniče.



Obr. 3.3: Diagram regulace proudu

Pokud je v provozu snižující měnič, je proud bočnickem roven proudu motorem. Pokud je ale v provozu zvyšující měnič, je třeba žádanou hodnotu proudu motorem přepočíst v závislosti na aktuální střídě na proud bočnickem. Tento přepoččet realizuje další blok „přepoččet a omezení žád. proudu“. Hodnota žádaného proudu motorem po dynamickém omezení  $I_{zad2}$  je v závislosti na režimu měniče přepočtena na žádaný proud bočnickem  $I_{zad3}$ . Pokud je v činnosti snižující měnič platí, že  $I_{zad3} = I_{zad2}$  a v případě činnosti zvyšujícího měniče  $I_{zad3} = \frac{I_{zad2}}{1-s_2}$ , kde:  $s_2$  je střída zvyšujícího měniče. Takto přepočtený proud je potom omezen na maximální hodnotu 28 A. Pomocí tohoto přepočtu tedy jezdec vždy nastavuje žádanou hodnotu proudu motorem (momentu).

V signálové cestě následuje PI regulátor proudu, který je realizován pomocí stejné funkce jako výše popsaný otáčkový regulátor. Pracuje tedy podle rovnice:

$$s(k) = K_r \cdot e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) \quad (3.5)$$

Kde:  $K_r$  je proporcionalní zesílení,  $K_i$  integrální zesílení a  $e(k)$  je regulační odchylka.

Akční zásah regulátoru je normován tak, aby bylo dosaženo nezávislosti zesílení měniče na napájecím napětí. Přechodová charakteristika proudového regulátoru je potom kvalitativně stejná v celém rozsahu napájecího napětí. Korekce zesílení měniče je provedena dle vztahu:

$$u(k) = s(k) \cdot \frac{U_{d,min}}{U_d} = s(k) \cdot \frac{10}{U_d} \quad (3.6)$$

Kde:  $U_{d,min}$  je zvolené minimální napětí na meziobvodu,  $U_d$  je aktuální měřené napětí meziobvodu a  $s(k) \in \langle 0 - 1 \rangle$  je akční zásah regulátoru.

Signál  $u \in \langle 0 - 1 \rangle$  je potom veden do PWM modulátorů snižujícího a zvyšujícího měniče přes přepočtové bloky střídavy. Zde je proveden přepočet signálu  $u$  tak, aby platila přímá úměra mezi střídou  $u$  a výstupním napětím měniče ve smyslu rovnice:

$$U_m = K_u \cdot U_d \cdot u = 5 \cdot U_d \cdot u \quad (3.7)$$

Kde:  $U_m$  je napětí na motoru,  $U_d$  je napětí meziobvodu a  $K_u$  je zesílení měniče. To bylo zvoleno tak, aby už při minimálním napětí  $U_{d,min} = 12$  V bylo možno dosáhnout výstupního napětí měniče  $U_m = 60$  V. Maximální střída zvyšujícího měniče je tedy dána vztahem:

$$s_{2,max} = 1 - \frac{1}{K_{max}} = 1 - \frac{1}{5} = 0,8 \quad (3.8)$$

Pokud je signál  $u$  v intervalu  $\langle 0 - 0,2 \rangle$ , je v provozu snižující měnič, jehož vstupní střída je vypočtena dle rovnice:  $s_1 = 5 \cdot u$ ;  $s_1 \in \langle 0 - 1 \rangle$ . Přenos snižujícího měniče je lineární a má velikost  $K_{u1} = 5 \cdot U_d \cdot u$ ;  $u \in \langle 0 - 0,2 \rangle$ .

Pokud je signál  $u$  v intervalu  $\langle 0,2 - 1 \rangle$  je v provozu zvyšující měnič jehož napěťový přenos je nelineární a určuje jej rovnice:

$$K_{s2} = \frac{1}{1 - s_2} \quad (3.9)$$

Z hlediska regulace je tato nelinearita nevýhodná a proto byl přenos měniče linearizován pomocí inverzní funkce přenosu. Střída  $u \in \langle 0,2 - 1 \rangle$  je tedy přepočtena pomocí linearizační funkce:

$$s_2 = 1 - \frac{1}{5 \cdot u} \quad (3.10)$$

Po provedení linearizace platí, že přenos zvyšujícího měniče  $K_{u2} = 5 \cdot U_d \cdot u$ ;  $u \in \langle 0,2 - 1 \rangle$ . Pro účely regulace tedy můžeme zapsat přenosovou funkci měniče, která bude zahrnovat i korekci zesílení měniče jako:

$$F_u(p) = \frac{U_m}{s} = \frac{U_{d,min}}{U_d} \cdot \frac{5 \cdot U_d}{1 + p \cdot \tau_u} = \frac{50}{1 + p \cdot 40 \cdot 10^{-6}} \quad (3.11)$$

Kde:  $\tau_u$  je časová konstanta charakterizující dynamické vlastnosti měniče. Firmware nastavuje vypočtený akční zásah vždy se zpožděním  $40\mu s$ . Toto dopravní zpoždění bylo tedy aproximováno dynamickým systémem prvního řádu s časovou konstantou  $\tau_u = 40 \mu s$ . Přenos měniče je z regulačního hlediska velmi výhodný, protože nijak nezávisí na velikosti napájecího napětí, které se pohybuje v rozsahu 12-60 V.

### Nastavení parametrů regulátoru

Prvotní nastavení konstant regulátoru bylo provedeno pomocí metody optimálního modulu. Přenos regulované soustavy  $F_s(p)$  (měniče s LC filtrem) je přibližně dán rovnicí 3.12:

$$F_s(p) = \frac{K_a}{1 + p \cdot \tau_a} \cdot \frac{K_u}{1 + p \cdot \tau_u} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + p \cdot \frac{L_L}{R_a}} \cdot \frac{50}{1 + p \cdot 40 \cdot 10^{-6}} \quad (3.12)$$

Kde:  $K_a$  je statické zesílení motoru,  $\tau_a$  je časová konstanta,  $K_u$  je statické zesílení měniče a  $\tau_u$  je časová konstanta měniče. Dynamické vlastnosti motoru byly zanedbány.

Dle metody optimálního modulu za předpokladu, že  $\tau_a = \tau_\sigma$  je potom přenos PI regulátoru:

$$F_r(p) = \frac{1}{F_s(p)} \cdot \frac{1}{2p\tau_\sigma(1 + p\tau_\sigma)} = \frac{(1 + \tau_a) \cdot R_a}{2p\tau_a K_u} = K_r + \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{T_I} \quad (3.13)$$

Odkud po dosazení hodnot z tabulky 1.4 dostaneme:

$$K_r = \frac{L_L}{2 \cdot \tau_u \cdot K_u} = \frac{35 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 8,75 \cdot 10^{-3} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{T_I} = \frac{R_a}{2 \cdot \tau_u \cdot K_u} = \frac{0,24}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 60 \quad (3.15)$$

a po dosazení do rovnice 3.4 dostáváme tvar vhodný pro implementaci:

$$s(k) = K_r \cdot e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) = 8,75 \cdot 10^{-3} \cdot e(k) + 2,4 \cdot 10^{-3} \sum_{i=0}^k e(i) \quad (3.16)$$

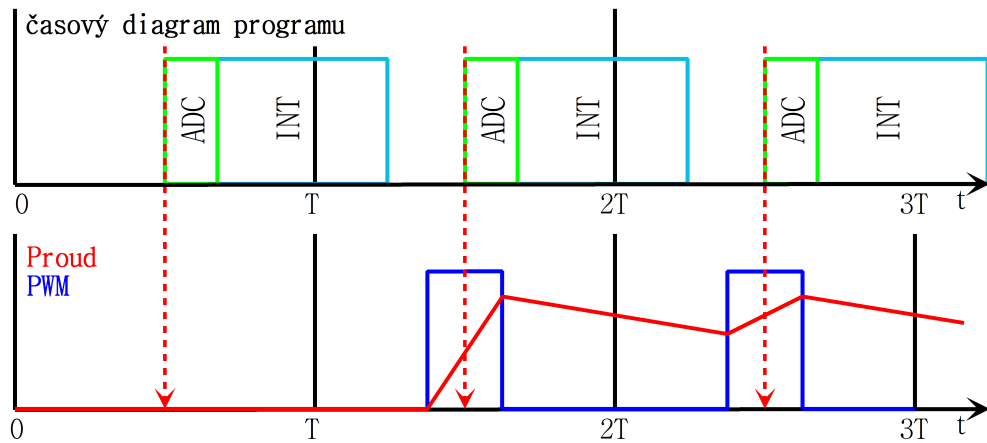
Kde:  $T = 40\mu\text{s}$  je vzorkovací perioda regulátoru. Přejížděvací charakteristika byla ověřena měřením a nastavení ponecháno jako vyhovující.

## 3.4 Zdrojový kód

Výše popsaný algoritmus byl naprogramován v jazyce C a pro práci se spojitými signály byly s výhodou použity proměnné vyjádřené pomocí zlomkové aritmetiky. Pro výpočty jsou potom použity speciální instrukce, které umožní optimálnější implementaci výpočtů v reálném čase než např. u procesorů s aritmetikou celočíselnou. Kompletní zdrojové kódy jsou umístěny na přiloženém CD.

Program byl rozdělen do následujících zdrojových souborů:

`main.c` – obsahuje inicializační funkce periférii, nekonečnou smyčku programu a rutinu přerušení (INT). V nekonečné smyčce programu je pouze vyhodnocena tepelná pojistka motoru a v případě jejího vybavení dojde k deaktivaci výkonové části



Obr. 3.4: Časový diagram programu

měníče. V rutině přerušení potom dochází k výpočtu obou regulátorů a ostatních pomocných výpočtů. Perioda přerušení je  $T = 40 \mu\text{s}$  a časový diagram běhu programu je zakreslen na obrázku 3.4. Pro řízení měniče je použita středově symetrická PWM. Vzorkování proudu bočnickem je potom synchronizováno se signálem PWM tak, aby byl vzorek proudu naměřen vždy v polovině periody modulačního signálu, kdy se tlumivka magnetizuje a na tranzistorech nedochází k přechodovým jevům. Tímto způsobem je také jednoduše docíleno filtrace zvlnění proudu tlumivkou a regulátor tak přirozeně pracuje se střední hodnotou proudu.

AD převodník je nakonfigurován pomocí XBAR (interní programovatelné propojení periférií [3]) tak, aby vždy uprostřed periody PWM signálu došlo ke spuštění měření. Jakmile je měření dokončeno, procesor vyvolá přerušení (INT), jehož obslužná rutina je umístěna v `main.c`.

`user_fce.c` – obsahuje funkce realizující pomocné výpočty pro regulaci proudu a otáček. Výčet funkcí je následující:

- `ServoNorm` – Převod akčního zásahu regulátoru otáček na střídu ovládající servo škrticí klapky plynu.
- `StaticLimit` – Realizuje statické omezení žádaného proudu motorem.
- `PlynNorm` – Normuje změřený napěťový signál z rukojeti plynu na signál v rozsahu  $\langle 0-1 \rangle$ , který odpovídá plné mechanické výchylce rukojeti. Provede filtraci měřeného signálu filtrem prvního řádu.
- `PowerToSpeed` – Převede žádaný výkon na žádané otáčky generátoru pro regulátor otáček.
- `GetSpeed` – Pomocí aktuálního stavu čítače dopočítá otáčky generátoru. Provede filtraci měřeného signálu filtrem prvního řádu.
- `DC_BUS_filter` – Provede filtraci měřeného vstupního napětí měniče filtrem prvního řádu.

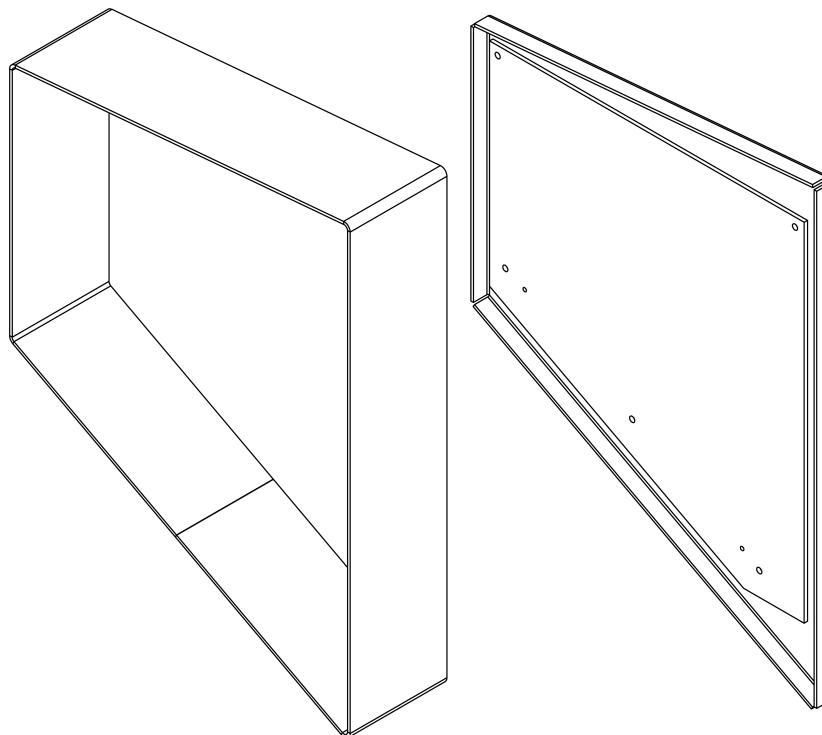
- `setGFLIBControllerPIp` – Převede parametry regulátoru definované v plo-  
voucí řádové čárce na číselný formát, který vyžaduje knihovní funkce pro vý-  
počet regulátoru `GFLIB_ControllerPIDp` [1].

`main.h` – hlavičkový soubor

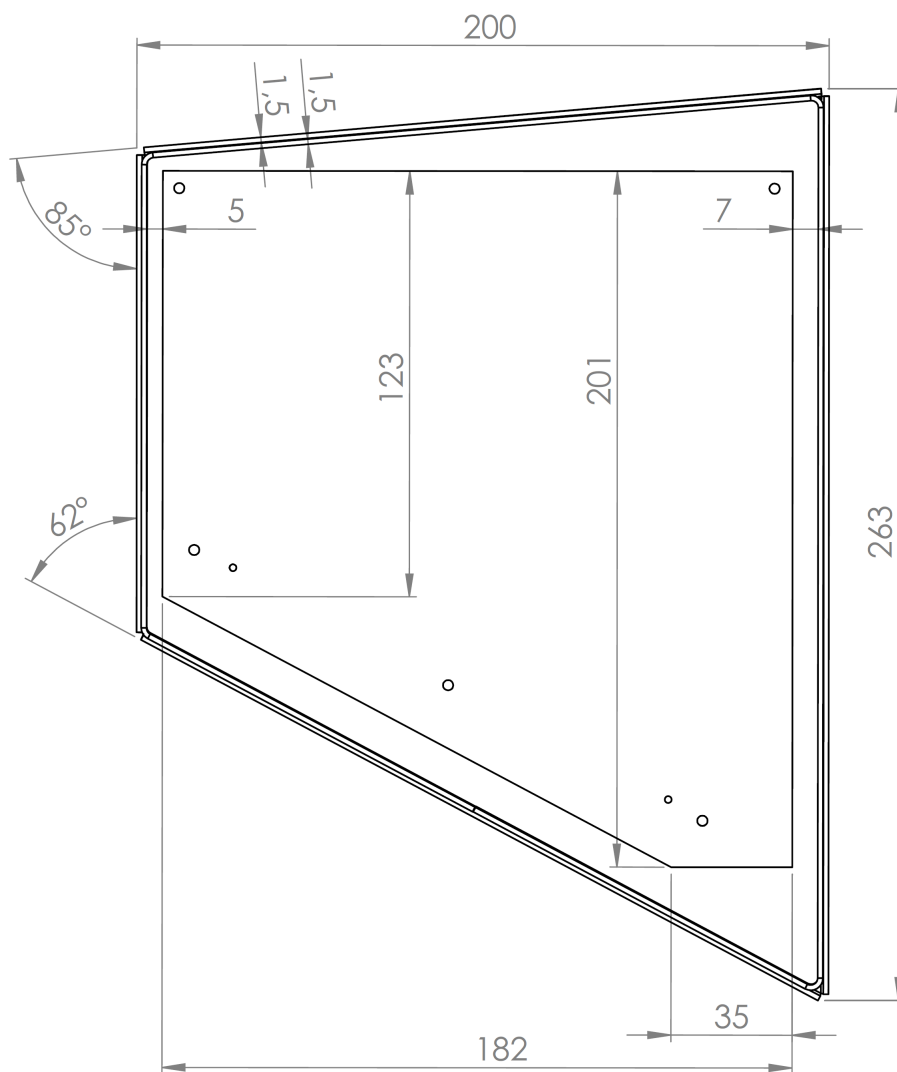
`user_fce.h` – hlavičkový soubor

## 4 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Měníč a ovládací servo plynů byly umístěny do společné plechové krabice, jejíž rozměry byly zvoleny tak, aby kopírovaly vnitřní prostor rámu kola. Využijeme tak efektivně tento volný prostor a docílíme dobrého estetického dojmu. Tělo krabice je tvořeno plechovým pásem o tloušťce 1,5 mm, který je k rámu kola upevněn pomocí objímek. Objímky jsou tvořeny z důvodu snadné montáže závitovou tyčí M4. Na základní pás plechu jsou potom samořeznými šrouby připevněna dvě čela, která uzavírají prostor krabice. Zadní čelo je neodnímatelné a je na něm umístěna pomocí distančních sloupků deska plošných spojů a chladiče výkonových tranzistorů. Druhé čelo je také připevněno šrouby a v případě potřeby je možné jej sejmout. Prostorový náčrtek krabice je na obrázku 4.1. a rozměry krabice a do ní vložené desky plošného spoje jsou zakótovány v náčrtku na obrázku 4.2. Krabice byla vyrobena autorem z hliníkového plechu o tloušťce 1,5 mm a povrchová úprava byla provedena ve specializované firmě nanesením práškového laku, tzv. komaxitu. Vodiče byly vyvedeny gumovými kabelovými průchodkami a bowden byl vyveden průchodkou speciální. Níže uvedený náčrtek je pouze ilustrativní a nezahrnuje proto konkrétní řešení výše popsaných objímek a vývodek. Finální řešení krabice je potom zachyceno na fotografiích v příloze H.



Obr. 4.1: Náčrtek těla a jednoho víka krabice

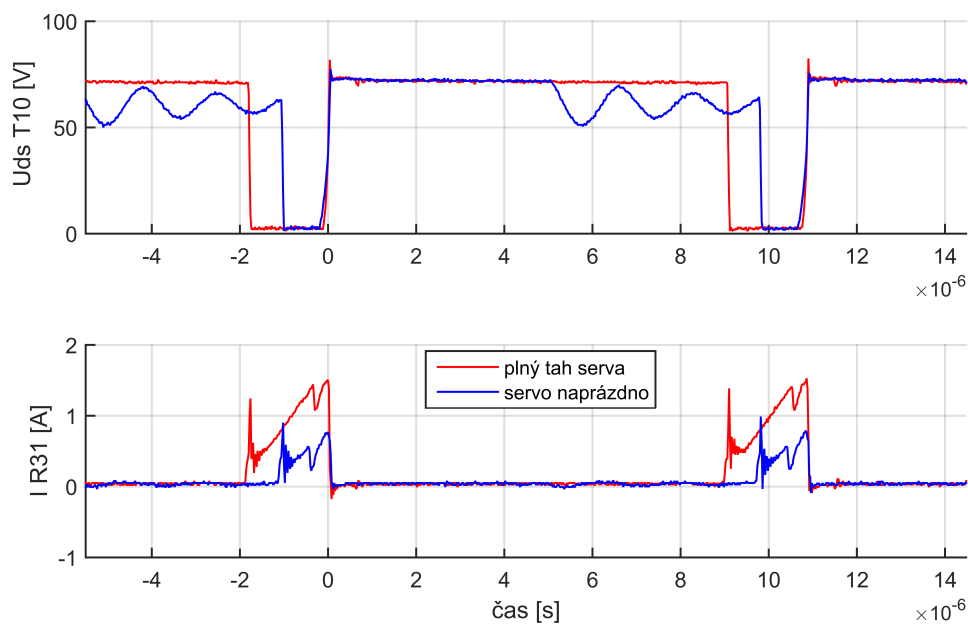


Obr. 4.2: Náčrtek krabice

## 5 MĚŘENÍ

### Měření na blokujícím měniči

Na obrázku 5.1 je zobrazeno napětí a proud drainem spínacího tranzistoru T10 ve dvou provozních stavech měniče. Měření bylo provedeno osciloskopem pomocí napěťových sond s dělicím poměrem 1:10, kvůli potlačení vlivu vlastní kapacity sond. Toto nastavení sond platí i pro všechna další uvedená měření. Proud byl získán nepřímo pomocí měření úbytku napětí na rezistoru. Vstupní napětí měniče bylo v okamžiku měření nastaveno na hodnotu  $U_d = 60$  V. Modré časové průběhy byly změřeny při nečinném výkonovém měniči a servo ovládající škrtící klapku nebylo zatíženo.



Obr. 5.1: Provoz blokujícího měniče při vstupním napětí 60 V a různých zatíženích serva

V čase přibližně  $-1\mu\text{s}$  dojde k sepnutí tranzistoru. To se projeví poklesem napětí  $U_{ds}$  na hodnotu  $U_{dson} \doteq 0$ . Primární vinutí blokujícího měniče je tak připojeno napájecí napětí a proud vinutím lineárně narůstá až do okamžiku, kdy je dosaženo maximální hodnoty proudu ( $0\mu\text{s}$ ) a tranzistor se uzavře. Velikost maximální hodnoty proudu určuje jako svou akční veličinu PI regulátor integrovaný v obvodu UC3844. Regulovanou veličinou je napětí na kondenzátoru sekundárního usměrňovače.

Jakmile dojde k rozepnutí T10, napětí tranzistoru  $U_{ds}$  je dáno rovnicí 2.45 a jeho velikost je při napájecím napětí  $U_d = 60$ ,  $U_{CE,max} = 60 + 15 \cdot 0,77 = 72$  V. Z naměřených dat bylo potom odečteno, že reálné napětí je  $U_{CE,max} = 72,5$  V. Vzhledem



k tomu, že měnič není zatížen a ze sekundárního usměrňovače tedy vytéká jen malý pracovní proud, nepracuje měnič v režimu spojitého magnetického toku v jádře a v čase přibližně  $5\mu\text{s}$  dochází k zániku magnetického toku a tedy i sekundárního proudu. Sekundární usměrňovací dioda se uzavírá a vinutí se tak zcela odpojí od sekundárního kondenzátoru. Na primárním vinutí tedy již nepozorujeme součet napájecího napětí a transformovaného napětí sekundáru, ale pouze rezonanční kmity superponované na napájecím napětí  $U_d = 60\text{ V}$ .

Červené časové průběhy byly změřeny opět při nečinném výkonovém měniči, ale servo ovládající škrtkovací klapku bylo plně zatíženo. Pozorujeme podobný průběh s rozdílem, že transformátor již pracuje se spojitým magnetickým tokem. Na primárním napětí již nepozorujeme rezonanční zákmit, protože po celou dobu, kdy je tranzistor T10 uzavřen probíhá demagnetizace jádra.

Kritickým parametrem měniče je velikost překmitu na spínacím tranzistoru. Ten je způsoben součtem napájecího napětí a indukovaného napětí na rozptylové indukčnosti transformátoru v okamžiku uzavření spínacího tranzistoru. Jeho maximální přípustná velikost je dána závěrným napětím tranzistoru, které je  $150\text{ V}$ . Překmit byl potlačen pomocí RCD členu (C50, R25, D4) a v čase ( $0\mu\text{s}$ ), kdy k tomuto jevu dochází, si můžeme všimnout, že je prakticky zanedbatelný.

Při delším provozu blokujičho měniče nebylo sledováno zdatelné oteplení jádra transformátoru nebo spínacího tranzistoru. Testováím bylo ověřeno, že měnič pracuje spolehlivě od vstupního  $U_d = 10\text{ V}$  do  $U_d = 60\text{ V}$ .

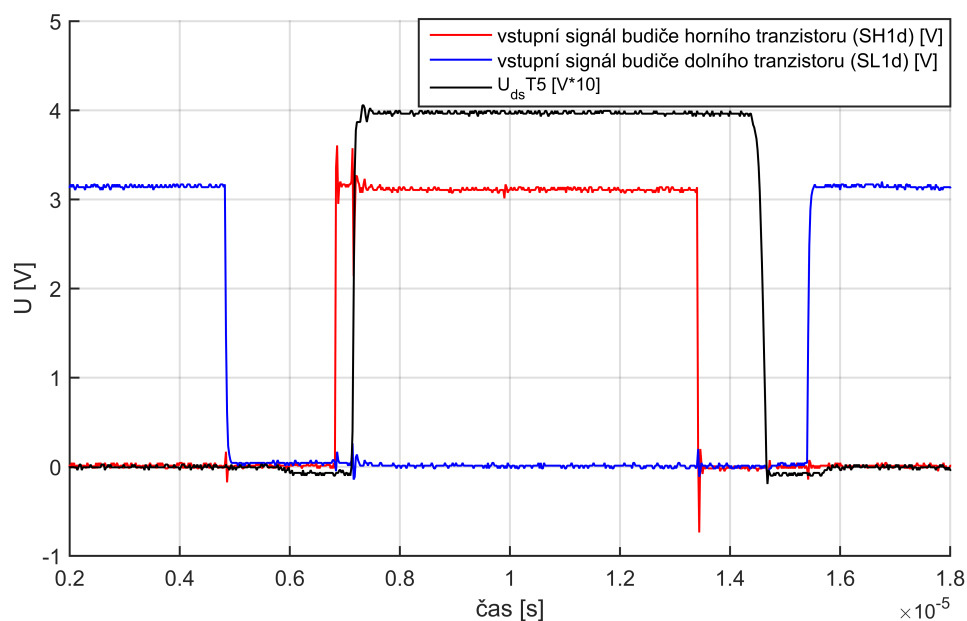
### **Budicí signály**

Na obrázku 5.2 jsou zachyceny budicí signály a větovvé napětí snižujícího měniče ( $U_{dsT6}$ ) při napájecí napětí  $U_d = 40\text{ V}$ . Budicí signály byly měřeny na vstupech obvodů IC2 a IC3 proti zemi (GND).

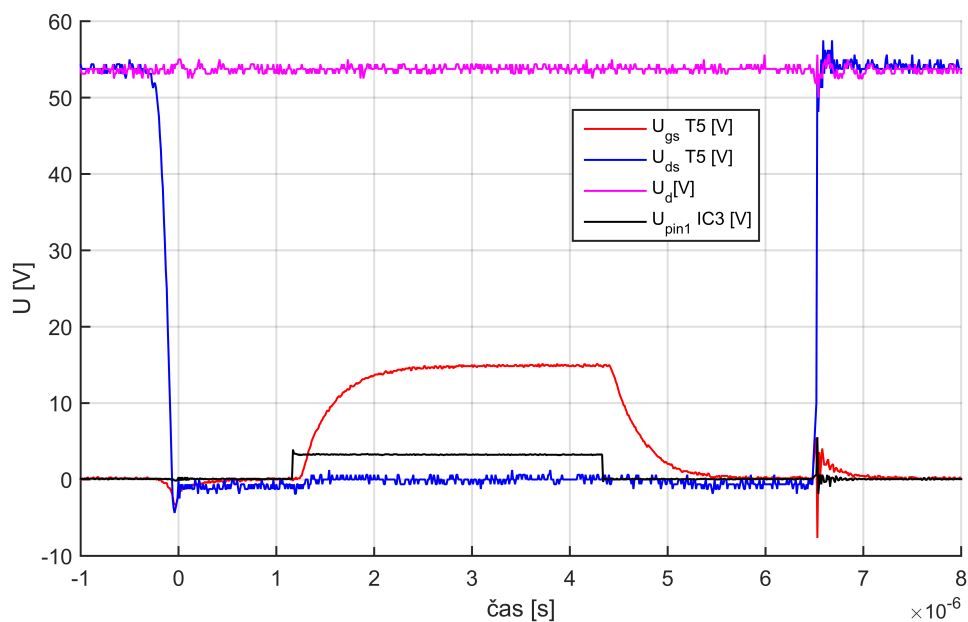
Z obrázku je patrný vložený deadtime  $2\mu\text{s}$  a prodleva sepnutí horního tranzistoru vlivem dopravního zpoždění budiče. V čase přibližně  $1,35\mu\text{s}$  klesá budicí signál horního tranzistoru na nulu a po uplynutí dopravního zpoždění budiče se horní tranzistor uzavírá. Bezprostředně na to začíná klesat proud tlumivkou. Napětí na tlumivce tedy mění polaritu, následkem čehož se otevírá vnitřní dioda tranzistoru T5(T6) a přebírá proud tlumivkou. Proto již během deadtime dochází k poklesu napětí  $U_{ds}$  na hodnotu blízkou nule. Po uplynutí deadtime se dioda zkratuje otevřením tranzistoru T5(T6) a sníží se tak vodivostní ztráty měniče. Z oscilogramu lze dále pozorovat časové úseky, kdy pracovní proud vedou pouze vnitřní diody tranzistorů. V tom případě nabývá napětí  $U_{ds}$  záporných hodnot.

### **Snižující měnič**

Na obrázku 5.3 jsou zachyceny časové průběhy související s činností dolního tranzistoru snižujícího měniče. Měření probíhalo při napájecím napětí  $U_d = 55\text{ V}$  a při maximálním proudu bočníkem  $28\text{ A}$ .



Obr. 5.2: Budící signály snižujícího měniče



Obr. 5.3: Měření na snižujícím měniči

Výkonové plošné spoje byly navrženy s ohledem na maximální potlačení parazitních indukčností, které způsobují napěťový překmit na tranzistorech. Na změřeném oscilogramu můžeme skutečně pozorovat, že jak na napájecím napětí (horním tran-

zistoru) tak na napětí  $U_{ds}$  (dolním tranzistoru) je překmit zanedbatelný a parazitní indukčnosti byly v návrhu potlačeny dostatečně.

V okamžiku přibližně ( $0\mu s$ ) se otevírá dioda dolního tranzistoru, což má za následek pokles napětí  $U_{ds}$  na hodnotu  $-0,7$  V. Následně je v čase přibližně ( $1,1\mu s$ ) nastaven budící signál dolního tranzistoru (černě). Po uplynutí dopravního zpoždění budiče začíná exponenciálně narůstat napětí  $U_{gs}$  (červeně). Otevírá se dolní tranzistor, jeho vnitřní dioda se tak zkratuje a úbytek na něm klesá přibližně na 0 V. V čase přibližně ( $4,2\mu s$ ) budící signál klesá k nule, napětí  $U_{gs}$  exponenciálně klesne k nule, tranzistor se uzavírá a proud převezme opět vnitřní dioda. V čase přibližně ( $6,5\mu s$ ) sepne horní tranzistor, napětí  $U_{ds} = U_d$ . V tomto okamžiku můžeme pozorovat rušivé napětí, které se objevuje na budícím signálu i napětí  $U_{gs}$ . Vzhledem k tomu, že měření probíhalo při maximálním proudu a toto rušení nijak neovlivňuje napětí  $U_{ds}$  považujeme jej za zanedbatelné, případně fiktivní rušení způsobené parazitní indukčností měřících sond.

### Zvyšující měnič

Na obrázku 5.3 jsou zachyceny časové průběhy související s činností dolního tranzistoru zvyšujícího měniče. Měření probíhalo při napájecím napětí  $U_d = 37,5$  V a při proudu bočnícem 17 A. Tento proud je zároveň maximálním proudem, který může bočnicem protékat při činnosti zvyšujícího měniče.

V čase přibližně ( $-1\mu s$ ) se otevírá dioda horního tranzistoru, což má za následek nárůst napětí  $U_{ds}$  o hodnotu  $0,7$  V. V okamžiku přibližně ( $0,5\mu s$ ) je nastaven budící signál do dolního tranzistoru (černě). Po uplynutí dopravního zpoždění budiče začíná exponenciálně narůstat napětí  $U_{gs}$  (červeně), dolní tranzistor se otevírá a napětí  $U_{ds}$  klesá k nule. V čase přibližně ( $9\mu s$ ) budící signál klesá k nule, napětí  $U_{gs}$  exponenciálně následně také klesne k nule, tranzistor se uzavírá a proud převezme opět vnitřní dioda horního tranzistoru.

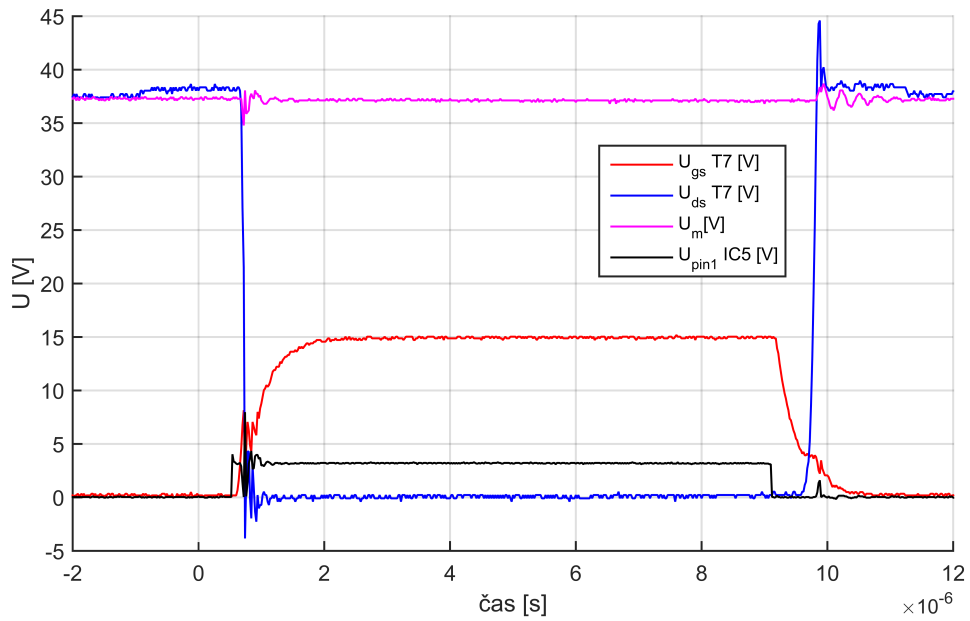
Podobně jako při měření snižujícího měniče pozorujeme rušivé napětí, které se objevuje při zapínacím i vypínacím ději. Opět ale platí, že měření probíhalo při maximálním proudu a toto rušení nijak neovlivňuje napětí  $U_{ds}$  a proto jej považujeme za zanedbatelné, případně fiktivní rušení způsobené parazitní indukčností měřících sond.

Podobně jako u snižujícího měniče můžeme pozorovat napěťový překmit na tranzistorech, který je opět vzhledem k závěrnému napětí tranzistorů zanedbatelný.

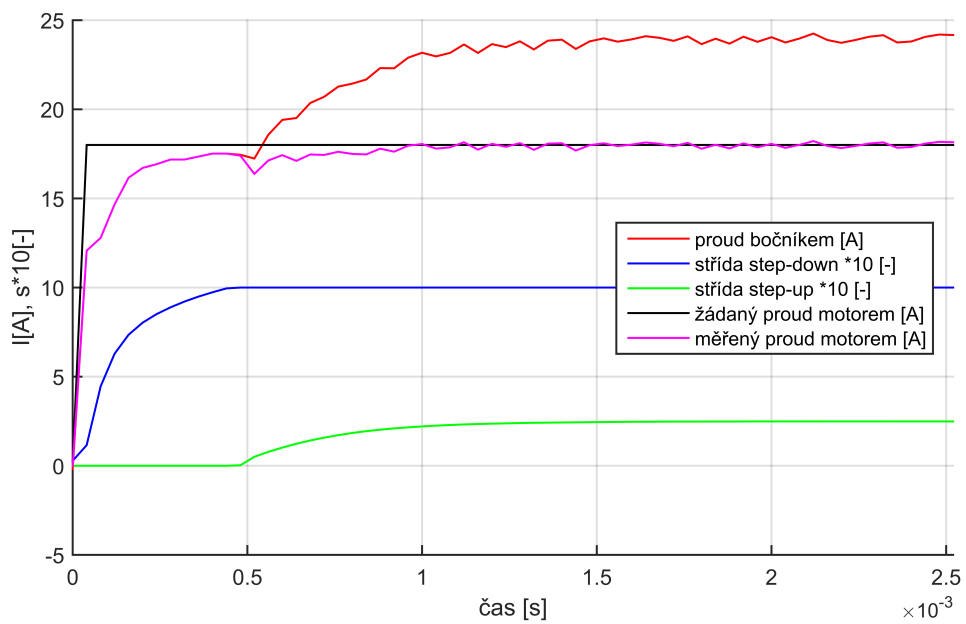
### Přechodová charakteristika regulátoru proudu

Ověření funkčnosti regulátoru proudu bylo provedeno pomocí nástroje Freemaster. Na obrázku 5.5 je zobrazena přechodová charakteristika regulátoru proudu na skokovou změnu žádaného proudu motorem z nuly na 17 A při napájecím napětí měniče 35 V. Pro účely testování byl k měniči jako zátěž připojen rezistor o velikosti  $1,46 \Omega$ . V čase  $0,4$  ms dojde k dosažení maximální střídy snižujícího měniče.

Vzhledem k tomu, že žádaný proud ještě není dosažen je aktivován zvyšující měnič.



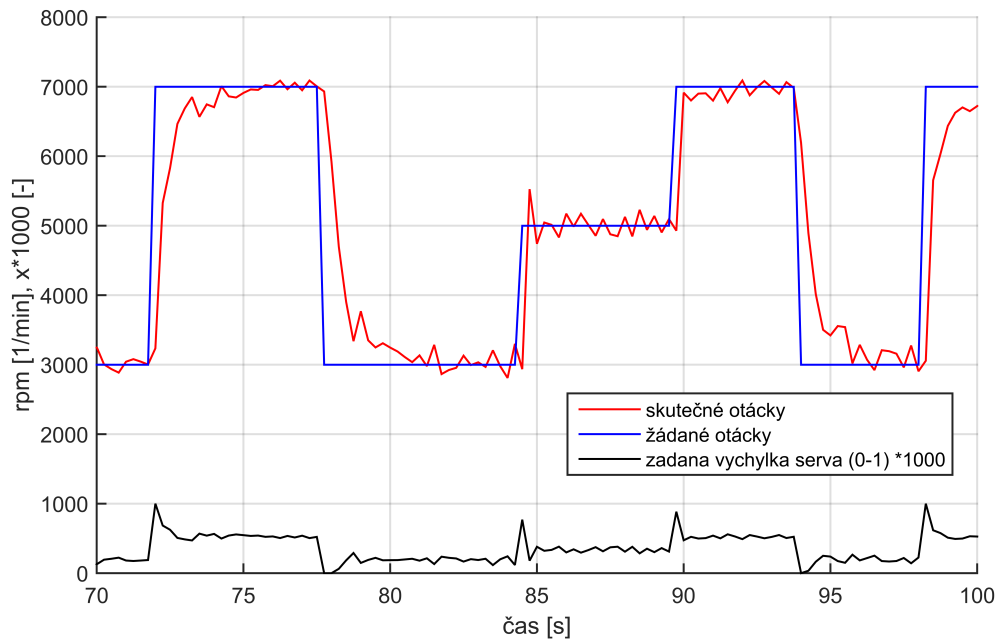
Obr. 5.4: Měření na zvyšujícím měniči



Obr. 5.5: Měření přechodové charakteristiky regulátoru proudu motorem

## Přechodová charakteristika regulátoru otáček

K nastavení i ověření otáčkového regulátoru bylo opět použito nástroje Freemaster. Na obrázku 5.6 je zachycena testovací sekvence, kdy byla pomocí Freemaster nastavována žádaná hodnota otáček spalovacího motoru (modře) a společně s žádanou hodnotou byly zaznamenány i aktuální otáčky motoru (červeně) a žádaná výchylka serva (černě). Z naměřeného průběhu bylo zjištěno, že doba odezvy otáčkového regulátoru je přibližně 0,5 s. Při praktickém testování (během jízdy) bylo ověřeno, že takto nastavený regulátor zajišťuje regulaci otáček zcela spolehlivě.



Obr. 5.6: Měření přechodové charakteristiky regulátoru otáček motorem

## 6 ZÁVĚR

V první kapitole diplomové práce bylo popsáno stávající řešení elektrokola s elektrickým přenosem výkonu. Na základě známých parametrů generátoru a spalovacího motoru byl určen algoritmus řízení spalovacího motoru v závislosti na žádaném mechanickém výkonu hnacího elektromotoru. Z katalogových hodnot byl potom proveden rozbor výkonových poměrů na elektromotoru a s ohledem na ztráty v motoru byl zvolen maximální provozní proud v závislosti na rychlosti elektrokola.

V druhé kapitole práce byl proveden kompletní obvodový návrh měniče. Byla zvolena topologie tvořená kombinací zvyšujícího a snižujícího měniče. Bylo provedeno dimenzování všech prvků výkonové části, včetně výpočtu tepelných ztrát. Pro buzení tranzistorů byly zvoleny budiče s integrovaným optočlenem, který zajišťuje galvanické oddělení. Pro ochranu výkonové části byly navrženy přepětová a nadproudová ochrana. Pro napájení měniče byl zvolen blokující měnič s transformátorem pracující v rozsahu napájecích napětí 12-60 V. V práci byl popsán podrobný návrh transformátoru a popis zapojení a funkce řídicího kontroléru. K řízení výkonového měniče byla zvolena procesorová deska vyvinutá na UVEE.

Na základě teoretického návrhu bylo potom vytvořeno schéma zapojení a navrženy desky plošných spojů. Při návrhu byl kladen důraz především na potlačení parazitních indukčností způsobujících napěťový překmit na výkonových tranzistorech a také na dobré chlazení měniče a dostatečné proudové dimenzování mědi. Plošné spoje byly potom osazeny a veškeré navržené obvody byly oživeny.

Třetí kapitola se zabývá návrhem firmware pro řídicí mikroprocesor. S ohledem na vybraný typ procesoru bylo zvoleno vhodné vývojové prostředí a pomocí blokových schémat byl popsán řídicí algoritmus. Ten sestává z proudové regulační smyčky, která reguluje proud motorem a otáčkové regulační smyčky, která zajišťuje regulaci otáček spalovacího motoru. Pro regulaci byly použity diskrétní regulátory typu PI. Regulátor otáček byl nastaven experimentálně a toto nastavení bylo ověřeno měřením při reálném provozu elektrokola. Parametry regulátoru proudu byly vypočteny pomocí metody optimálního modulu a správnost nastavení ověřena měřením. Příslušné přechodové charakteristiky jsou uvedeny v kapitole 5.

Ve čtvrté kapitole byl podrobně popsán návrh krabice pro měnič. Ta byla vyrobena autorem a její umístění v rámu elektrokola je zachyceno na fotodokumentaci v příloze H.

V poslední kapitole je proveden rozbor naměřených oscilogramů a přechodových charakteristik. Bylo provedeno ověřující měření blokujícího měniče, budících signálů výkonového měniče a měření přechodových charakteristik regulátoru otáček a regulátoru proudu. Naměřené závislosti odpovídají fyzikálním předpokladům a dokládají tak funkčnost navržených obvodových celků měniče.

Jízdní kolo vybavené navrženým a odladěným měničem bylo na závěr podrobeno jízdám testům, při kterých byla především ověřena spolehlivost celého pohonu. Při nastavení žádaného proudu pákou plynu je možné zaznamenat nejprve reakci otáčkového regulátoru a následně nárůst momentu, který je dán strmostí dynamického omezení žádaného proudu. Při jízdě do kopce potom pozorujeme, že škrtící klapka motoru je nastavena do svého maxima a motor pracuje na plný výkon. Lze prohlásit, že jízda na kole je bezproblémová. Návrh a realizaci lze tedy považovat za úspěšnou.

## LITERATURA

- [1] FREESCALE. General Functions Library. User Reference Manual Rev. 0. Colorado: Freescale, 2/2004.
- [2] FREESCALE. DSP56800E QuickStart User's Manual. User Reference Manual Rev. 2.5.1. Colorado: Freescale, 10/2010.
- [3] FREESCALE. MC56F827xx Reference Manual. Colorado: Freescale, 10/2013.
- [4] MAZÁLEK, T. Motokolo se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 43 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..
- [5] 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..
- [6] NĚMEC, P. Trakční pohon elektrokola s motorem Heinzmann. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..
- [7] NXP Semiconductors. Datasheet PSMN5R6-100PS, 30 Listopad 2012, Dostupné z <:http://http://www.nxp.com>
- [8] ON Semiconductors. Datasheet UC3844. Denver, Colorado: Semiconductor Components Industries, 2013. Publication Order Number: UC3844B/D, Dostupné z <:http://www.onsemi.com>
- [9] PATOČKA, M. Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek 2. Pulsní měniče bez transformátoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [10] PATOČKA, M. Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek 3. Výkonové polovodičové spínací součástky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [11] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [12] PRUDÍK, M. Trakční měnič pro motorové kolo se stejnosměrným motorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..



## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$U_{dr}$	Úbytek napětí na diodě usměrňovače [V]
$R_{dr}$	Dynamický odpor diody usměrňovače [ $\Omega$ ]
$U_d$	Napětí na meziobvodu snižujícího měniče [V]
$u_g$	Sdružené napětí na generátoru
$n_g$	Otáčky generátoru [ $\text{min}^{-1}$ ]
$k_g$	Otáčková konstanta generátoru [ $\text{min}^{-1}/\text{V}$ ]
$P_0$	Žádaný příkon měniče [W]
$P_{g,max}$	Maximální odebíraný výkon z generátoru [W]
$U_{d,max}$	Napětí na meziobvodu při minimálních otáčkách generátoru [V]
$U_{d,min}$	Napětí na meziobvodu při maximálních otáčkách generátoru [V]
$U_{jm}$	Jmenovité napětí motoru Heinzmann [V]
$P_{jm}$	Jmenovitý výkon motoru Heinzmann [W]
$M_{jm}$	Jmenovitý moment motoru Heinzmann [Nm]
$P_{jztr}$	Ztrátový výkon motoru Heinzmann ve jmenovitém bodě [W]
$n_{jm}$	Jmenovité otáčky motoru Heinzmann [ $\text{min}^{-1}$ ]
$I_{jm}$	Jmenovitý proud motoru Heinzmann [A]
$\eta_{jm}$	Účinnost motoru Heinzmann ve jmenovitém bodě [-]
$k_u$	Napěťová konst. [ $\text{V}/\text{min}^{-1}$ ]
$R_a$	Odpor kotvy [ $\Omega$ ]
$k_m$	Momentová konstanta motoru Heinzmann [Nm/A]
$U_b$	Úbytek na kartáčích motoru Heinzmann [V]
$k_n$	Koeficient tlumení otáček motoru Heinzmann [ $\text{min}^{-1}/\text{Nm}$ ]
$k_d$	Koeficient tlumení momentu motoru Heinzmann [ $\text{Nm}/\text{min}^{-1}$ ]
$L_a$	Indukčnost kotvy motoru Heinzmann [ $\mu\text{H}$ ]
$M_r$	Třecí moment motoru Heinzmann [Nm]
$I$	Proud motorem Heinzmann [A]
$U_m$	Napětí na svorkách motoru Heinzmann [V]
$U_i$	Indukované napětí motoru Heinzmann [V]
$n$	Otáčky motoru Heinzmann [ $\text{min}^{-1}$ ]
$v$	Rychlost elektrokola [km/hod]
$D$	Průměr kola [m]
$P_{mech}$	Mechanický výkon motoru Heinzmann [W]
$M$	Moment motoru Heinzmann [Nm]
$P_{ztr}$	Ztrátový výkon na motoru Heinzmann [W]
$T_{max}$	Teplota vybavení tepelné ochrany motoru Heinzmann [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$f_m$	Spínací frekvence výkonového měniče [Hz]
$C_{in}$	Kondenzátor meziobvodu

TL1	Dolní tranzistor snižujícího měniče
TH1	Horní tranzistor snižujícího měniče
TL2	Dolní tranzistor zvyšujícího měniče
TH2	Horní tranzistor zvyšujícího měniče
$s_d$	Střída spínání horního tranzistoru snižujícího měniče [-]
$C_{out}$	Kondenzátor na výstupu motoru
$s_u$	Střída spínání dolního tranzistoru zvyšujícího měniče [-]
$L_{L0}$	Indukčnost jedné tlumivky zvyšujícího měniče [H]
$L_L$	Výsledná indukčnost tlumivky zvyšujícího měniče [H]
$N_L$	Počet závitů jedné tlumivky zvyšujícího měniče [-]
$S_{cu,L}$	Průřez jádra jedné tlumivky zvyšujícího měniče [m <sup>2</sup> ]
$I_{\text{žad}}$	Žádaný proud motorem Heinzmann [A]
$L_d$	Indukčnost do které pracuje snižující měnič [H]
$\Delta I_d$	Zvlnění proudu na tlumivce při činnosti snižujícího měniče [A]
$\Delta I_u$	Zvlnění proudu na tlumivce při činnosti zvyšujícího měniče [A]
$I_b$	Proud bočníkem [A]
$I_{b,max}$	Maximální proud bočníkem [A]
$P_{b,max}$	Maximální výkonová ztráta na bočníku [W]
$R_b$	Odpor bočníku [ $\Omega$ ]
$U_{b,max}$	Napětí na bočníku při maximálním proudu [V]
AD	Analogově-Digitální (převodník)
$K_b$	Celkové zesílení zesilovače bočníku [-]
$K_{b,1}$	Zesílení 1. stupně zesilovače bočníku [-]
$K_{b,2}$	Zesílení 2. stupně zesilovače bočníku [-]
$R_{DS,on}$	Odpor výkonového tranzistoru měniče v sepnutém stavu [ $\Omega$ ]
$I_C$	Kolektorový proud tranzistoru měniče v sepnutém stavu [A]
$\Delta P_{v,d}$	Vodivostní ztráty jednoho tranzistoru snižujícího měniče [W]
$\Delta P_{p,d}$	Vodivostní ztráty jednoho tranzistoru snižujícího měniče [W]
$\Delta P_d$	Celkové ztráty snižujícího měniče [W]
$\Delta P_{v,u}$	Vodivostní ztráty jednoho tranzistoru zvyšujícího měniče [W]
$\Delta P_{p,u}$	Vodivostní ztráty jednoho tranzistoru zvyšujícího měniče [W]
$\Delta P_u$	Celkové ztráty zvyšujícího měniče [W]
$\Delta P_{vh}$	Maximální ztráty zvyšujícího měniče pokud pracuje snižující měnič [W]
$t_{on}$	Zapínací doba výkonového tranzistoru
$t_{off}$	Vypínací doba výkonového tranzistoru
$i_d(t)$	Proud tekoucí do snižujícího měniče
$I_d$	Střední hodnota proudu do snižujícího měniče
$I_{max}$	Maximální hodnota proudu vtékajícího do snižujícího měniče
$i_c(t)$	Proud kondenzátorem meziobvodu

$I_{cef}$	Efektivní proud kondenzátorem meziobvodu
$T$	Spínací perioda měniče
$t_{zap}$	Doba zapnutí horního tranzistoru snižujícího měniče
$N_1$	Počet závitů primárního vinutí blokujícího měniče
$N_2$	Počet závitů sekundárního vinutí blokujícího měniče
$\Delta W$	Přenesená energie v jednom pracovním cyklu blokujícího měniče
$\Delta\Psi_{mag}$	zdvih magnetického toku v jádru během magnetizace
$\Delta\Psi_{demag}$	zdvih magnetického toku v jádru během demagnetizace
$U_z$	Napětí na zátěži blokujícího měniče
$s_{min}$	Minimální střída tranzistoru blokujícího měniče
$s$	Střída spínání blokujícího měniče
$s_{max}$	Minimální střída tranzistoru blokujícího měniče
$U_{CE,max}$	Maximální napětí na tranzistoru blokujícího měniče
$\Phi_{max}$	Maximální magnetický tok v jádře
$L_1$	Primární indukčnost transformátoru
$I_{1,max}$	Maximální proud primárním vinutím
$I_{1,min}$	Minimální proud primárním vinutím
$\Lambda$	Magnetická vodivost jádra
$I_{2,max}$	Maximální proud sekundárním vinutím
$I_{2,min}$	Minimální proud sekundárním vinutím
$I_z$	Proud zátěží blokujícího měniče
$I_{2,stř}$	Střední proud sekundárním vinutím transformátoru
$\Delta I_2$	Zvlnění sekundárního proudu
$P_{2,max}$	Maximální přenášený výkon transformátoru
$B_{max}$	Maximální magnetická indukce v jádře transformátoru
$l_v$	Delka vzduchové mezery transformátoru

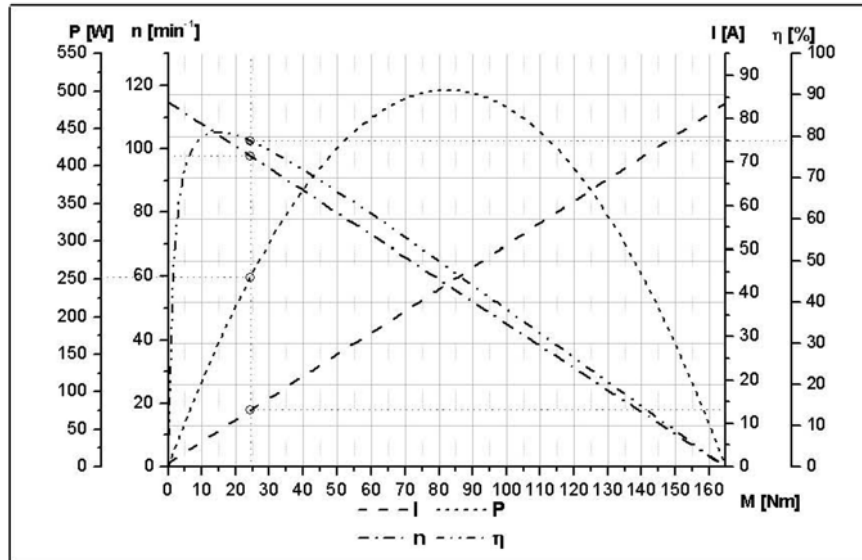
# SEZNAM PŘÍLOH

A	Katalogový list motoru Heinzmann	60
B	Obsah přiloženého CD	61
C	Schémata	62
D	Plošný spoj - strana TOP	67
E	Plošný spoj - strana BOT	68
F	Osazovací plán strana TOP	69
G	Soupiska materiálu	70
H	Fotodokumentace	71

# A KATALOGOVÝ LIST MOTORU HEINZMANN

## Motordiagramm

Motortyp: RN120-2NFB  
 Getriebe: SR 40.2  
 Ausgabe: 01 / 2003  
 Nummer: D 03 FM 0049  
 Artikel-Nr.: 870-00-XXX-66



Alle Angaben sind Rechenwerte. Technische Änderungen vorbehalten.

### Betriebsdaten - betriebswarm (Ankertemperatur 60°C / Magnettemperatur 40°C)

Spannung	<b>U</b>	<b>24</b>	[V]	(mechanische) Leistung	<b>P</b>	<b>250</b>	[W]
Motordrehmoment	<b>M</b>	<b>24,4</b>	[Nm]	Verlustleistung	<b>P<sub>v</sub></b>	<b>67</b>	[W]
Drehzahl	<b>n</b>	<b>97</b>	[min <sup>-1</sup> ]				
Motorstrom	<b>I</b>	<b>13,2</b>	[A]				
Wirkungsgrad	<b>η</b>	<b>78,9</b>	[%]				

### Eckdaten - betriebswarm

Leerlaufdrehzahl	<b>n<sub>l</sub></b>	<b>114</b>	[min <sup>-1</sup> ]	Stillstandsrehmoment	<b>M<sub>st</sub></b>	<b>164,9</b>	[Nm]
Leerlaufstrom	<b>I<sub>l</sub></b>	<b>0,82</b>	[A]	Stillstandsstrom	<b>I<sub>st</sub></b>	<b>83,6</b>	[A]

### Grunddaten - kalt (25°C)

Spannungskonstante	<b>K<sub>e</sub></b>	<b>21</b>	[V/100min <sup>-1</sup> ]	Drehmomentkonstante	<b>K<sub>n</sub></b>	<b>2,01</b>	[Nm/A]
Ankerwiderstand	<b>R<sub>a</sub></b>	<b>0,24</b>	[Ω]	Drehzahl-Drehmomentkonst.	<b>K<sub>n</sub></b>	<b>-0,59</b>	[min <sup>-1</sup> /Nm]
Bürstenspannung	<b>U<sub>B</sub></b>	<b>0,6</b>	[V]	Ankerinduktivität	<b>L<sub>A</sub></b>	<b>0,06</b>	[mH]
Dämpfungskoeffizient	<b>K<sub>d</sub></b>	<b>1</b>	[Nm/100min <sup>-1</sup> ]	Elektrische Zeitkonstante	<b>τ<sub>e</sub></b>	<b>0,25</b>	[ms]
Reibungsmoment	<b>M<sub>r</sub></b>	<b>0,5</b>	[Nm]	Läuferträgheitsmoment	<b>J</b>	<b>1300</b>	[kgcm <sup>2</sup> ]
				Mechanische Zeitkonstante	<b>τ<sub>m</sub></b>	<b>7,76</b>	[ms]

### Fahrdaten Elektrofahrrad

Reifendurchmesser	<b>D<sub>r</sub></b>	<b>26</b>	[Zoll]	Motorstrombegrenzung	<b>I<sub>B</sub></b>	<b>33</b>	[A]
Gesamtmasse	<b>m<sub>g</sub></b>	<b>100</b>	[kg]	Motortemperaturbegrenzung	<b>θ<sub>B</sub></b>	<b>145</b>	[°C]
Fahrgeschwindigkeit	<b>v</b>	<b>11,7</b>	[km/h]	Kurzbetriebszeit	<b>t<sub>B</sub></b>	<b>(-)</b>	[min]
Steigung	<b>s</b>	<b>6,8</b>	[%]	Batteriekapazität	<b>ΔC<sub>32</sub></b>	<b>(-)</b>	[Ah]
				(entnehmbare)			

## HEINZMANN®

Am Haselbach 1  
 D-79677 Schönau/Schwarzwald  
 Tel.: 07873 / 8208 - 0  
 Fax: 07873 / 8208 - 199



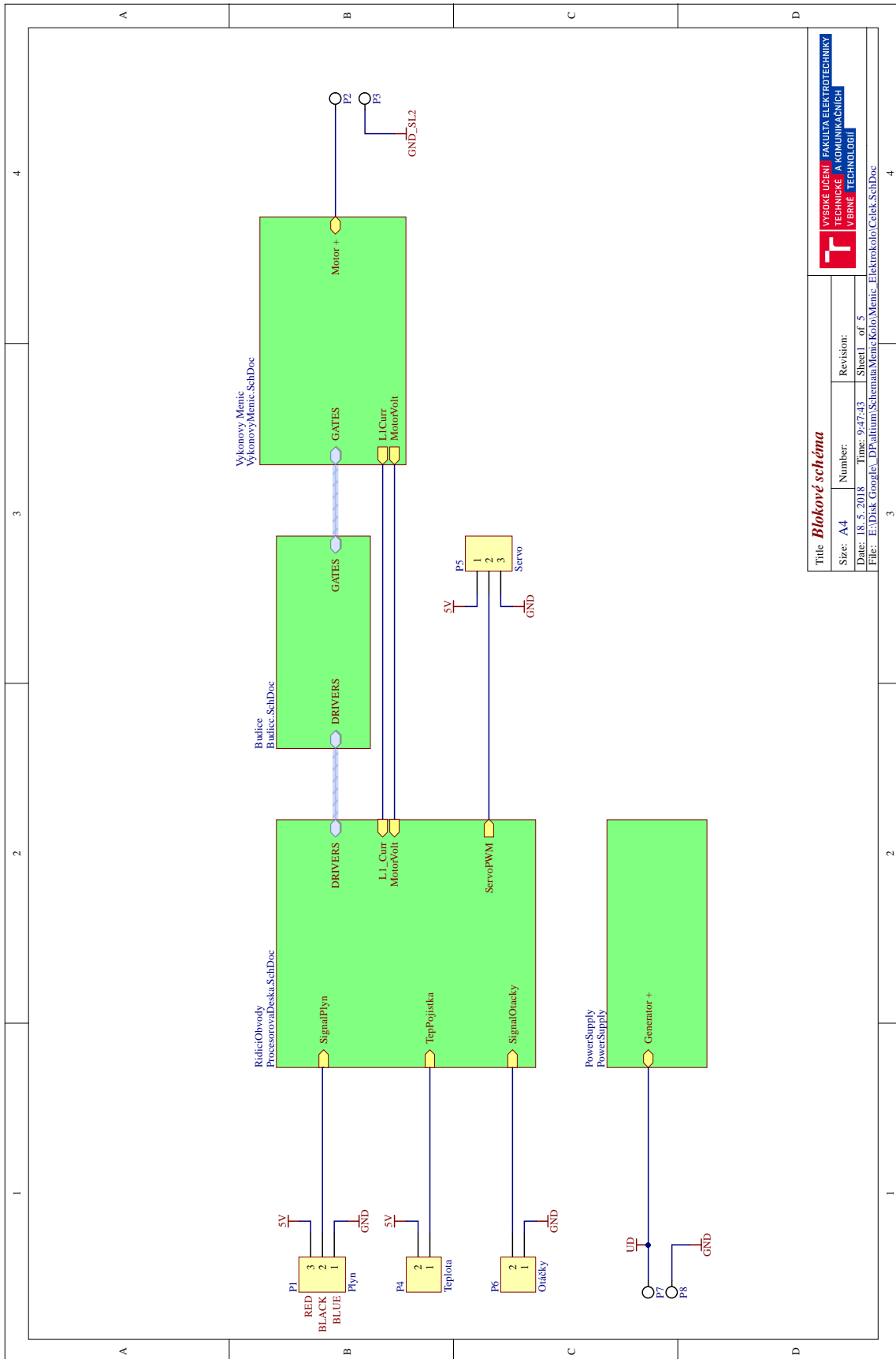
Elektromagnetische Antriebe

e-Mail: [info@heinzmann.de](mailto:info@heinzmann.de)  
 Internet: [www.heinzmann.de](http://www.heinzmann.de)

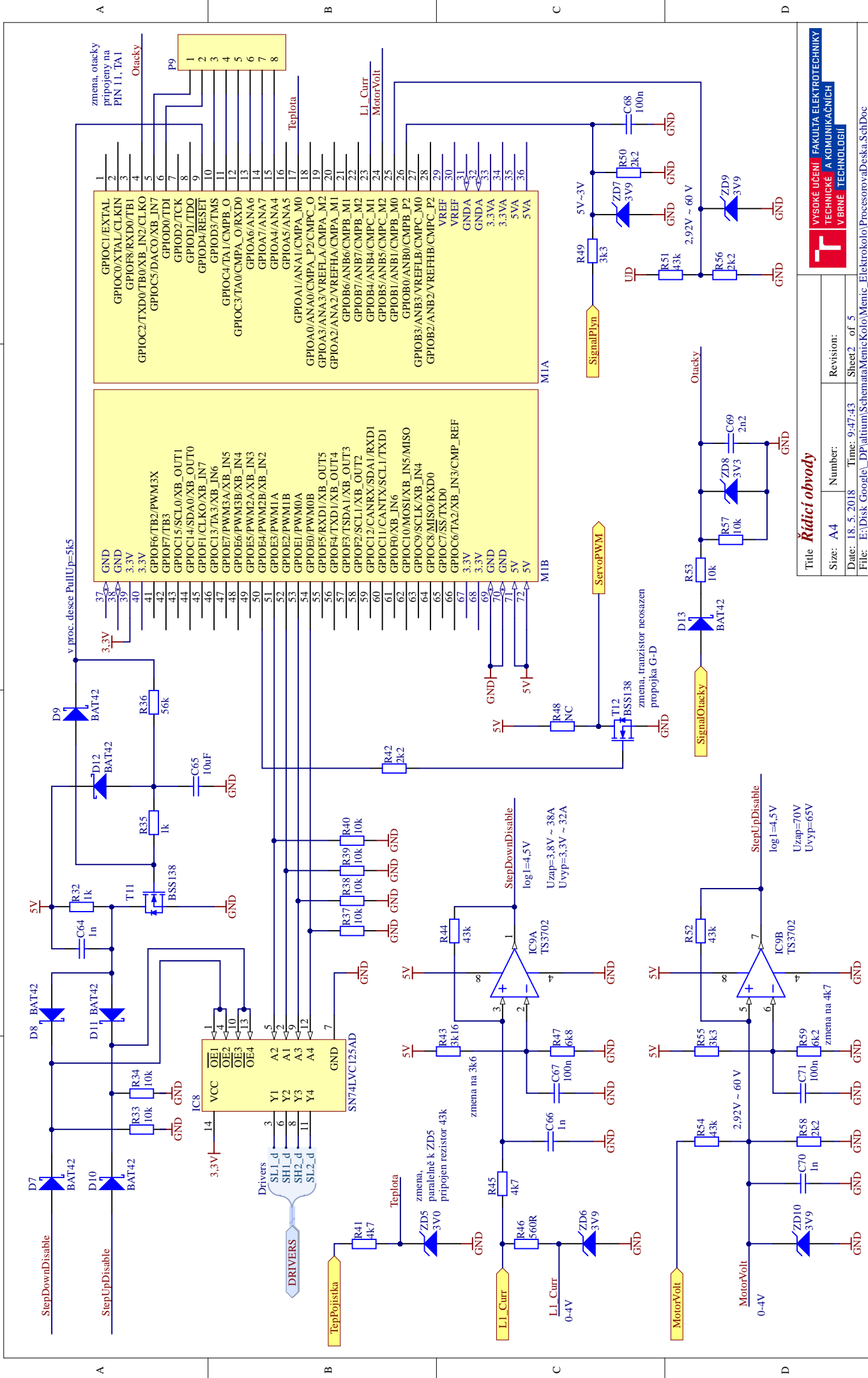
## B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

/ .....	kořenový adresář přiloženého CD
_ AnalyzaUcinnostiMotoru.m .....	Výpočetní skript grafu na obr. 1.3
_ AnalyzaZvysujicihoMenice.m .....	Výpočetní skript grafu na obr. 2.2 a 2.3
_ Procesorova_deska.pdf .....	Schéma procesorové desky
_ Firmware .....	Kompletní zdrojové kódy
_ CodeWarrior .....	Zdrojová data pro spuštění Codewarrior ve VirtualBox
_ Freemaster .....	Real-time debugovací a měřicí nástroj

# C SCHÉMATA



Title <b>Blokové schéma</b>		Revision:	
Size: A4	Number:	Sheet 1	of 5
Date: 18. 5. 2018	Time: 9:47:43	File: E:\Disk Google\DP\altium\Schemata\MenicKolo\Menic_ElektrokoloCetek.SchDoc	

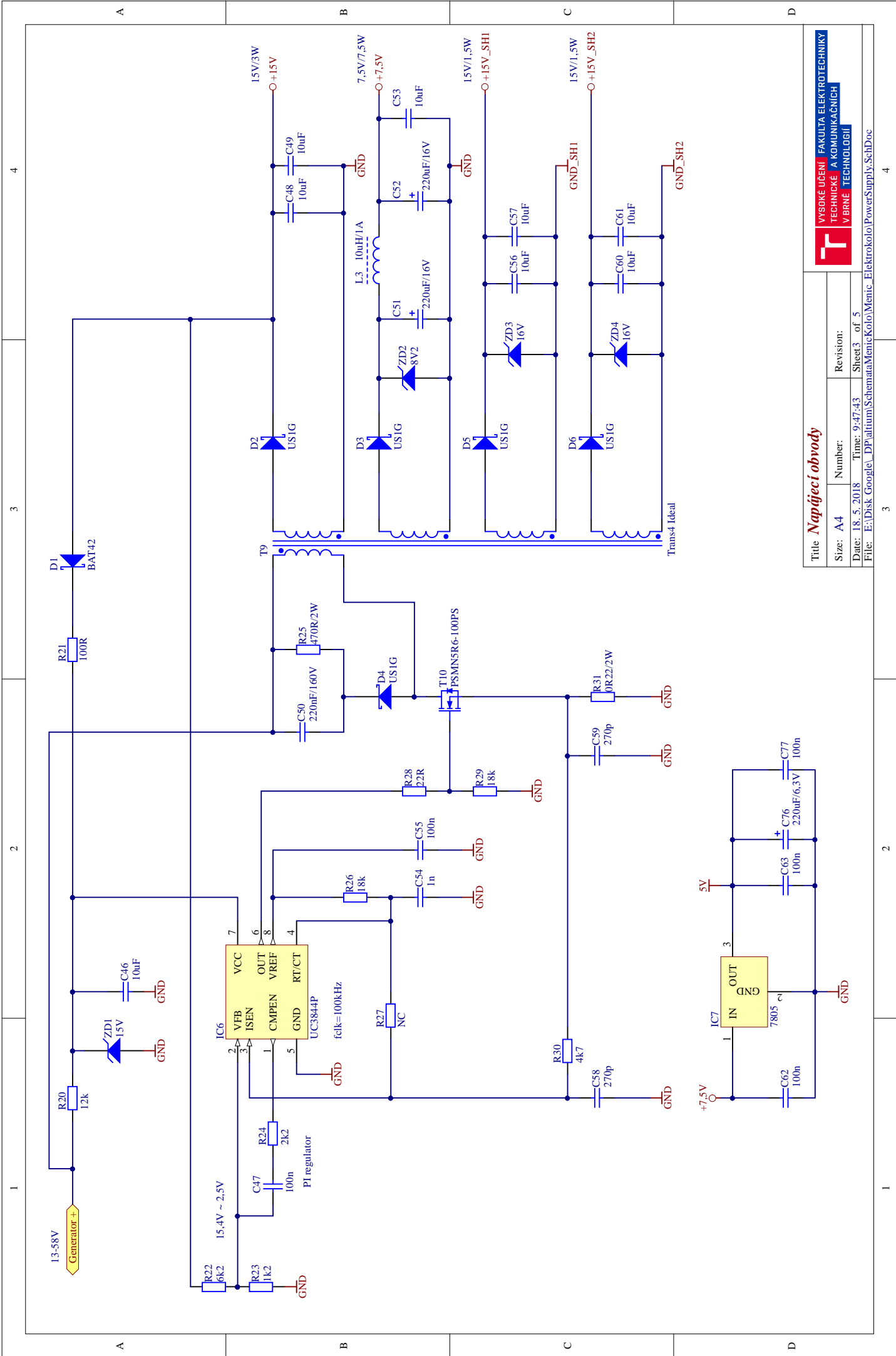


Title <b>Ridici obvody</b>	
Size: A4	Number:
Date: 18.5.2018	Time: 9:47:43
File: E:\Disk Google\DP\altium\Schemata\Menic_Kolo\Menic_ElektroKolo\ProcessorvaDeska.SchDoc	Sheet 2 of 5
Revision:	



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
 TECHNIKE A KOMUNIKAČNÍCH  
 V BRNĚ TECHNOLÓGII

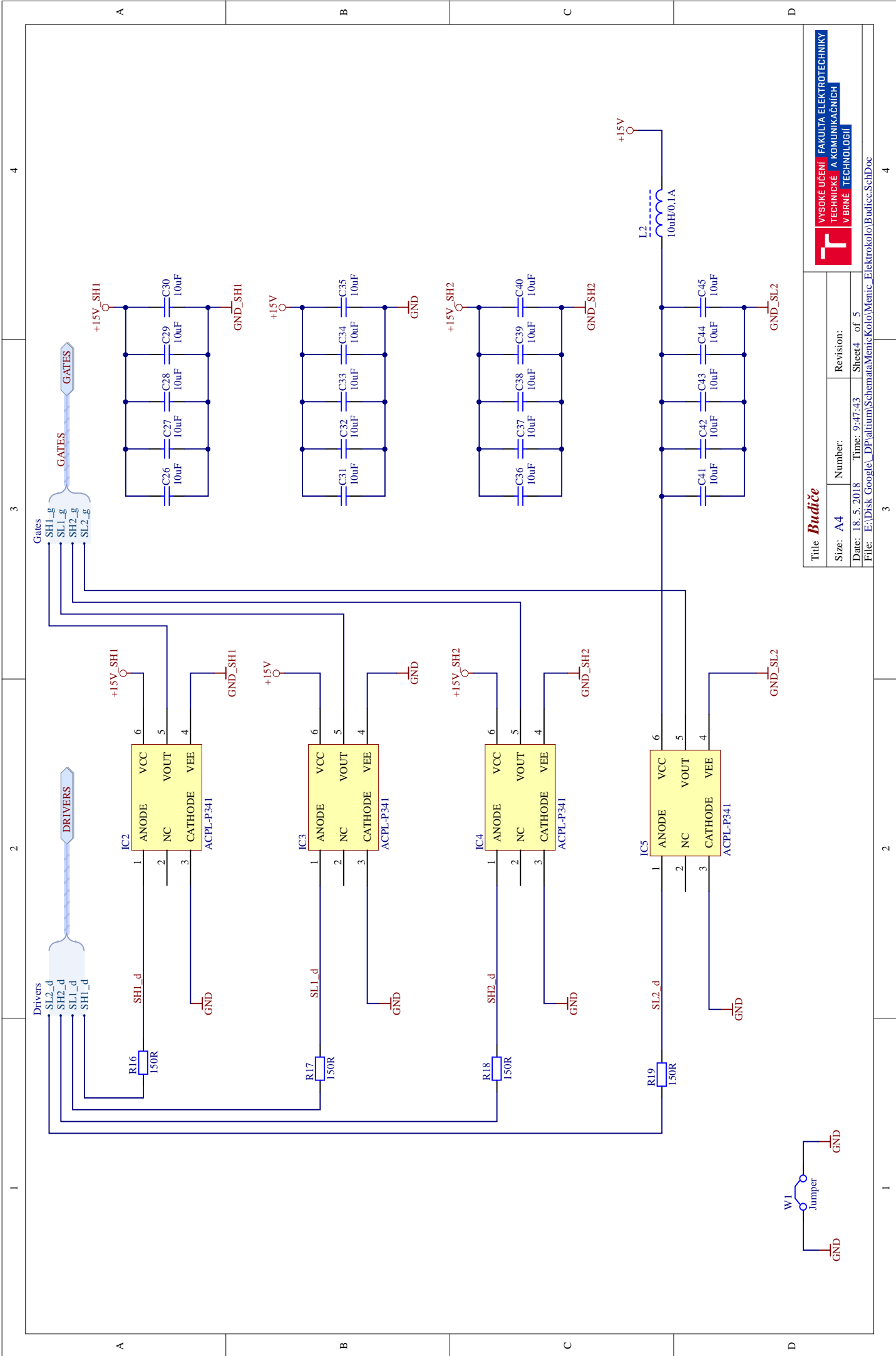




Title **Napájecí obvody**

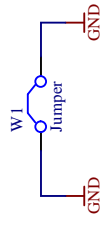
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 18.5.2018	Time: 9:47:43	Sheet 3 of 5
File: E:\Disk Google\DP\altium\Schemata\Menic_Elektroko\PowerSupply_SchDoc		

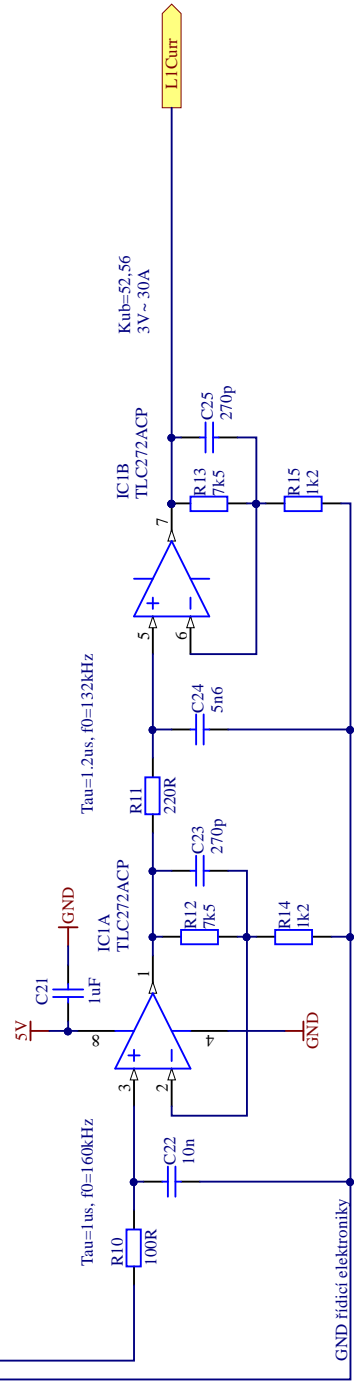
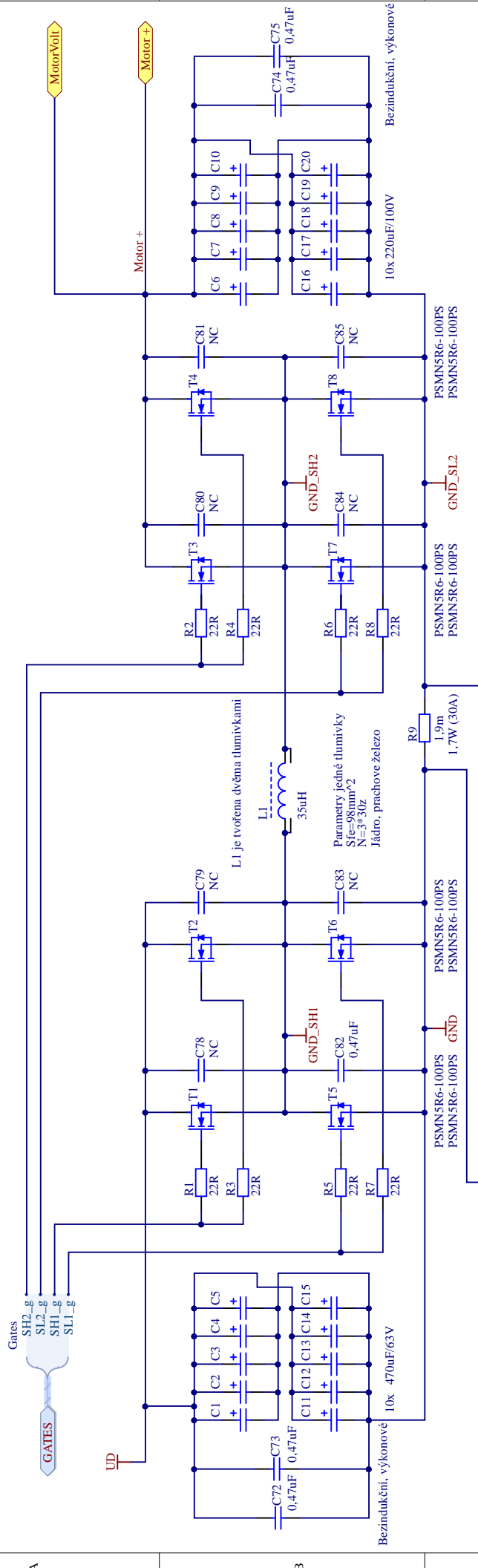




Title **Budiče**

Size: A4	Number:	Revision:
Date: 18.5.2018	Time: 9:47:43	Sheet4 of 5
File: E:\Disk Google\DP\altium\Schemata\Menic_ElektroKolo\Budiče.SchDoc		

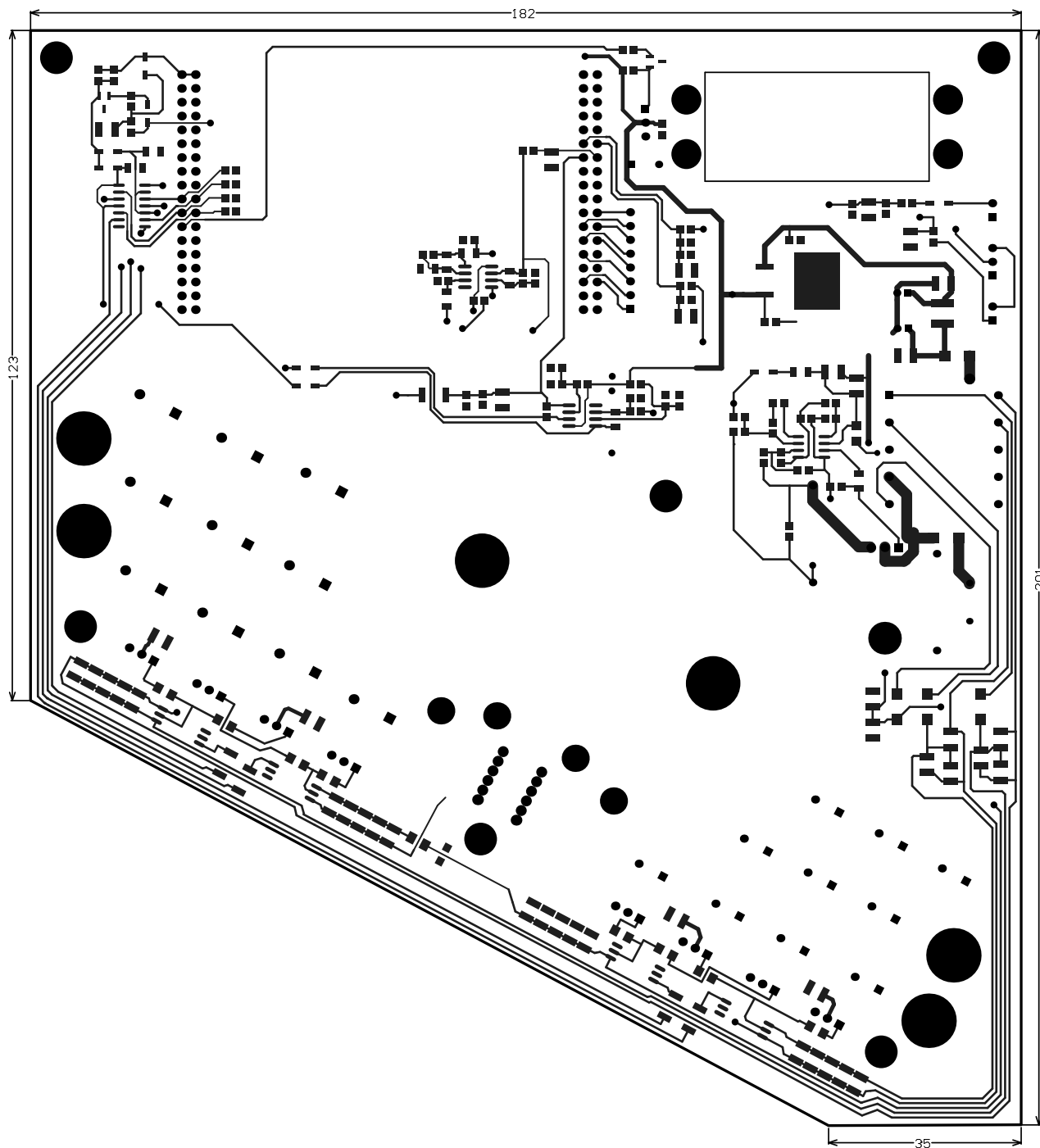




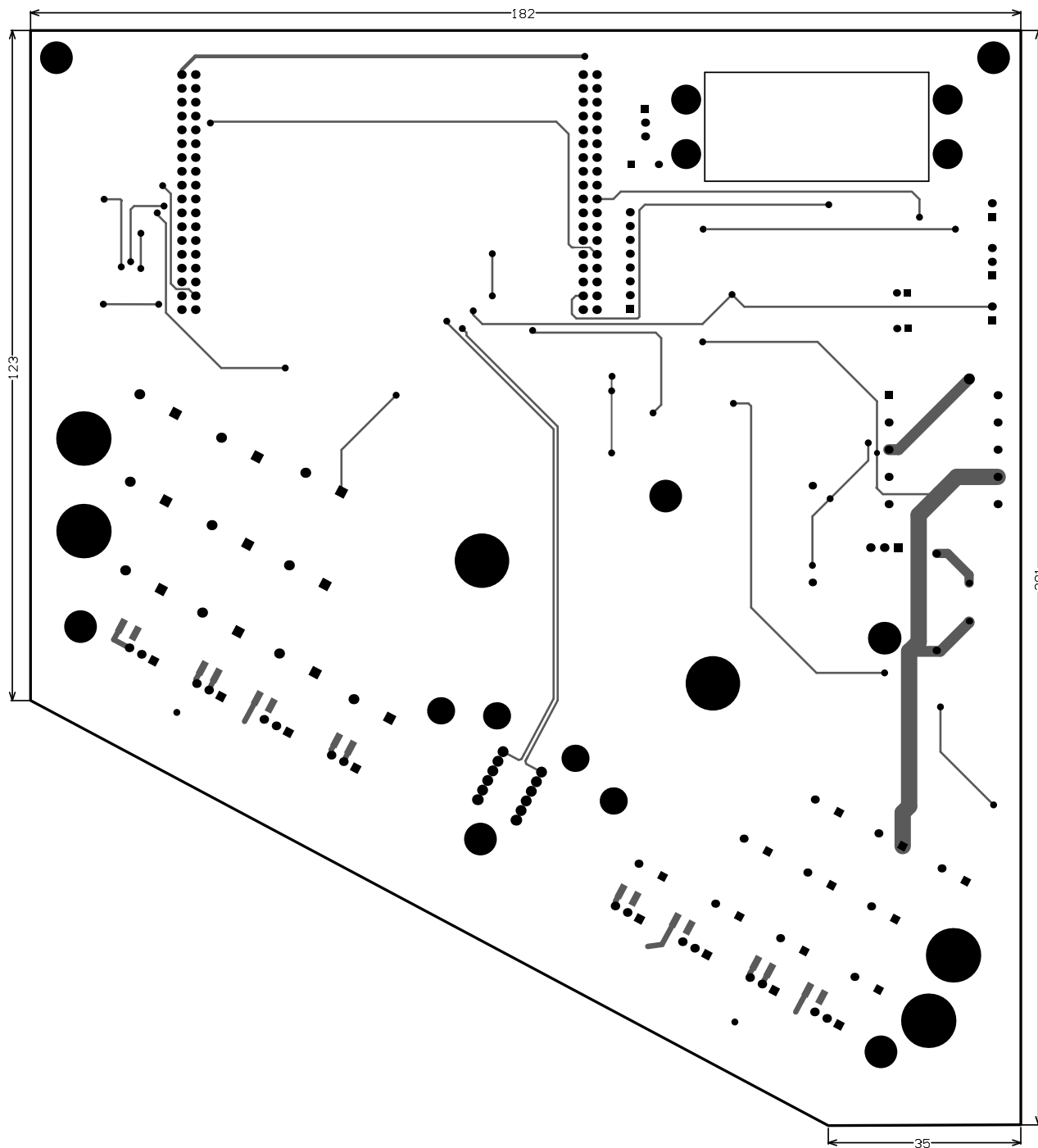
Title **Výkonová část měniče**

Size: A4	Number:	Revision:
Date: 18.5.2018	Time: 9:47:43	Sheet5 of 5
File: E:\Disk Google\DP\altium\Schemata\Menic_Elektroko\l\YkonovyMenic.SchDoc		

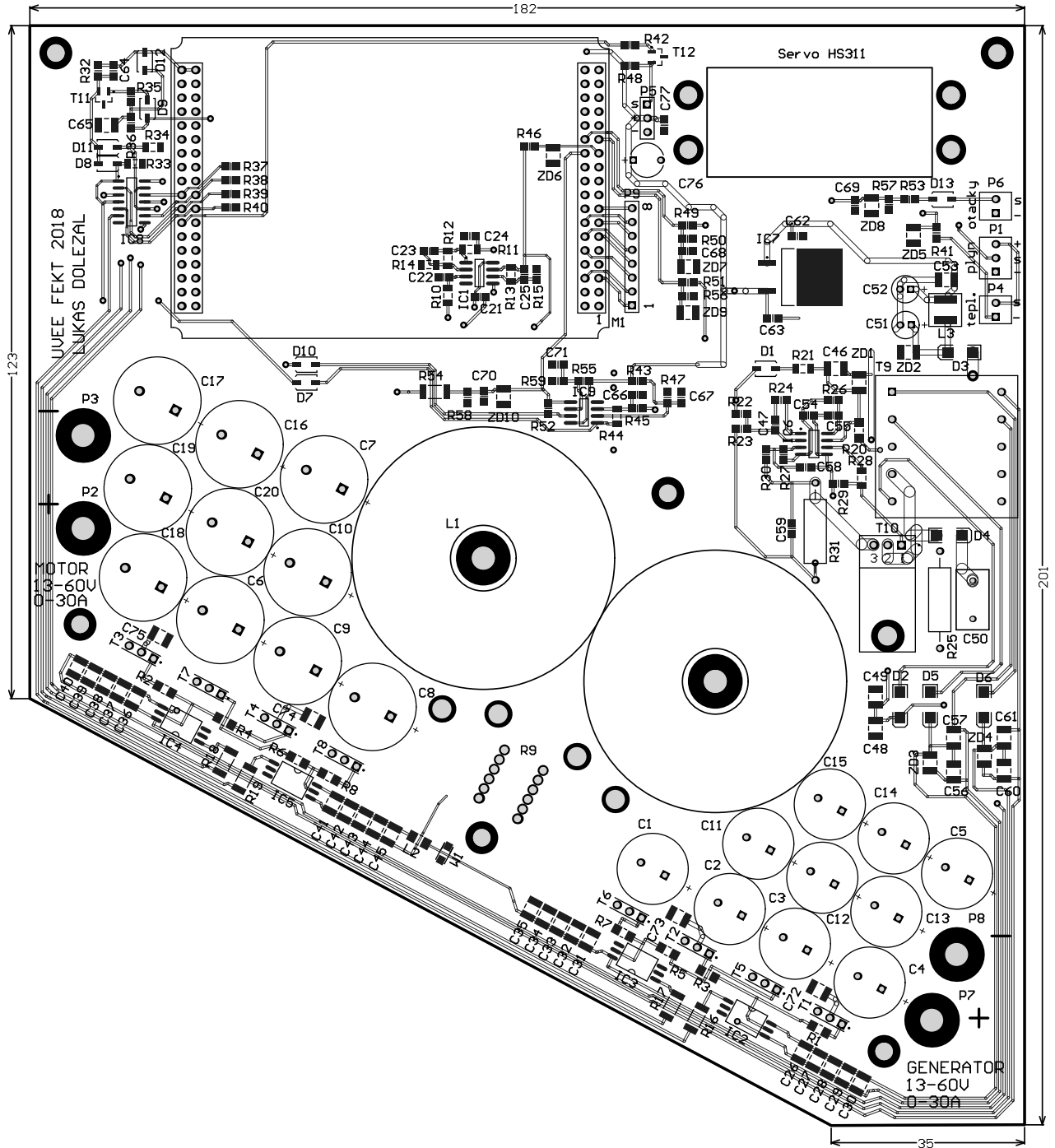
# D PLOŠNÝ SPOJ - STRANA TOP



# E PLOŠNÝ SPOJ - STRANA BOT



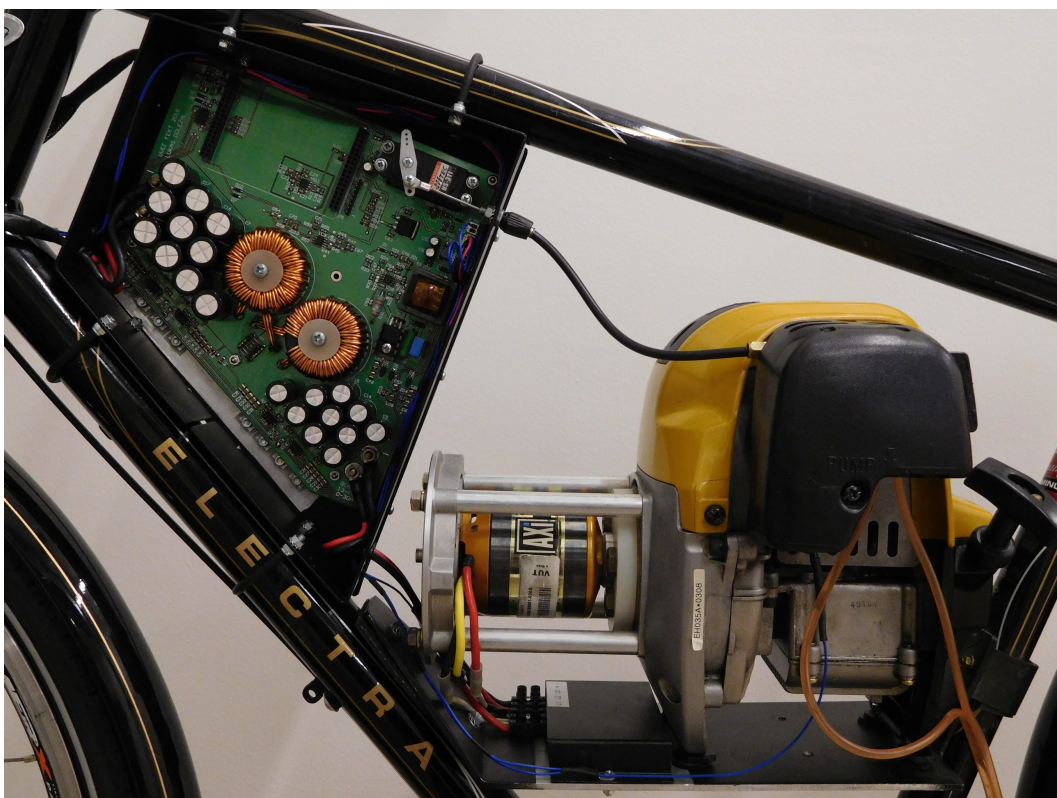
# F OSAZOVACÍ PLÁN STRANA TOP



# G SOUPISKA MATERIÁLU

Označení součástky	Počet	Hodnota	Pouzdro
C1, C2, C3, C4, C5, C11, C12, C13, C14, C15	10	470uF/63V	CAPPR5-13x25
C6, C7, C8, C9, C10, C16, C17, C18, C19, C20	10	220uF/100V	CAPPR7.5-16x25
C21	1	1uF	6-0805_M
C22	1	10n	6-0805_M
C23, C25, C58, C59	4	270p	6-0805_M
C24	1	5n6	6-0805_M
C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C48, C49, C53, C56, C57, C60, C61	28	10uF	C1210_N
C47, C55, C62, C63, C67, C68, C71, C77	8	100n	6-0805_M
C50	1	220nF/160V	FoI160V_220n
C51, C52	2	220uF/16V	CAPPR2-5x11
C54, C64, C66, C70	4	1n	6-0805_M
C65	1	10uF	CAPC3225N
C69	1	2n2	6-0805_M
C72, C73, C74, C75, C82	5	0,47uF	C1210_N
C76	1	220uF/6,3V	CAPPR5-6.3x11
C78, C79, C80, C81, C83, C84, C85	7	NC	C1210_N
D1, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13	8	BAT42	SOD-123
D2, D3, D4, D5, D6	5	US1G	DO214
IC1	1	TLC272ACP	D008_M
IC2, IC3, IC4, IC5	4	ACPL-P341	SO6
IC6	1	UC3844P	SO8_N
IC7	1	7805	TO263-3N
IC8	1	SN74LVC125AD	D014_N
IC9	1	TS3702	D008_M
L1	1	35uH	TlumivkaLezata
L2	1	10uH/0,1A	MELF-R3216-1206
L3	1	10uH/1A	L_TYS5040
M1	1	uP_symbol	uP_deska_symbol
P1	1	Plyn	HDR1X3_PSH02
P2, P3, P7, P8	4	Pad d3.2	OckoM4
P4	1	Teplota	HDR1X2_PSH2
P5	1	Servo	HDR1X3
P6	1	Otáčky	HDR1X2_PSH2
P9	1	MHDR1X8	HDR1X8
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8	8	22R	8-1206
R9	1	1,9m	BocnikMenicElektrokolo
R10, R21	2	100R	C1206
R11	1	220R	C1206
R12, R13	2	7k5	C1206
R14	1	1k2	C1206
R15, R23	2	1k2	6-0805_M
R16, R17, R18, R19	4	150R	12Z-2010
R20	1	12k	8-1206
R22, R59	2	6k2	6-0805_M
R24, R42, R50, R56, R58	5	2k2	6-0805_M
R25	1	470R/2W	AXIAL-0.7
R26, R29	2	18k	6-0805_M
R27, R48	2	NC	6-0805_M
R28	1	22R	C1206
R30, R41, R45	3	4k7	6-0805_M
R31	1	0R22/2W	AXIAL-0.7
R32, R35	2	1k	6-0805_M
R33, R34	2	10k	C1206
R36	1	56k	6-0805_M
R37, R38, R39, R40, R53, R57	6	10k	6-0805_M
R43	1	3k16	6-0805_M
R44	1	43k	C1206
R46	1	560R	6-0805_M
R47	1	6k8	6-0805_M
R49, R55	2	3k3	6-0805_M
R51, R52	2	43k	6-0805_M
R54	1	43k	12Z-2010
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8	8	PSMN5R6-100PS	TO220-3_V_OV_OFF
T9	1	Transformer	Transformer
T10	1	PSMN5R6-100PS	TO220-3_H
T11, T12	2	BSS138	SOT-23_M
W1	1	Jumper	JUMPER-1206
ZD1	1	15V	C1210_N
ZD2	1	8V2	C1210_N
ZD3, ZD4	2	16V	C1210_N
ZD5	1	3V0	C1210_N
ZD6, ZD7, ZD9, ZD10	4	3V9	C1210_N
ZD8	1	3V3	C1210_N

## H FOTODOKUMENTACE







Obr. H.1: Kompletní měnič umístěný v navržené krabici