

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NÁVRH VÝKONOVÉ, ŘÍDICÍ A MĚŘICÍ ELEKTRONIKY ELEKTRICKÉ BRZDY S EC MOTOREM**

DESIGN OF POWER, CONTROL AND MEASUREMENT ELECTRONICS FOR AN ELECTRIC  
BRAKE WITH A BLDC MOTOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAN DRBOHLAV**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. VLADISLAV SINGULE, CSc.**

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/13

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Drbohlav

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Návrh výkonové, řídicí a měřicí elektroniky elektrické brzdy s EC motorem**

v anglickém jazyce:

**Design of power, control and measurement electronics for an electric brake with a BLDC motor**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Oblast elektrických pohonů prošla v posledních několika letech, současně s vývojem elektrotechniky a technologií, značnou revolucí. Během ní vznikly nové typy elektrických pohonů a nové způsoby řízení, které vyžadují komplexní řešení řídicí i výkonové elektroniky. Tyristorová můstková zapojení s diskretní řídicí logikou byla nahrazena moderními spínacími tranzistory typu MOSFET a IGBT, řízeními speciálně uzpůsobenými typy signálových procesorů DSP pro řízení elektronicky komutovaných (EC) motorů. Modernizovány byly také systémy ochran, měření a další podpůrné obvody, zvyšující provozní spolehlivost.

Hlavním cílem diplomové práce bude návrh řídicí a výkonové elektroniky určené pro EC motory v kombinaci se vstupně/výstupní jednotkou určenou pro měření provozních veličin. Návrh elektroniky bude optimalizován s ohledem na cílovou oblast nasazení v testovacím stole určeném k testování parametrů a řídicích algoritmů EC motorů – tzv. elektrická brzda. Elektrická brzda bude simulovat dynamické provozní stavy reálných řízených systémů. Vzhledem ke komplexnosti problematiky se pro realizaci vhodné části funkcionality nevyklučuje využití hotových HW subsystémů.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se a uvedení obecných fyzikálních vlastností EC motorů
2. Specifikace požadavků na výkonovou, řídicí a měřicí elektroniku
3. Návrh schématu v programovém prostředí Eagle
4. Návrh desky plošných spojů
5. Oživení navržené elektroniky a kontrola správné funkce
6. Ověření funkčnosti v cílové aplikaci

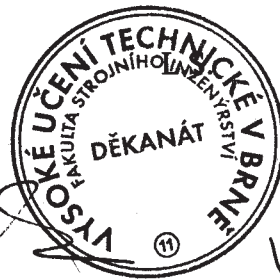
Seznam odborné literatury:

- [1] Skalický, J.: Elektrické servopohony. Skripta VUT v Brně, FEKT, 2001
- [2] Microchip Technology Inc.: <http://www.microchip.com/>, Motor Control
- [3] Microchip, dsPIC30F6010/6015 Data Sheet, <http://www.microchip.com/>

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 26.11.2012



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem řídicí, měřicí a výkonové elektroniky pracoviště určeného pro dynamické zatěžování elektronicky komutovaných motorů pomocí elektrické brzdy. Po porovnání výhod a nevýhod možných koncepcí se návrh zaměřuje na elektrickou brzdou pracující v generátorickém režimu a velikost zátěže je řízena proudem disipovaným umělou zátěží.

## **Klíčová slova**

Elektrická brzda, elektromotor, EC motor, BLDC motor, generátor, umělá zátěž.

## **Abstract**

This paper describes the design of control, measurement and power electronics department for dynamic loading of electronically commutated motors with electric brakes. After comparing the advantages and disadvantages of possible conceptions the proposal focuses on electric brake operating in generator mode and the value of load is controlled by the current dissipated in a dummy load.

## **Key words**

Electric brake, electric motor, EC motor, BLDC motor, generator, dummy load.

## **Bibliografická citace práce:**

DRBOHLAV, J. *Návrh výkonové, řídicí a měřicí elektroniky elektrické brzdy s EC motorem*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a za využití znalostí získaných v průběhu studia a z uvedených pramenů a literaturu.

V Brně, 23.5.2013

.....  
Bc. Jan Drbohlav

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své práce, doc. Ing. Vladislavu Singulemu, CSc a Ing. Janu Hrbáčkovi za mnoho odborných rad a připomínek, Bc. Martinu Fialovi, bez jehož spolupráce by tato práce nebyla kompletní.





## Obsah:

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>Formulace problému a cíle práce</b>	<b>13</b>
<b>3.</b>	<b>Elektrické stroje</b>	<b>15</b>
3.1	Princip činnosti elektromotoru	15
3.2	Střídavé elektromotory	15
3.2.1	Synchronní elektromotor	16
3.2.2	Asynchronní elektromotor	17
3.3	Stejnoseměrné stroje	18
3.3.1	Komutátorový elektromotor	18
3.3.2	Elektronicky komutovaný motor	20
<b>4.</b>	<b>Elektrická brzda s EC motorem</b>	<b>23</b>
4.1	Motorický režim	23
4.2	Generátorický režim	24
<b>5</b>	<b>Výkonová elektronika</b>	<b>25</b>
5.1	Usměrňovač	25
5.1.1	Návrh schematu	26
5.1.2	Ověření funkčnosti	29
5.2	Umělá zátěž	30
5.2.1	Návrh schematu	30
5.2.2	Tepelná rozvaha	31
5.2.3	Ověření funkčnosti	33
5.2.4	Úpravy koncepce	33
5.2.5	Ověření funkčnosti upravené koncepce	34
<b>6</b>	<b>Měřicí a řídicí elektronika</b>	<b>37</b>
6.1	Mikroprocesor dsPIC30F6015	37
6.2	Procesorová jednotka	38
6.2.1	Napájení	38
6.2.2	Komunikace s PC	38
6.2.3	Patice pro procesorovou jednotku	39
6.3	Externí měřicí zařízení	40
6.3.1	Měření zátěžného momentu	40
6.3.2	Měření otáček motoru	41
6.3.3	Měření proudu a napětí	41
<b>7</b>	<b>Zapojení cílové aplikace</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Ověření funkčnosti zvolené koncepce na cílové aplikaci</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>47</b>

<b>Použitá literatura</b> .....	<b>49</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>51</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>53</b>

# 1. Úvod

V rámci projektu CAAE Technologické agentury ČR č. TA0201025 bylo na VUT vytvořeno zadání na vytvoření pracoviště určeného pro dynamické zatěžování elektromotorů podle nastavitelných momentových charakteristik. Zdůrazněn byl požadavek, podle kterého má být zátěžný moment vytvořen působením elektronicky komutovaného motoru připojeného k testovanému motoru. Velikost zátěže bude ovládána pomocí jednotky obsahující signálový mikroprocesor dsPIC.

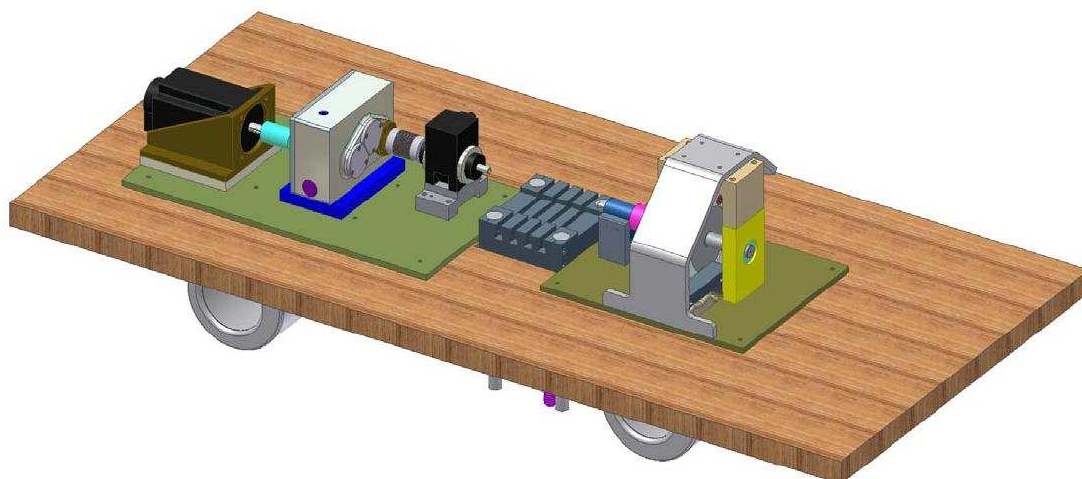
Zadání bylo rozděleno na dílčí práce s různou náplní. Tato práce popisuje návrh výkonové, řídicí a měřicí elektroniky testovacího pracoviště zvolené koncepce. Software pro měření a zpracování potřebných veličin, řízení velikosti zátěže a uživatelské rozhraní umožňující nastavit průběh zatěžování vytvořil v rámci své diplomové práce Bc. Martin Fiala [18]. Mechanickou konstrukcí pracoviště se v rámci své bakalářské práce zabýval pan Peter Lacko [22].

Požadovaným společným výstupem všech tří prací je tedy realizace a otestování funkčnosti pracoviště na základě zvolené zatěžovací charakteristiky elektromotoru.



## 2. Formulace problému a cíle práce

V rámci řešení projektu CESAR bylo firmou UNIS, a. s. vytvořeno stanoviště pro testování EC motorů do výkonu 1.5 kW a 40 000 ot/min skládající se z mechanické brzdy, elektrické brzdy, měřicí a záznamové jednotky s displejem (viz Obr. 2.1).



Obr. 2.1 3D model stanoviště s mechanickou a elektrickou brzdou [23]

Základ mechanické brzdy byl vytvořen brzdým diskem a čelistí ovládanou lineárním elektromotorem. Elektrická brzda byla tvořena EC motorem a převodovkou. Obě části měly na vstupní hřídeli snímač krouticího momentu a v závislosti na uchycení testovaného motoru zatěžovala jen jedna z těchto částí.

Na základě zkušeností s tímto stanovištěm byly sestaveny požadavky na nové testovací stanoviště:

- zátěž bude tvořena jen elektrickou brzdou s maximálním zátěžným výkonem 1 kW, zátěžným momentem v rozsahu 0 - 2 Nm a s otáčkovým rozsahem 0 - 10 000 ot/min
- pracoviště bude umožňovat spojitě zatěžovat testovaný motor od nejnižších otáček
- měřicí jednotka bude komunikovat s PC a měřit moment a otáčky testovaného motoru
- pracoviště musí být maximálně modulární, aby bylo možné v případě potřeby vyměnit některou z částí

Cílem této práce je s ohledem na požadavky zvolit koncepci elektrické brzdy, navrhnout výkonovou, měřicí a řídicí elektroniku, a ověřit její funkčnost na vytvořeném testovacím stanovišti.



### 3. Elektrické stroje

Obecně je elektrický stroj zařízení, jehož účelem je přeměna elektrické energie na mechanickou, mechanické na elektrickou, případně elektrické na elektrickou se změněnými parametry. Vždy je základem vzájemné působení dvou elektromagnetických polí.

Pokud se zaměřím jen na točivé elektrické stroje (elektromotory), lze je rozdělit podle druhu napájení na střídavé a stejnosměrné. Všechny elektromotory mohou pracovat v motorickém režimu, kdy dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou, i v generátorickém režimu, kdy je mechanická energie přeměňována na elektrickou.

#### 3.1 Princip činnosti elektromotoru

Mechanický moment, nebo též silové působení, mezi rotorem a statorem je výsledkem vzájemného posuvu jejich magnetických polí. Velikost působící síly popisuje vztah pro Lorentzovu sílu  $F_B$  působící na vodič protékaný proudem umístěný v magnetickém poli:

$$F_B = i \cdot l \cdot B \cdot \sin\alpha \quad 3.1$$

Kde  $I$  značí velikost proudu vodičem,  $l$  délku vodiče umístěného v magnetickém poli  $B$  a  $\alpha$  úhel mezi vodičem a směrem působení magnetického pole.

Protože u elektromotorů působí síla na smyčku, ne jen na přímý vodič, silové působení na jednotlivé poloviny smyčky o poloměru  $r$  má stejnou velikost a opačný směr, a vytváří moment  $M_B$  o velikosti:

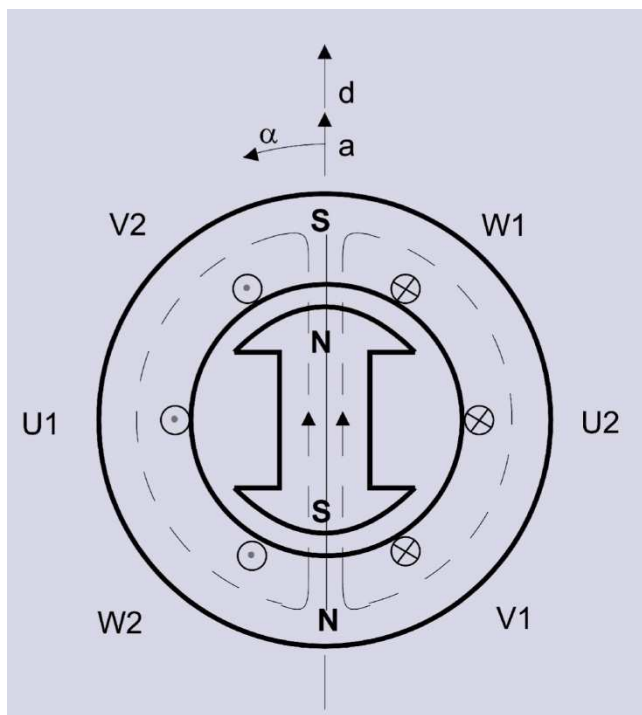
$$M_B = 2 \cdot F_B \cdot r \quad 3.2$$

#### 3.2 Střídavé elektromotory

Základem pohybu střídavých elektromotorů je točivé magnetické pole vytvářené střídavým proudem napájeným statorem.

### 3.2.1 Synchronní elektromotor

Rotor synchronního elektromotoru je tvořen stejnosměrným elektromagnetem a otáčí se synchronně s točivým magnetickým polem vytvářeným statorem. Stator je tvořen jednotlivými napájecími cívkami umístěnými ve statorových drážkách, po  $120^\circ$  v případě 2 pólového stroje – Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Princip synchronního stroje [5]

Synchronní rychlost otáčení  $n_s$  lze určit z počtu pólových dvojic  $p$  motoru a frekvence napájení  $f$ :

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad 3.3$$

Chování synchronního stroje lze popsat matematickým modelem tvořeným rovnicemi:

$$\begin{aligned} u_{x,y,z} &= R_S \cdot i_{x,y,z} + \frac{d\psi_{x,y,z}}{dt} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_f \cdot I_s = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_Z \end{aligned} \quad 3.4$$

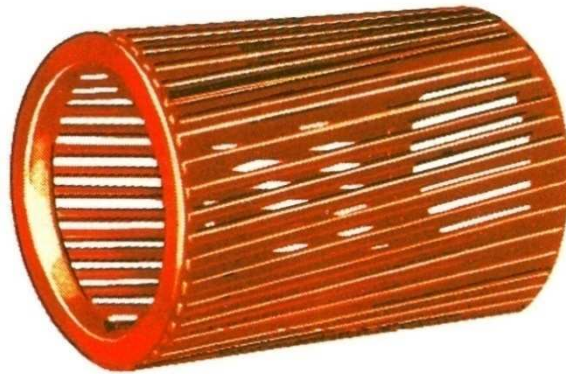
$u_{a,b,c}$  popisuje okamžité hodnoty napětí připojeného na vinutí statoru,  $R_S$  odpor statorového vinutí.  $i_{a,b,c}$  okamžité hodnoty proudu vinutím,  $\psi_{a,b,c}$  okamžitá hodnota spráženého magnetického toku fáze,  $M$  elektrický moment stroje,  $\psi_f$  magnetický tok daný buzením,  $I_s$  amplituda statorového proudu,  $J$  moment setrvačnosti rotoru,  $\omega$  otáčky rotoru a  $M_Z$  velikost mechanické zátěže.



Velkou nevýhodou synchronního motoru je neschopnost roztočení po připojení na napájení o frekvenci odpovídající požadovaným otáčkám. Pro rozběh je tedy nutné použít další motor, rozběhové vinutí na rotoru, které umožňuje při vypnutém buzení elektromagnetu na rotoru rozbíhat synchronní stroj stejně jako asynchronní, případně frekvenční měnič upravující napájecí kmitočet podle aktuálního stavu motoru, požadovaných otáček a zatížení.

### 3.2.2 Asynchronní elektromotor

Asynchronní elektromotor je konstrukčně obdobný jako synchronní elektromotor, rozdíl je v rotoru, kde je namísto elektromagnetu umístěno klecové vinutí (Obr. 3.2) tvořené vodivými tyčemi umístěnými v drážkách rotoru a na koncích spojenými zkratovacími kroužky, nebo trojfázové vinutí vyvedené na sběrací kroužky umožňující připojit rotorové vinutí k externím nastavitelným rezistorům (Obr. 3.3)



Obr. 3.2 Klecové vinutí kotvy asynchronního motoru [6]



Obr. 3.3 Kroužková kotva asynchronního motoru [6]

Pokud se rotor neotáčí stejnými otáčkami jako stator, v rotorovém vinutí se indukuje elektrický proud přímo úměrný rozdílu mezi otáčkami rotoru a točivého magnetického pole (synchronních otáček), čímž vzniká mechanický moment [1]. Pokud by se rotor otáčel synchronními otáčkami, mechanický moment na rotoru by byl nulový. Vlivem setrvačnosti a tření bude vždy rychlost rotoru  $\omega$  rozdílná od synchronních otáček  $\omega_s$ , což je charakterizováno skluzem  $s$ :

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad 3.5$$

Napětíové rovnice matematického modelu lze popsat obdobným matematickým modelem, jako v případě synchronního stroje, momentová rovnice je dána Klossovým vztahem:

$$M = \frac{2 \cdot M_b}{\frac{s}{s_b} + \frac{s_b}{s}} \quad 3.6$$

Kde  $s_b$  značí skluz zvratu a  $M_b$  značí maximální moment, nebo též moment zvratu.

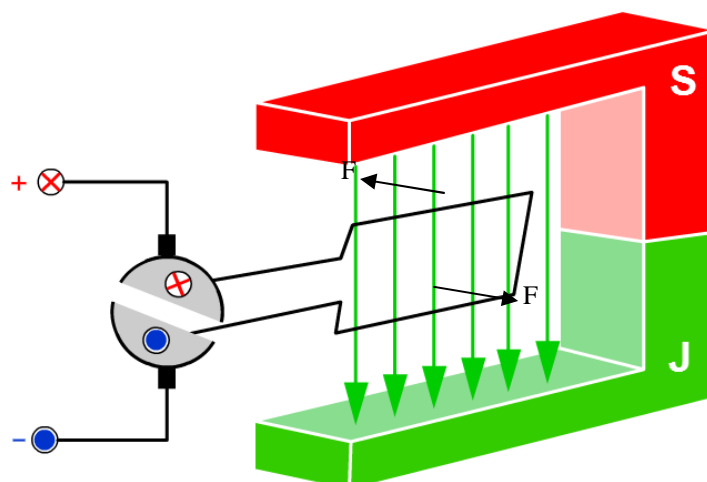
### 3.3 Stejnoseměrné stroje

Na rozdíl od střídavých strojů je pracovní vinutí je napájeno stejnosměrně. Rychlost otáčení motoru je dána amplitudou napětí připojeného napájení, zatímco moment motoru velikostí proudu rotorem. Směr otáčení stejnosměrného stroje je dán polaritou napájení a velikostí zátěže.

#### 3.3.1 Komutátorový elektromotor

Stejnoseměrný elektromotor, nebo též DC motor (direct current), má stator tvořen magnetickým budícím obvodem a rotor cívkou, na kterou je přes komutátor přivedeno stejnosměrné napájení.

Komutátor je mechanický přepínač, který na cívku rotoru připojuje napájení o takové polaritě, aby mezi státorem a rotorem vznikalo magnetické pole, které dle Lorentzova zákona (3.1) vytváří sílu způsobující otáčení (Obr. 3.). Při přepínání polarit proudu komutátorem může, zvláště ve vyšších rychlostech, vznikat nežádoucí jiskření, které vede k elektromagnetickému rušení, a mechanickému poškození kartáčů připojujících napájení na komutátor. Při vysokých rychlostech navíc hrozí ztráta elektrického kontaktu mezi komutátorem a kartáči.



Obr. 3.4 Schema principu DC motoru [6]

Podle druhu budicího obvodu je možné DC motory rozdělit do několika skupin:

- s permanentními magnety – konstrukčně nejjednodušší provedení, u kterého je budicí obvod tvořen permanentními magnety umístěnými na statoru.
- cizí buzení – budicí obvod je tvořen elektromagnetem napájeným stejnosměrným proudem nezávisle na napájení rotoru, což umožňuje nezávisle řídit napájení motoru a buzení.
- seriové buzení – budicí obvod je tvořen elektromagnetem, jehož napájení je zapojeno seriově s napájením rotoru. Mechanický moment je u tohoto typu buzení nepřímo úměrný otáčkám rotoru.
- derivační buzení – elektromagnet má, na rozdíl od seriově buzeného motoru, napájení připojeno paralelně k rotoru. Výhoda oproti seriovému buzení je v lineární závislosti momentu na otáčkách, nevýhoda v menším záběrném momentu.
- kompaundní buzení – je tvořeno seriově i paralelně zapojeným vinutím k rotoru. Při souhlasném působení obou částí buzení se spojí výhody seriového buzení a derivačního buzení. Při nesouhlasném působení buzení motor pracuje v konstantních otáčkách při proměnné zátěži.

Chování stejnosměrného motoru lze popsat matematickým modelem tvořeným rovnicemi:

$$\begin{aligned}
 u_a &= R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + c\phi \cdot \omega \\
 M &= c\phi \cdot i_a = M_Z + J \cdot \frac{d\omega}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

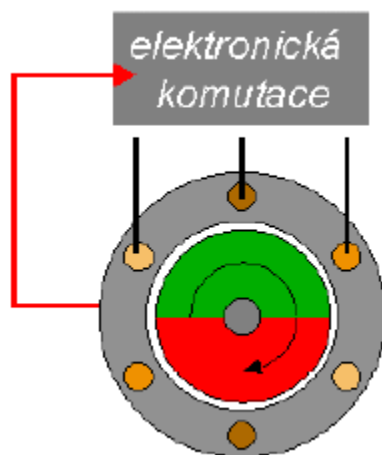
$U_a$  je napětí připojené na vinutí kotvy,  $R_a$  odpor vinutí kotvy,  $i_a$  proud kotvou,  $L_a$  indukčnost kotvy a  $c\Phi$  konstanta motoru.

### 3.3.2 Elektronicky komutovaný motor

Elektronicky komutovaný motor, označovaný jako EC (electronic comutated) nebo BLDC motor (brushless direct current), je principiálně otočený DC motor s permanentními magnety a konstrukčně blízký synchronnímu motoru s permanentními magnety. Jak je patrné z Obr. 3., na rozdíl od DC motoru jsou permanentní magnety umístěny na hřídeli rotoru a pracovní vinutí, většinou trojfázové, je na statoru.

Rozdíl oproti synchronnímu motoru je v pólovém krytí a s ním spojenou komutací. Pólové krytí je poměrem obvodu pólových nástavců a celkového obvodu vzduchové mezery. U synchronních motorů je přibližně  $\frac{2}{3}$ , u elektronicky komutovaných motorů je rovno jedné.

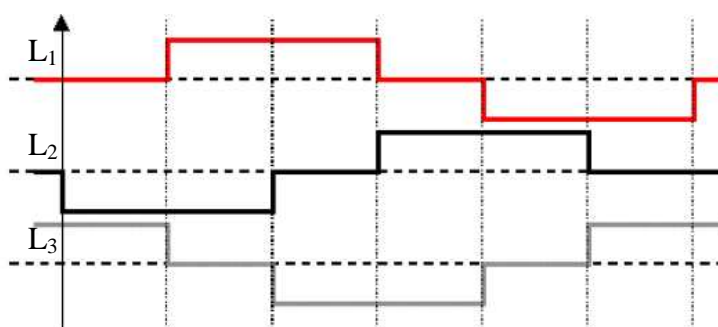
Aby docházelo k pohybu, je třeba zajistit posuv magnetického pole rotoru a statoru. Toho se u elektronicky komutovaného motoru dosahuje přepínáním napájení mezi jednotlivými vinutími v potřebný časový okamžik. EC motor se tedy neobejde bez řídicí elektroniky, která zprostředkovává komutaci bez použití mechanických přepínačů. Je tedy nutné snímat polohu rotoru, aby komutace probíhala ve správných okamžicích. Poloha bývá určena pomocí 3 Hallových sond umístěných na statoru po  $120^\circ$ , které snímají polohu rotoru na základě velikosti magnetického pole permanentního magnetu na rotoru. V případě, kdy je nutné snímat polohu přesněji, bývá použit resolver, nebo inkrementální enkodér.



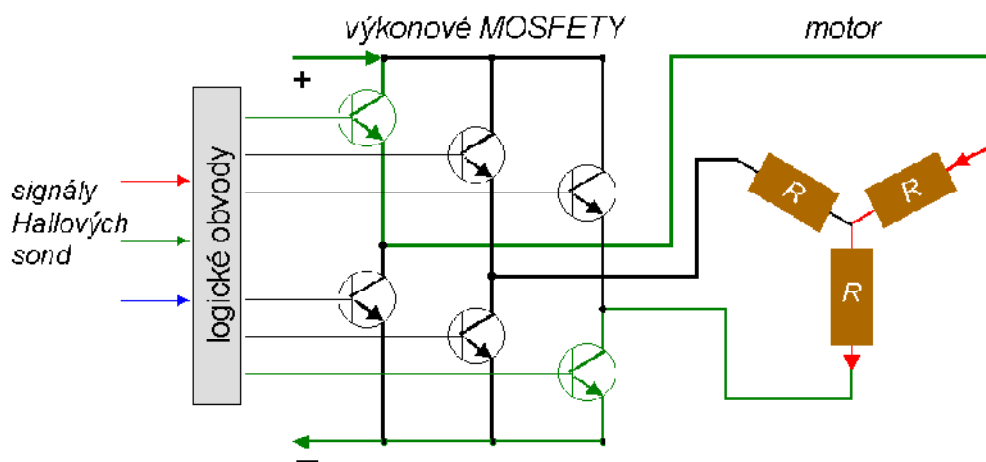
Obr. 3.5 Schema konstrukčního uspořádání EC motoru [7]

Řídicí a výkonová elektronika na základě informace o poloze rotoru zajišťuje napájení pracovních vinutí na statoru proudem s obdélníkovým průběhem (Obr. 3.), který vždy protéká přes dvojici vinutí na statoru.

Amplituda napětí určující rychlost otáčení motoru je řízena střídou PWM, která určuje střední hodnotu napětí na základě poměru doby sepnutí a rozepnutí tranzistoru. Blokové schéma elektroniky komutace je na Obr. 3.. Logické obvody na základě informací o poloze rotoru spínají příslušné tranzistory měniče a připojují jednotlivá vinutí statoru bez rizika vzniku jiskření na komutátoru.



Obr. 3.6 Průběh proudu jednotlivými fázemi vinutí [7]



Obr. 3.7 Blokové schéma elektroniky komutace [7]

Chování elektronicky komutovaného motoru lze popsat rovnicemi tvořícími obdobný matematický model, jako v případě DC motoru. Rozdíl je v tom, že proud vždy prochází dvojicí vinutí v jeden okamžik.

$$\begin{aligned}
 u &= 2 \cdot R \cdot i + 2 \cdot L \cdot \frac{di}{dt} + 2 \cdot c\phi \cdot \omega \\
 M &= 2 \cdot c\phi \cdot \omega = M_Z + J \cdot \frac{d\omega}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$



## 4. Elektrická brzda s EC motorem

Elektrická brzda je zařízení, které má za účel vytvářet zátěžný moment pro testovaný motor. Na rozdíl od mechanické brzdy není zátěž vytvářena změnou velikosti tření, ale pomocí elektrického proudu, který je přímo úměrný krouticímu momentu brzdného EC motoru připojeného k testovanému motoru. Jako brzdný motor byl firmou UNIS, a. s. dodán 150W 24V EC motor Maxon EC45 136204 s maximální rychlostí 10500 otáček/min.

Aby byl testovaný motor zatěžovaný jen brzdným momentem, je vhodné omezit celkovou setrvačnost zatěžovací soustavy použitím brzdného motoru bez převodovky a dalších mechanických komponent. Velikost momentu zátěže bude řídit procesorová jednotka, která zajistí i zpracování měřených veličin a komunikaci s ovládacím počítačem.

Brzdný moment, který je daný proudem protékajícím vinutím motoru, je možné vytvářet motoricky, nebo generátoricky.

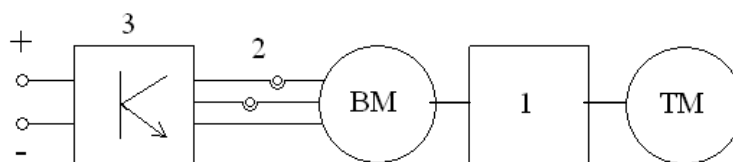
### 4.1 Motorický režim

V motorickém režimu je moment vytvářen napájením brzdného EC motoru tak, aby byl vytvářen moment působící proti směru otáčení. Například v nulových otáčkách brzda může vytvářet stejně velký krouticí moment jako testovaný motor a nedovolí jeho roztočení.

Výkonová a měřicí elektronika pro tuto koncepci musí obsahovat trojfázový tranzistorový měnič, který na základě aktuální polohy rotoru připojuje napájení k jednotlivým vinutím statoru, snímání polohy rotoru a proudu alespoň na dvou fázích. Zátěžný moment je možné určit z velikosti fázového proudu a konstanty motoru, případně z momentového čidla.

Výhodou je možnost zatěžování od nulových otáček a možnost zatěžovat testovaný motor bržděním i roztáčením.

Nevýhodou je zvlnění momentu motoru při snímání polohy Hallovy sondami, případně nároky na logické obvody při snímání polohy enkodérem.



Obr. 4.1 Blokové schéma motorického režimu elektrické brzdy.

TM – testovaný motor, BM – brzdný motor

1 – snímač momentu, 2 – snímače proudu, 3 – tranzistorový měnič

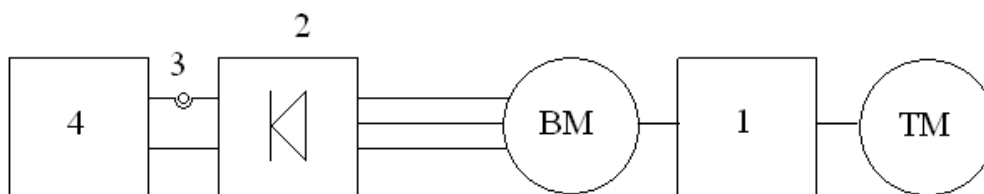
## 4.2 Generátorický režim

U generátorického režimu je zátěžný moment vytvářen odebíraným proudem z brzdného EC motoru poháněného testovaným motorem. V tomto případě tedy nebude možné zatěžovat testovaný motor při rozběhu.

Výkonová elektronika musí obsahovat usměrňovač a řízený obvod pro disipaci elektrického výkonu odebíraného z brzdného motoru, tzv. umělá zátěž. Měřicí elektronika musí snímat otáčky motoru, proud a napětí. Zátěžný moment je opět možné určit z elektrického proudu a konstanty motoru, případně z momentového čidla.

Výhodou je jednoduchost řízení amplitudy proudu odebíraného z brzdného motoru, odstranění potřeby řídit komutaci a nutnosti přesného měření polohy.

Nevýhodou je nemožnost zatěžovat testovaný motor při nulových otáčkách a možnost zatěžovat testovaný motor jen brzděním.



Obr. 4.2 Blokové schéma generátorického režimu elektrické brzdy

TM – testovaný motor, BM – brzdný motor

1 – snímač momentu, 2 – usměrňovač, 3 – snímač proudu, 4 – umělá zátěž.

S ohledem na požadavky zadavatele byla zvolena koncepce pracující v generátorickém režimu.



## 5. Výkonová elektronika

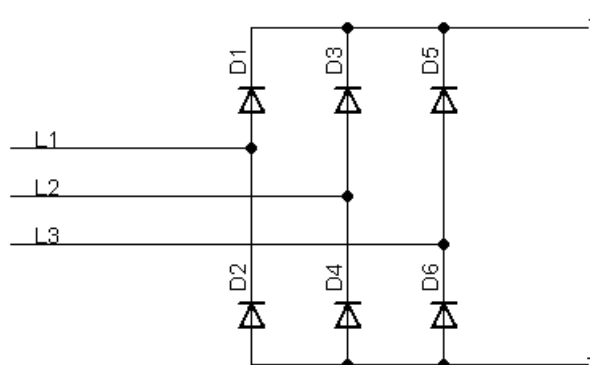
Při návrhu výkonové elektroniky tvořené trojfázovým usměrňovačem a umělou zátěží je potřeba především zohlednit modulárnost testovacího pracoviště a požadované výkonové parametry.

Základním vyměnitelným prvkem je brzdňý motor. Pro co největší rozsah použitelných motorů je potřeba dimenzovat výkonové funkční bloky na co největší napětí a proud s ohledem na běžně dostupné stroje. Protože bude brzdňý motor pracovat v generátorickém režimu a odebíraná elektrická energie bude usměrněna, lze jej považovat za zdroj stejnosměrného napětí.

Maximální výstupní napětí usměrňovače a motoru bylo zvoleno na 50V. Pro splnění požadavku na maximální výkon 1000W bude při maximálním napětí usměrňovače ve stejnosměrném obvodu proud 20A. Při disipaci maximálního požadovaného výkonu při usměrněném napětí 20V bude odebíraný proud 50A. Je tedy potřeba usměrňovač a obvod pro disipaci výkonu dimenzovat na 50V a 50A.

### 5.1 Usměrňovač

Usměrňovač je elektronické zařízení, které má za účel přeměnit střídavý elektrický proud na stejnosměrný. Schema trojfázového neřízeného můstkového šestipulsního usměrňovače s šesti diodami je zobrazeno na Obr. 5.1.

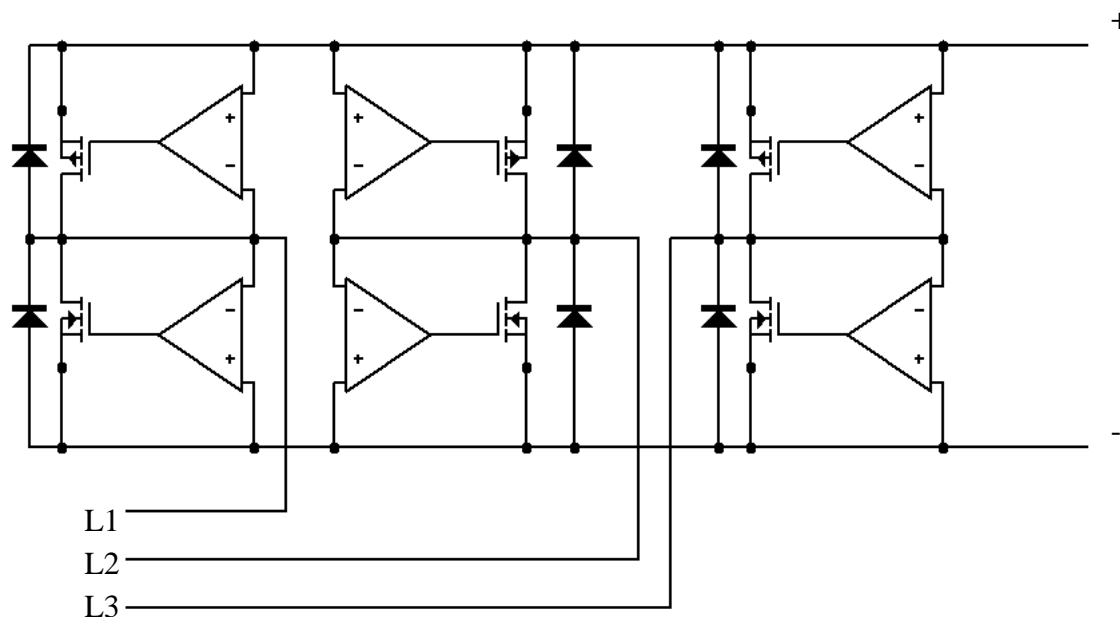


Obr. 5.1 Schema diodového usměrňovače

Hlavní nevýhodou tohoto typu usměrňovače je neřízený úbytek napětí na diodách v propustném směru, což vede k tepelným ztrátám a omezení použitelnosti usměrňovače pro nízká napětí, kdy úbytek napětí na diodách může tvořit většinu elektrické energie dodávané generátorem.

Vhodné řešení tohoto problému nabízí bezeztrátové aktivní tranzistorové usměrňovače. Pro zjednodušení ovládání usměrňovače je vhodné zvolit variantu schopnou pracovat bez externího řízení. Pro nízkovýkonové nízkonapětové aplikace je tato koncepce popsána v článcích [8] a [9], základní schema trojfázového

provedení je zobrazeno na Obr. 5.2. Funkčnost této topologie byla simulačně ověřena v prostředí MicroCap a následně upravena pro vyšší usměrňované výkony.



Obr. 5.2 Základní schema komparátory řízeného usměrňovače s tranzistory MOSFET

### 5.1.1 Návrh schematu

Při uvažovaném maximálním výstupním napětí usměrňovače 50V a maximálním disipovaném výkonu 1kW je třeba usměrňovač dimenzovat na proud o amplitudě 50A a napětí 100V. Zároveň je potřeba volit součástky tak, aby usměrňovač pracoval s co nejmenšími ztrátami a nevytvářel neřízenou zátěž brzdného motoru.

Základ usměrňovače tvoří výkonové unipolární tranzistory. Byly zvoleny tranzistory PSMN3R8-100BS, které jsou typu N-channel MOSFET, jsou schopny spínat napětí 100V, proud 120A a mají odpor otevřeného kanálu 3,9mΩ [10].

Maximální ztrátový výkon na tranzistoru lze určit výpočtem z efektivní hodnoty proudu a odporu otevřeného kanálu. Efektivní hodnota proudu je pro jednotlivé pro jednotlivé tranzistory, resp. větve usměrňovače, dána charakterem protékajícího proudu za periodu, který bude mít v jedné půlperiodě sinusový průběh a v druhé bude proud nulový:

$$I_{ef} = I_{max} \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \int_0^{\pi} \sin^2(t) dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right)} = \frac{I_{max}}{2} = \frac{50A}{2} = 25A \quad 5.1$$

Ztrátový výkon na jednotlivých tranzistorech:

$$P_z = R_{DSon} \cdot I_{ef}^2 = 3,9m\Omega \cdot 25^2 A = 2.4375W \quad 5.2$$

Takový ztrátový výkon bude tranzistor schopen chladit bez připojeného chladiče.

Úbytek napětí na sepnutém tranzistoru při maximální amplitudě proudu lze určit z Ohmova zákona:

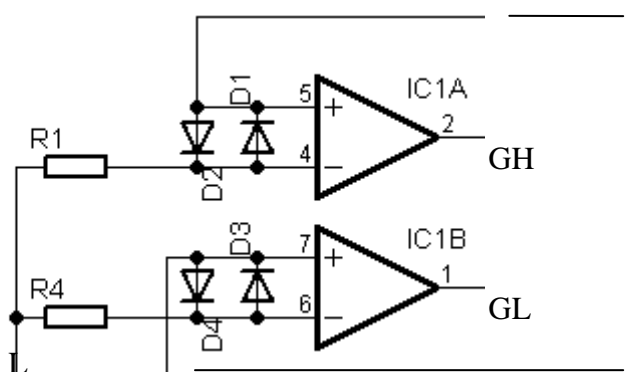
$$U = R_{DSon} \cdot I_{max} = 3,9m\Omega \cdot 50A = 0,195V \quad 5.3$$

Pro splnění nutnosti rychlého otevření a zavření tranzistoru, které je typicky 100ns, a celkového náboje potřebného pro otevření tranzistoru 170nC [10] je potřeba špičkově dodat elektrický proud:

$$I_G = \frac{dQ}{dt} = \frac{170nC}{100ns} = 1,7A \quad 5.4$$

Výkonové usměrňovací diody byly zvoleny shottkyho diody DSSK 80-0045B se dvěma diodami v jednom pouzdře a společnou katodou. Úbytek napětí v propustném směru je 0,45V [11], z čehož plyne, že na celém uvažovaném pracovním rozsahu usměrňovače budou hlavním prvkem pro vedení proudu tranzistory.

Tranzistory jsou ovládány komparátory, které porovnávají aktuální hodnotu napětí na fázi generátoru s výstupním napětím usměrňovače. Pro rozdíl napětí na vstupech komparátoru vyšší než napájecí je nutné jej omezit. Pro toto omezení byly mezi invertující a neinvertující vstup komparátoru vloženy antiparalelně zapojené usměrňovací diody s úbytkem napětí v propustném směru 1V. Pro omezení proudu diodami jsou na vstupech připojených k vinutí brzděného motoru předřazeny 1kΩ rezistory.

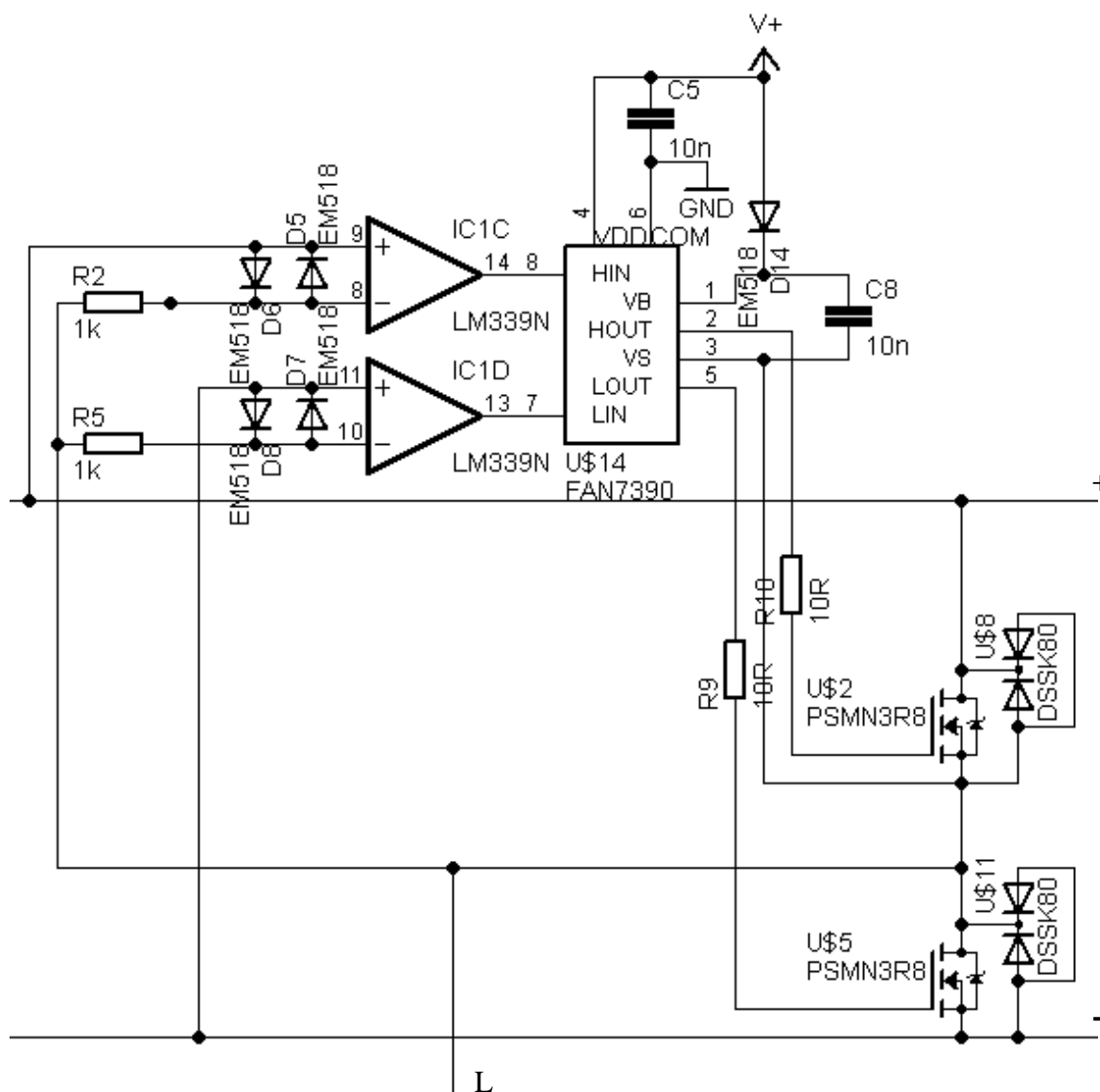


Obr. 5.3 Schema zapojení komparátorů

Zvolen byl integrovaný obvod LM339N, který v jednom pouzdře obsahuje 4 komparátory. Pro napájení požaduje stejnosměrný zdroj napětí v rozmezí 2~36V, maximální napětí na výstupu komparátoru je o 1,5V nižší než napájení a maximální výstupní proud 1 μA. [12]

Vzhledem k požadovanému špičkovému proudu pro otevření/zavření tranzistoru je nutné použít budiče schopné dodat dostatečně velký proud. Požadované vlastnosti splňuje budič pro horní i spodní tranzistor větve FAN7390, který je schopný dodat proud až 4,5A a napájený stejnosměrným zdrojem napětí v rozmezí 10~25V. [13]

Celkové schema jedné fáze usměrňovače je zobrazeno na Obr. 5.4. Kompletní schema spolu s návrhem desky plošného spoje vytvořené v programovém prostředí Eagle jsou v přílohách A-1 a A-2. Seznam potřebných elektronických součástek je v příloze A-3. V případě použití vícefázového stroje lze snadno usměrňovač rozšířit doplněním dalších větví.



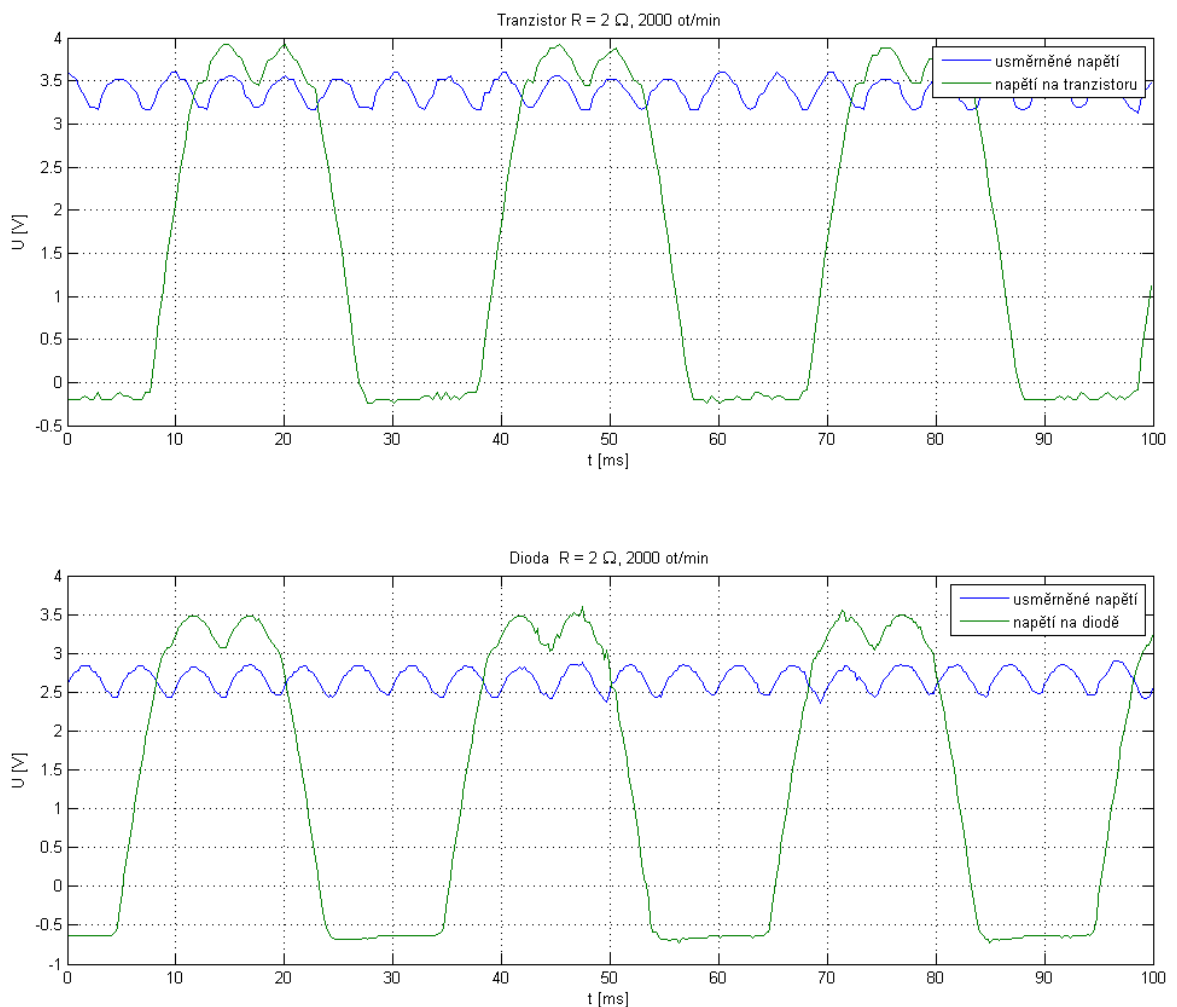
Obr. 5.4 Schema zapojení jedné fáze usměrňovače

## 5.1.2 Ověření funkčnosti

Pro ověření funkčnosti byl usměrňovač připojen k zátěžnému motoru s výstupem připojeným na výkonový reostat. Nejprve byl zátěžný motor roztáčen vrtačkou s možností ovládní otáček v rozsahu 300~3000 otáček/min. Poté byl firmou UNIS, a. s. dodán EC motor řízený přípravkem TPR\_FMP, který umožňuje po připojení k PC ovládat otáčky v rozsahu 0~10000 otáček/min. Více informací o přípravku TPR\_FMP je uvedeno v [14].

Z porovnání průběhu napětí měřeného na diodovém a tranzistorovém usměrňovači při připojeném odporu  $R = 2\Omega$  při rychlosti 2000 otáček/min. (Obr. 5.5) je u tranzistorového usměrňovače zřejmý výrazně menší úbytek napětí v propustném směru a vyšší hodnota usměrněného napětí.

Průběhy napětí naměřené na obou usměrňovačích naprázdno, s  $2\Omega$  a  $12\Omega$  zátěží při 2000, 4000 a 10000 otáček/min. jsou zobrazeny na Obr. B1-B9 v příloze B.



Obr. 5.5 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměrňovači

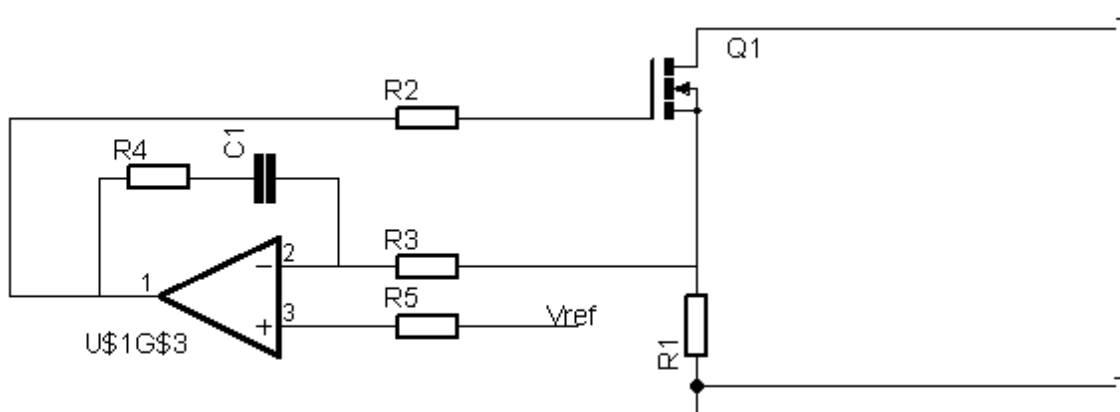
## 5.2 Umělá zátěž

Umělá zátěž je elektronické zařízení, které na základě řídicího signálu umožňuje měnit elektrický odpor zatěžovacího obvodu. Velikost elektrického odporu je měněna pomocí výkonového tranzistoru řízeného v lineárním režimu.

### 5.2.1 Návrh schematu

Na Obr. 5.6 je základní schema umělé zátěže, které vychází z topologie popsané v [15]. Pracovní bod tranzistoru  $Q1$  je nastaven PI regulátorem s operačním zesilovačem v závislosti na požadovaném proudu zátěží daným referenčním napětím  $V_{ref}$  a aktuální hodnotou proudu měřenou na rezistoru  $R_1$  zajišťující zpětnou vazbu:

$$I = \frac{V_{ref}}{R_1} \quad 5.5$$



Obr. 5.6 Základní schema umělé zátěže s MOSFET tranzistorem

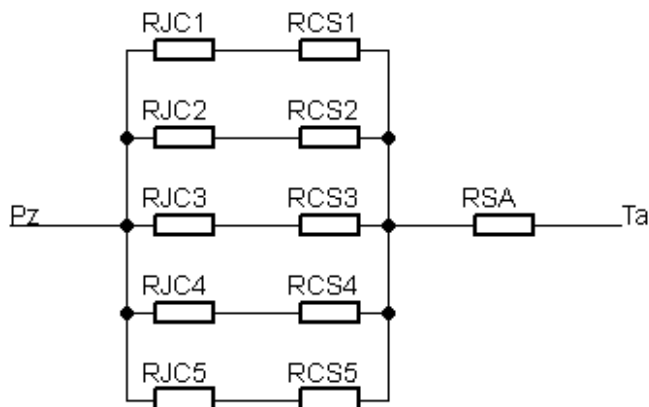
Hodnota  $R_1$  byla zvolena pro minimalizaci neřízené zátěže na  $1\text{m}\Omega$ .

$$\begin{aligned} P_Z &= R_1 \cdot I_{max}^2 = 1\text{m}\Omega \cdot 50^2\text{A}^2 = 2,5\text{W} \\ V_{ref} &= R_1 \cdot I_{max} = 1\text{m}\Omega \cdot 50\text{A} = 50\text{mV} \end{aligned} \quad 5.6$$

Procesorová jednotka umožňuje  $V_{ref}$  nastavovat v rozsahu  $0\sim 5\text{V}$  nastavením střídy PWM pracující na  $1\text{kHz}$ , kterou je nutné filtrovat pro získání analogové hodnoty referenčního napětí. Úbytek napětí na  $R_1$  je tedy stonásobně zesílen neinvertujícím zesilovačem s operačním zesilovačem. V řídicím obvodu umělé zátěže jsou tedy použity dva operační zesilovače. Integrovaný obvod CA3240 obsahuje v jednom pouzdře dvojici nezávislých operačních zesilovačů. Pro správnou funkci požaduje napájení zdrojem stejnosměrného napětí v rozsahu  $2\sim 36\text{V}$ .



Celkový tepelný odpor spojuje tepelné odpory jednotlivých tranzistorů, kontaktních tepelných odporů mezi tranzistory a chladičem, a tepelného odporu chladiče. Celou tepelnou soustavu lze nahradit tepelnou sítí, která má jedinou neznámou, a to tepelný odpor chladiče  $R_{SA}$ :



Obr. 5.8 Náhradní tepelná síť umělé zátěže

Hodnota tepelného odporu pouzdra tranzistoru IRFP4110  $R_{jc} = 0,35 \text{ K/W}$ , přechodový tepelný odpor mezi pouzdem tranzistoru a chladičem  $R_{cs} = 0,2 \text{ K/W}$ . Celkový tepelný odpor tranzistorů je dán výpočtem:

$$\frac{1}{R_{js}} = 5 \cdot \frac{1}{R_{jc} + R_{cs}} = 5 \cdot \frac{1}{0,35 \text{KW}^{-1} + 0,2 \text{KW}^{-1}} = \frac{5}{0,55 \text{KW}^{-1}} \quad 5.9$$

$$R_{js} = \frac{0,55 \text{KW}^{-1}}{5} = 0,11 \text{KW}^{-1}$$

Potřebný tepelný odpor chladiče je možné určit z maximálního dovoleného tepelného odporu celé soustavy a celkového tepelného odporu tranzistorů připevněných na chladič

$$R_{sa} = R_{thmax} - R_{js} = (0,155 - 0,11) \text{KW}^{-1} = 0,045 \text{KW}^{-1} \quad 5.10$$

Protože v současnosti na testovacím pracovišti je použit brzdý motor o výkonu 150W, byl z ekonomických důvodů vybrán chladič s tepelným odporem 1K/W, který je dle výpočtu schopný chladit výkon:

$$P = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{\Delta T}{R_{sa} + R_{js}} = \frac{155 \text{K}}{(1 + 0,11) \text{KW}^{-1}} = 140,9 \text{W} \quad 5.11$$

Pro navýšení maximálního disipovaného výkonu bude k chladiči připojena dvojice ventilátorů. V případě potřeby chlazení vyšších výkonů bude chladič vyměněn dle aktuálních požadavků.



### 5.2.3 Ověření funkčnosti

Funkčnost byla ověřena připojením umělé zátěže na zdroj stejnosměrného napětí a požadován konstantní proud. Obvod se místo správné funkce rozkmital a po krátké době došlo k průrazu tranzistoru. Problém byl pravděpodobně způsoben šumem na 1mΩ rezistoru, který po stonásobném zesílení převážil nad měřeným úbytkem napětí.

Tento problém byl odstraněn použitím výkonového rezistoru 100mΩ a odpojením zesilovače úbytku napětí na tomto rezistoru. Projevila se ale nevhodnost vybraných tranzistorů, u kterých docházelo k průrazu už při proudu 3,5A.

### 5.2.4 Úpravy koncepce

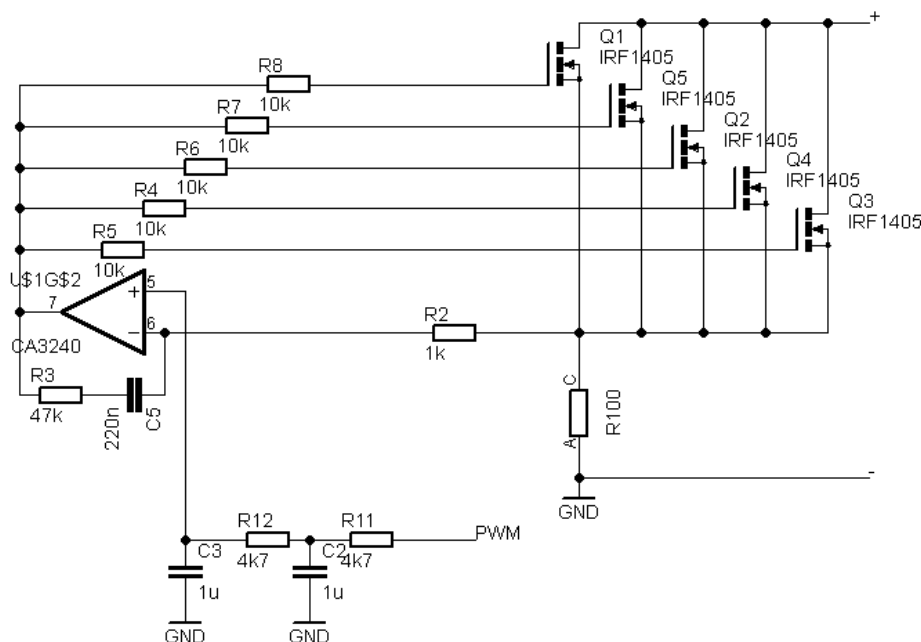
Na základě zjištěných nedostatků bylo schema umělé zátěže upraveno. Kromě změny měřicího rezistoru a odstranění zesilovače byly použity tranzistory IRF1405, které mohou pracovat s napětím do 55V, proudem do 169A a disipovat výkon 330W [17].

Při použití 100mΩ rezistoru na měření proudu budou neřízené ztráty vyšší:

$$\begin{aligned} P_z &= R \cdot I^2 = 100\text{m}\Omega \cdot (20\text{A})^2 = 40\text{W} \\ P_z &= R \cdot I^2 = 100\text{m}\Omega \cdot (50\text{A})^2 = 250\text{W} \end{aligned} \quad 5.12$$

Je tedy nutné resistor připojit na chladič spolu tranzistoru.

Upravené schema je na Obr. 5.9 a v příloze A-5, návrh desky plošného spoje je v příloze A-6, seznam použitých součástek v příloze A-7.

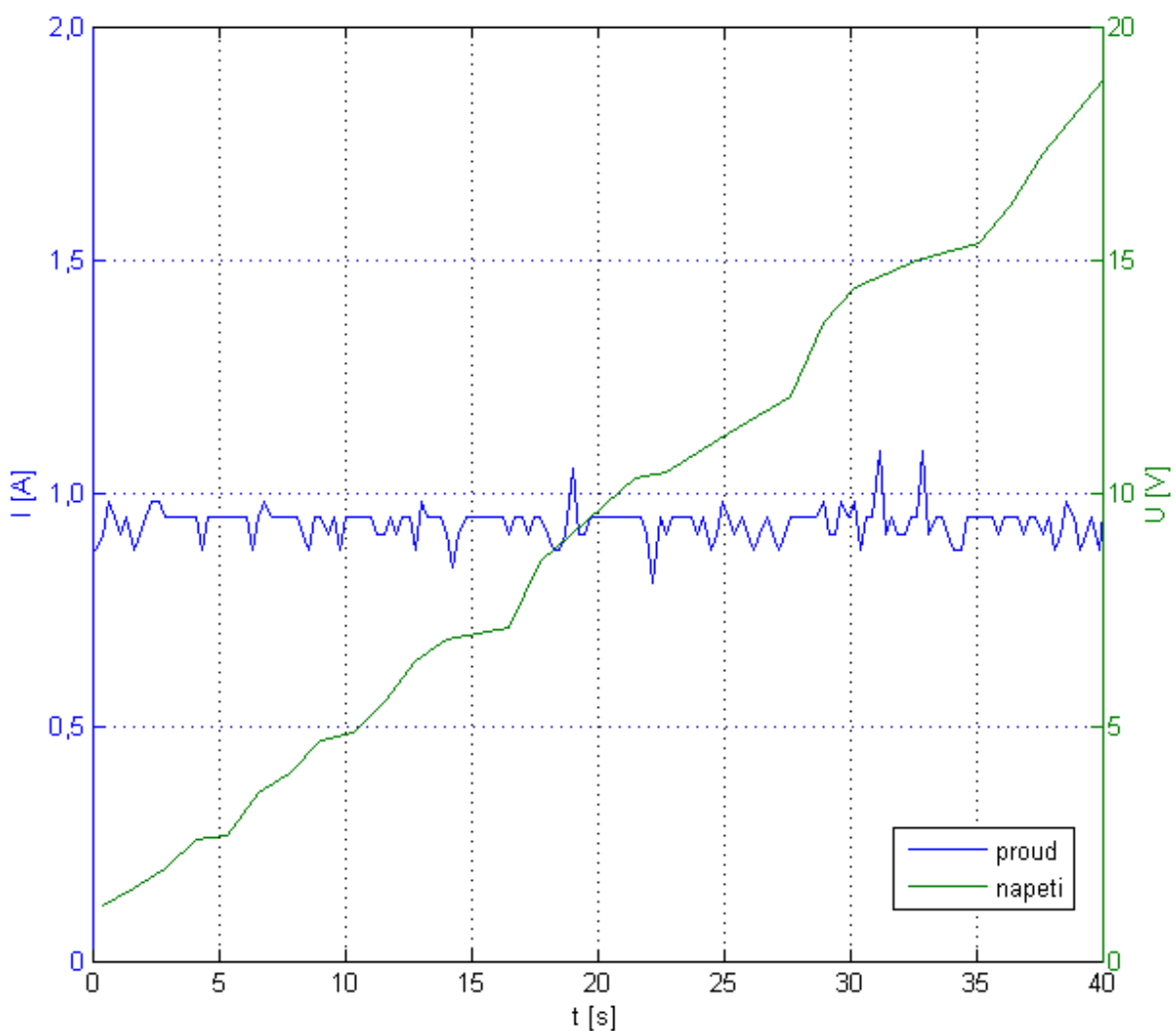


Obr. 5.9 Upravené schema umělé zátěže

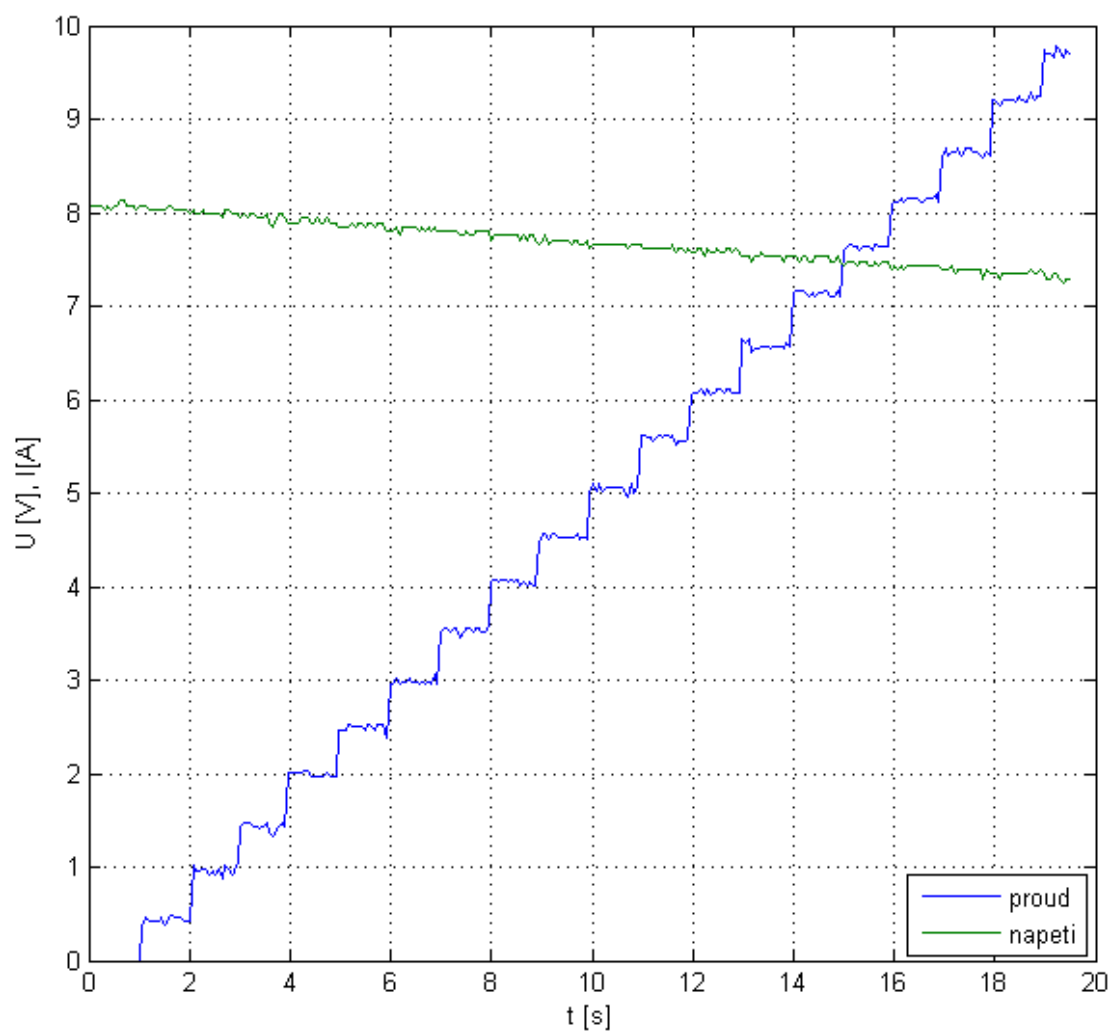
### 5.2.5 Ověření funkčnosti upravené koncepce

Funkčnost byla nejprve ověřena připojením umělé zátěže na zdroj stejnosměrného napětí a procesorovou jednotkou byl nastaven požadovaný konstantní proudem 1A. Na zdroji bylo postupně navyšováno napětí v rozmezí 1~32V. Proud byl PI regulátorem umělé zátěže v celém rozsahu napětí udržován na požadované hodnotě. Na Obr. 5.10 je zobrazen průběh napětíového zatěžování.

Druhým ověřením funkčnosti byl test při konstantním napětí na zdroji. Napětí bylo nastaveno na 8V a proud byl procesorovou jednotkou po 1s zvyšován o 0,5A. Na Obr. 5. 11 je zobrazen průběh proudového zatěžování.



Obr. 5.10 Napětíové zatěžování



Obr. 5. 11 Proudové zatěžování

Při překročení odebraného výkonu o velikosti 150W docházelo k tepelnému průrazu tranzistorů. Potvrdila se tím nutnost připojení ventilátoru k chladiči.



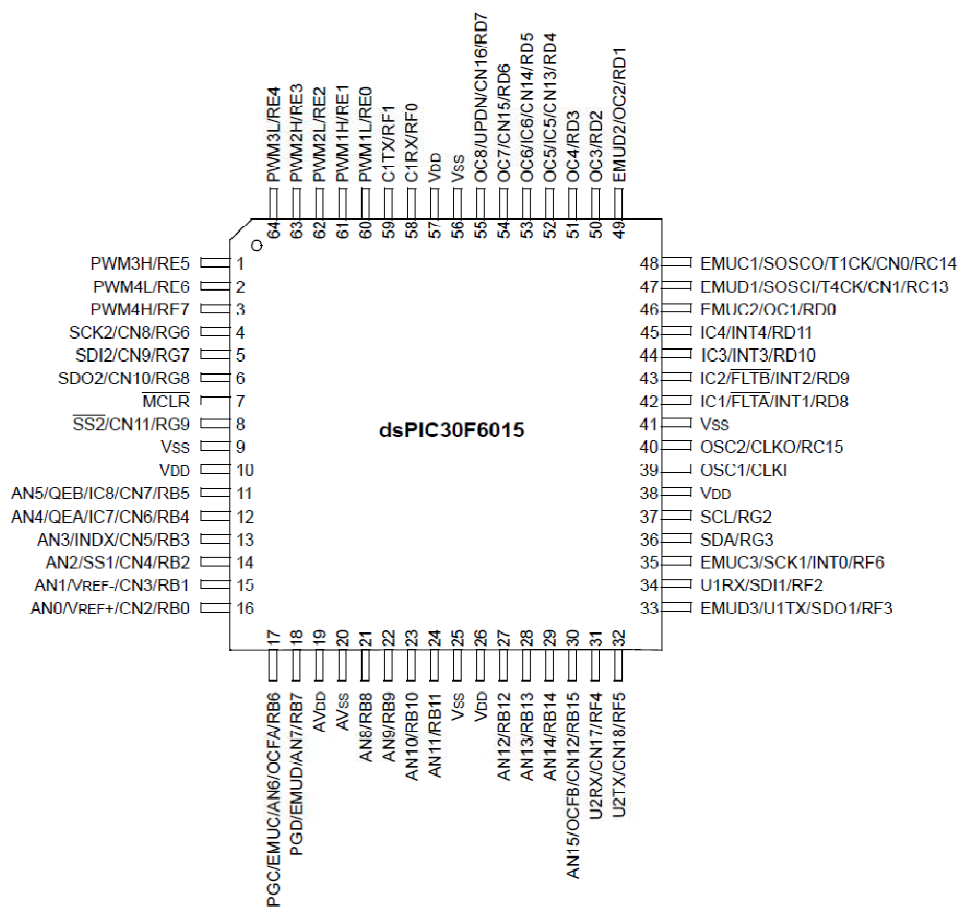
## 6. Měřicí a řídicí elektronika

Základ měřicí a řídicí elektroniky je tvořen procesorovou jednotkou se signálovým mikroprocesorem dsPIC30F6015, umístěným na desce s konektorem pro snazší připojení k cílovému zařízení, která vyhodnocuje měřené veličiny potřebné k řízení elektrické brzdy. Algoritmus pro řízení a měření navrhl v rámci své diplomové práce Bc. Martin Fiala [18] a byl kromě cílové aplikace využit i v průběhu testování a ověřování funkčnosti jednotlivých bloků..

### 6.1 Mikroprocesor dsPIC30F6015

Mikroprocesor dsPIC30F6015 je 16bit digitální signálový procesor postavený na architektuře RISC optimalizovaný na řízení elektromotorů pomocí 4 nezávislých kanálů PWM a dosahující rychlosti až 30 milionů provedených operací za sekundu. Požaduje stejnosměrné napájení v rozsahu 2,5~5,5V, má 52 vstupně-výstupních vývodů pracujících na rozsahu daným napájecím napětím, jejichž funkci je možné nastavit. Schema vývodů je zobrazeno na Obr. 6.1.

Procesor má pro uchovávání instrukční sady 144kB FLASH paměť, 8kB RAM paměť pro uchovávání dat za chodu a 4kB EEPROM paměť pro uchovávání dat po odpojení napájení. Podrobnější informace o procesoru jsou uvedeny v [3].



Obr. 6.1 Schema vývodů mikroprocesoru

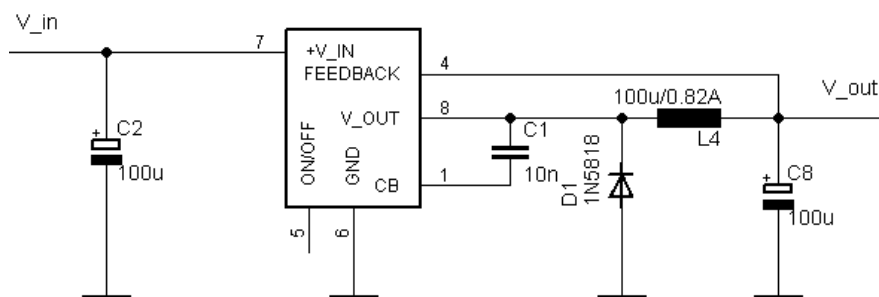
## 6.2 Procesorová jednotka

Procesorovou jednotku je možné rozdělit na několik bloků:

- napájení
- komunikace s PC
- patice pro připojení vstupně-výstupních vývodů

### 6.2.1 Napájení

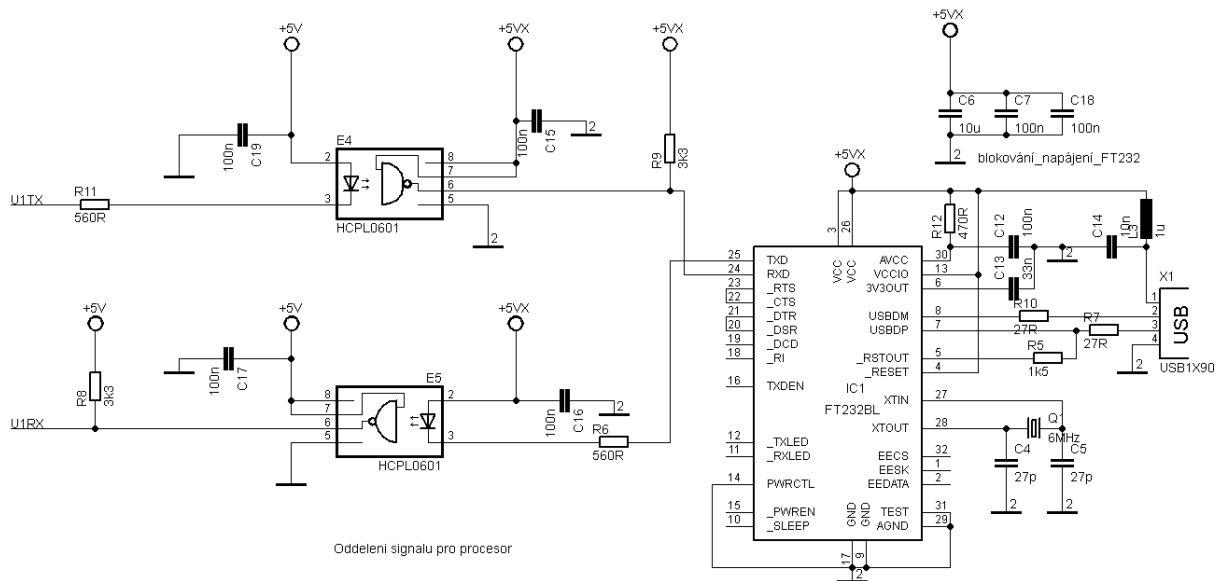
Pro napájení jednotky byl zvolen spínaný snižující regulátor napětí LM2674M-5.0, který má výstupní napětí 5V, proud 0,5A a je schopný pracovat se vstupním napětím v rozsahu 6,5~40V [18]. Schema zapojení je zobrazeno na Obr. 6.2. K výstupu bloku pro napájení je navíc připojena LED dioda pro signalizaci připojeného zdroje napětí a konektor pro případné připojení dalšího zařízení se stejnou požadovanou napájecí hladinou.



Obr. 6.2 Schema zapojení napájecího obvodu

### 6.2.2 Komunikace s PC

Komunikace s PC probíhá přes USB a je galvanicky oddělena. Oddělení zajišťuje dvojice rychlých optočlenů HCPL0601. Převod signálu z procesoru na USB zpracovává jednočipový USB převodník FT232BL, schema zapojení respektuje doporučení výrobce [19]. Blok pro komunikaci s PC je napájen z USB portu počítače.



Obr. 6.3 Schema zapojení bloku pro komunikaci mikroprocesoru s PC

### 6.2.3 Patice pro procesorovou jednotku

Patice pro procesor slouží k vyvedení potřebných vstupně-výstupních vývodů pro snadné připojení externích zařízení. Seznam vývodů a aktuálně připojených zařízení na patici je zobrazen v tabulce 6.1:

Vývod	Funkce	Připojené zařízení	Vývod	Funkce
1	RB11/AN11		2	GND
3	RB9/AN9		4	GND
5	RB0/AN0/CN2	Měření napětí	6	GND
7	RB2/AN2/CN4/SS1	Měření proudu	8	GND
9	RB4/AN4/CN6/IC7/QEA		10	GND
11	PWM4H		12	GND
13	PWM3H		14	GND
15	PWM2H		16	GND
17	PWM1H		18	GND
19	RD1/OC2		20	GND
21	RD3/OC4	Výstup – řízení zátěže	22	GND
23	RD10/INT3/IC3	Měření otáček	24	GND
25	RD8/INT1/IC1/FLTA		26	GND
27	RD9/INT2/IC2/FLTB		28	GND
29	RD2/OC3		30	GND
31	PWM1L		32	GND
33	PWM2L		34	GND
35	PWM3L		36	GND
37	PWM4L		38	GND
39	RB5/AN5/CN7/IC8/QEB		40	GND
41	RB3/AN3/CN5/INDX		42	GND
43	RB1/AN1/CN3	Měření momentu	44	GND
45	RB8/AN8		46	GND
47	RB10/AN10		48	GND
49	RB12/AN12		50	GND

Celkové schema a návrh desky plošného spoje zahrnující funkční bloky popsané v kap. 6.2.1, 6.2.2 a 6.2.3 jsou zobrazeny v příloze A-8 a A-9. Seznam potřebných součástek je uveden v příloze A-10

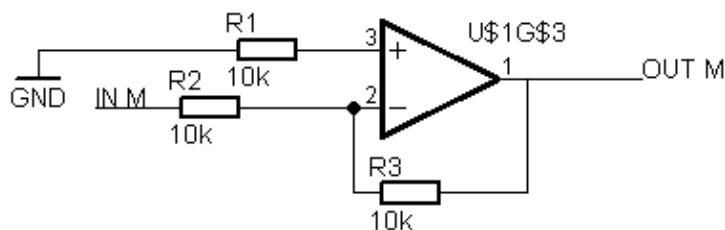
## 6.3 Externí měřicí zařízení

Pro řízení elektrické brzdy zvolené koncepce je nutné měřit zátěžný moment, otáčky motoru, elektrický proud a napětí. Měřené veličiny je pro vstupy procesoru nutné napěťově přizpůsobit do rozsahu 0~5V.

### 6.3.1 Měření zátěžného momentu

Mechanický moment je možné měřit přímo snímačem momentu, nebo určit nepřímou na základě proudu zátěžným motorem.

Dodaný snímač momentu je určený pro měření momentu v rozsahu 0~2Nm při otáčkách 0~40 000 min<sup>-1</sup>, které též umožňuje měřit [20]. Požaduje napájení v rozsahu 20~36V. Výstup momentového čidla je kalibrovaný na 2,5V / 1Nm, polarita napětí je daná směrem měřeného momentu. Při měření momentu v cílové aplikaci je ve snímači měřená hodnota převedena na výstupní napětí o rozsahu 0 ~ -5V, proto je potřeba změnit polaritu napětí. To je možné udělat pomocí invertujícího zapojení operačního zesilovače se zesílením -1. Je tedy potřeba použít operační zesilovač napájený symetrickým zdrojem napětí ±Vcc.



Obr. 6.4 Schema zapojení invertujícího zesilovače pro převrácení polarity napětí

Další možností pro určení zátěžného momentu je výpočet z proudu odebíraného z brzděného motoru při známé konstantě motoru:

$$M = C\Phi \cdot I_a \quad 6.1$$

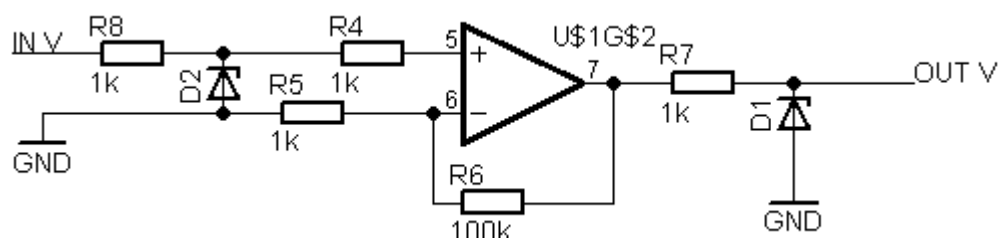
Pro kalibraci měření momentu pomocí proudu byly použity oba způsoby měření, ve finální aplikaci je možné mechanický snímač odpojit a velikost zátěžného momentu vyhodnocovat jen na základě měřeného proudu.



### 6.3.2 Měření otáček motoru

Otáčky motoru je možné měřit počítáním impulsů na Hallových sondách umístěných na brzděném EC motoru, přepočtem ze změny polohy optického enkodéru připojeného na hřídel, nebo z napětí měřených na vinutí motoru. Vždy je měření zpracováno jako změna úhlu natočení za čas, u jednotlivých způsobů je rozdíl v počtu impulsů za jednu otáčku a tedy i v přesnosti měření.

Jako implementačně nejjednodušší bylo vybráno měření rychlosti z napětí na vinutí motoru, kdy jedné otáčky motoru odpovídá jeden impuls. Je realizováno stonásobným neinvertujícím zesilovačem se zenerovou diodou omezující napětí a generující obdélníkový signál s amplitudou 5V pro vstup procesoru. Aby nebylo překročeno dovolené napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem operačního zesilovače, je i mezi vstupy zapojena zenerova dioda.



Obr. 6.5 Schema zapojení obvodu pro měření otáček

Obvody pro napěťové přizpůsobení snímače momentu a pro měření rychlosti byly z důvodu umístění 2 nezávislých operačních zesilovačů do jednoho pouzdra navrženy na jednu desku plošného spoje.

### 6.3.3 Měření proudu a napětí

Měření proudu je realizováno formou měření úbytku napětí na rezistoru umístěného na desce s umělou zátěží. Citlivost měření je 100mV/1A a měřicí rozsah 0~50A.

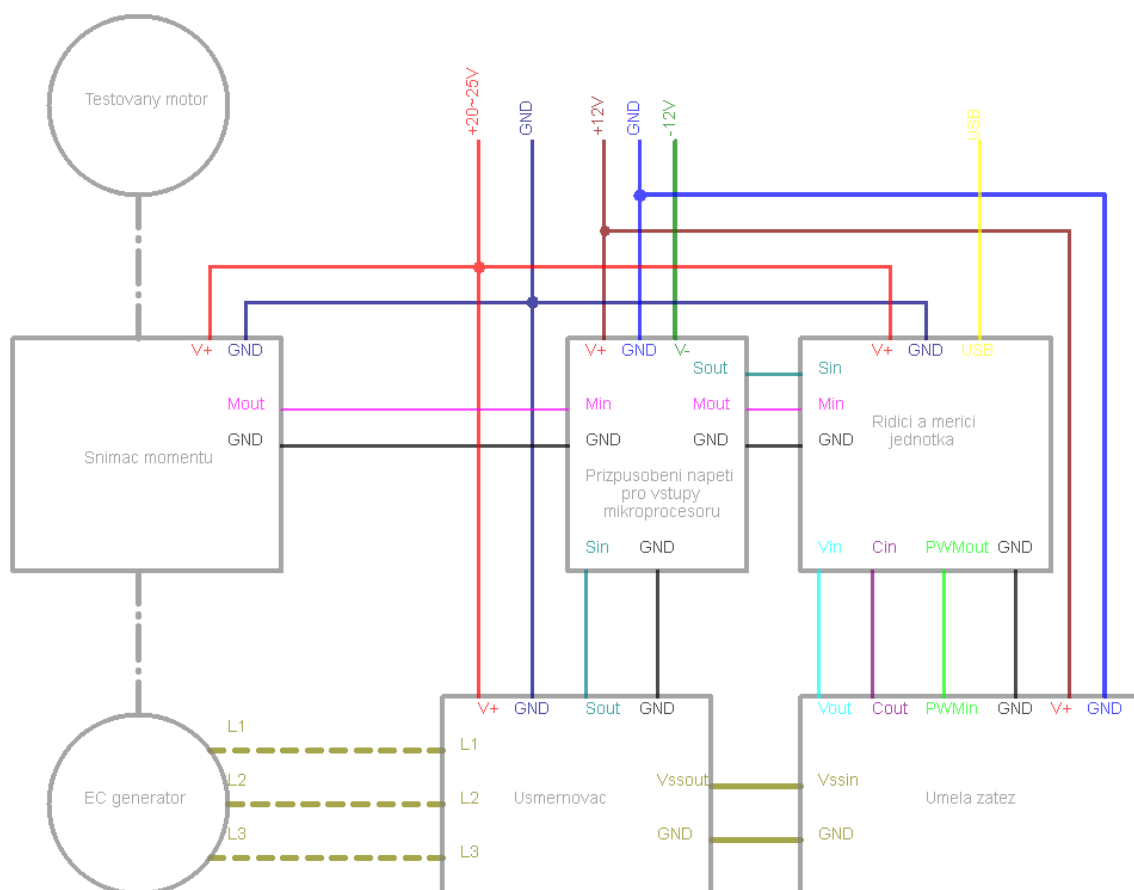
Pro měření napětí je opět využit blok umělé zátěže, na který byl mezi přívody usměrněného napětí doplněn odporový dělič pro přizpůsobení měřeného napětí na úroveň 0~5V. Při maximální uvažované amplitudě napětí 50V je tedy potřeba desetinásobně zeslabit signál.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 50V \cdot \frac{4,7k\Omega}{4,7k\Omega + 47k\Omega} = 4,55V \quad 6.2$$



## 7. Zapojení cílové aplikace

Jednotlivým samostatně otestovaným funkčním blokům popsaným v kap. 5 a 6 je pro finální aplikaci nutné propojit vstupy a výstupy, spolu se zohledněním požadovaných úrovní napájení. Blokové schema propojení je zobrazeno na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Blokové schema propojení dílčích částí elektrické brzdy

L1, L2 a L3 označují spojení jednotlivých vinutí brzdného motoru s usměrňovačem. Cesta  $V_{ssout}-V_{ssin}$  označuje spojení usměrněného napětí z generátoru mezi usměrňovačem a umělou zátěží. Cesty  $M_{out}-M_{in}$  a  $S_{out}-S_{in}$  spojují přes obvod pro napěťové přizpůsobení měřený moment a otáčky motoru se vstupy procesoru. Cesty  $V_{out}-V_{in}$  a  $C_{out}-C_{in}$  spojují obvody měřící proud a napětí s příslušnými vstupy na procesoru. Cesta  $PWM_{out}-PWM_{in}$  spojuje výstup procesoru s řídicím vstupem umělé zátěže.

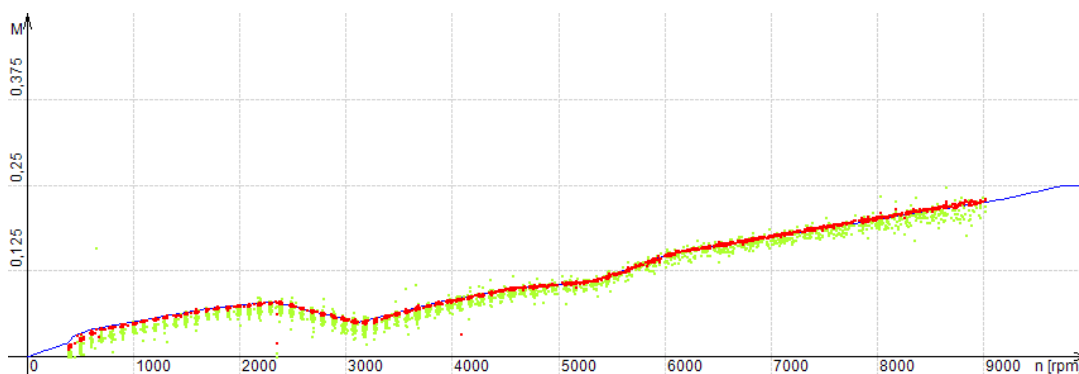
$V+$  na blocích snímače momentu, usměrňovače a řídicí a měřicí jednotky jsou připojeny na zdroj stejnosměrného napětí 20-25V.  $V+$  a  $V-$  na bloku pro přizpůsobení napětí jsou připojeny na symetrické napájení  $\pm 12V$ , blok umělé zátěže je připojen na +12V.

Všechny bloky, až na část řídicí a měřicí jednotky určenou pro komunikaci s PC, pracují se společnou zemí propojenou přes jednotlivé cesty označené GND.



## 8. Ověření funkčnosti zvolené koncepce na cílové aplikaci

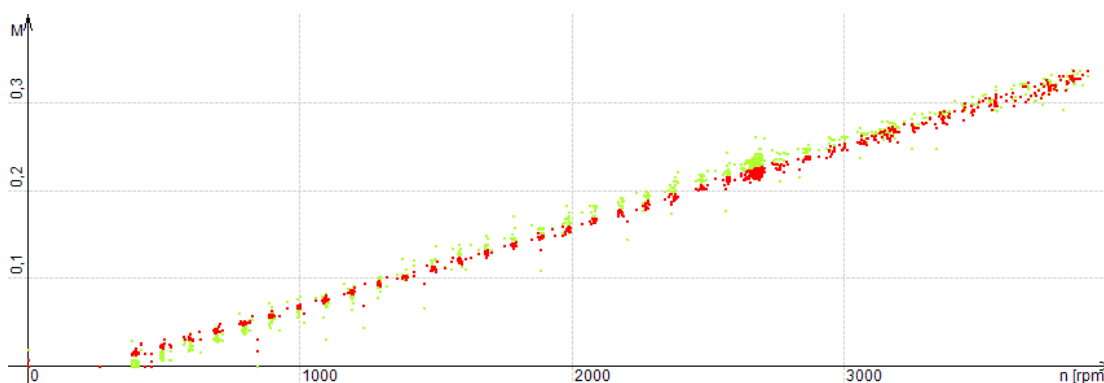
Po kalibraci jednotlivých měření byla celková koncepce otestována proměřením momentové zatěžovací charakteristiky. Měření bylo provedeno nastavováním otáček testovaného motoru a řídicí jednotka na základě momentové charakteristiky nastavovala parametry zátěže. Výstupem tohoto měření je graf na Obr. 8.1, který byl vygenerován aplikací pro řízení elektrické brzdy vytvořenou panem Fialou.



Obr. 8.1 Zatěžovací charakteristika

Modrou barvou je zobrazeno požadované momentové zatížení, červenou a zelenou barvou skutečné hodnoty zátěžného momentu. Zelenou barvou je zobrazen moment měřený momentovým snímačem, červenou barvou moment určený výpočtem z odebíraného proudu.

Druhé provedené měření reprezentované grafem na Obr. 8.2 reprezentuje maximální možnosti vytvořené elektrické brzdy s použitým EC motorem. Maximální velikost odebíraného proudu a zátěžného momentu je daná otáčkami motoru odpovídajícímu napětí a elektrického odporu daného paralelním odporem otevřeného kanálu tranzistorů použitých v umělé zátěži a rezistoru pro měření proudu.



Obr. 8.2 Maximální zatěžovací charakteristika



## 9. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit návrh elektroniky testovacího pracoviště pro momentové zatěžování elektromotorů elektrickou brzdou.

Zvolena byla koncepce využívající generátorického režimu brzdného motoru, ze kterého je po usměrnění tranzistorovým usměrňovačem velikost odebíraného elektrického proudu řízena umělou zátěží.

Vytvořený tranzistorový usměrňovač pracoval bez tepelných ztrát a návrh se ukázal jako správný. Návrh umělé zátěže po úpravě pracoval správně, jen při nedodržení maximálního disipovaného výkonu docházelo k tepelnému průrazu zvolených elektronických součástí. Je tedy vhodné k chladiči připojit snímač teploty a na základě zvýšení teploty povrchu chladiče přes maximální dovolenou mez automaticky testování přerušit.

V rámci provedeného zatěžování testovaného motoru byla úspěšně proměřena zatěžovací charakteristika, čímž byla ověřena použitelnost a funkčnost zvolené koncepce.





## Použitá literatura:

- [1] SKALICKÝ, J.: *Elektrické servopohony*. Skripta VUT v Brně, FEKT, 2001
- [2] MICROCHIP TECHNOLOGY, inc. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/>
- [3] MICROCHIP TECHNOLOGY, inc. *DsPIC30F6010A/6015 Data Sheet* [online]. 2011 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70150E.pdf>
- [4] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické mikropohony*. Skripta VUT v Brně, FEKT
- [5] SCHULZE, Mathias. *Synchron unter Spannung. Synchron unter Spannung*. Dostupné z: <http://www.lift-report.de/>
- [6] NOVÁK, Ivo. *Emotor*. [online]. 2008 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: [www.emotor.cz](http://www.emotor.cz)
- [7] UZIMEX, spol.s r.o. *Malé stejnosměrné motory Maxon*. 2002. Dostupné z: [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz)
- [8] Y.-S. Kuo, S. Verma, T. Schmid, and P. Dutta. *Hijacking power and bandwidth from the mobile phone's audio interface*. [DEV'10: Symposium on Computing for Development]; 17-18 December 2010, London, UK. ACM 978-1-4503-0473-3-10/12
- [9] CHAKRABARTY KRISHNENDU ..., CHAIRS/ED., Chakrabarty Krishnendu ..., chairs/ed. *DTIP of MEMS: design, test, integration and packaging of MEMS/MOEMS 2007* : [Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS]; 25 - 27 April 2007, Stresa, Lago Maggiore, Italy. Grenoble: EDA Publ, 2007. ISBN 978-235-5000-003.
- [10] NXP. *PSMN3R8-100BS* [online]. 29. Feb. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PSMN3R8-100BS.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PSMN3R8-100BS.pdf)
- [11] IXYS. *DSSK 80-0045B* [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://ixdev.ixys.com/DataSheet/L132.pdf>
- [12] STMICROELECTRONICS. *LM139,A LM239,A-LM339,A* [online]. Jul. 2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000460.pdf>
- [13] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *FAN7390 High-Current, High & Low-Side, Gate Driver IC* [online]. Nov. 2008 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/677893.pdf>
- [14] UNIS, a. s. *TPR\_FMP Technická specifikace*.

- [15] GARRIGÓS, Ausias a José M. BLANES. *Power MOSFET is core of regulated-dc electronic load*. Elche: University Miguel Hernández, Electronic Technology Division. [online]. 17. March 2005. [cit. 2013-04-02] Dostupné z: <http://m.eet.com/media/1130553/13338-31705di.pdf>
- [16] INTERNATIONAL RECTIFIER. *IRFP4110PbF* [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/44066.pdf>
- [17] INTERNATIONAL RECTIFIER. *AUIRF1405* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/auirf1405.pdf>
- [18] FIALA, M. *Návrh a optimalizace řídicích algoritmů pro elektrickou brzdu s EC motorem*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. 74 s. Vedoucí práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *LM2674 SIMPLE SWITCHER® Power Converter High Efficiency 500 mA Step-Down Voltage Regulator* [online]. Feb. 2005 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2674.pdf>
- [20] FTDI. *FT232BL/BQ USB UART IC Datasheet Version 2.2* [online]. 2011 [cit. 2013-04-20]. FT\_000329. Dostupné z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232BL\\_BQ.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232BL_BQ.pdf)
- [21] MAGTROL. *TM301 – TM308 Datasheet*. [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.magtrol.com/datasheets/tm301-308.pdf>
- [22] LACKO, P. *Návrh mechanické konstrukce zkušebního stolu pro elektrickou brzdu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Hrbáček.
- [23] TOMAN, J. UNIS, a.s. *Požadavky na testovací pracoviště pro elektrické motory*. CAAE-E1-ANA1\_draft/final.

## Seznam použitých zkratek a symbolů:

BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor (brushless direkt current)
EC motor	Elektronicky komutovaný motor (electronic comutated)
PWM	Pulsně šířková modulace (pulse-width modulation)
$\omega$	Otáčky [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$\psi$	Spřažený magnetický tok [Wb]
$\tau$	Časová konstanta [s]
B	Magnetická indukce [T]
C	Elektrická kapacita [F]
$c\Phi$	Konstanta motoru [ $\text{N}\cdot\text{A}$ ]
$F_B$	Lorentzova síla [N]
i	Elektrický proud [A]
J	Moment setrvačnosti [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]
l	Délka [m]
L	Indukčnost [H]
M	Moment [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ]
n	Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]
p	Počet pólových dvojic [-]
P	Výkon [W]
Q	Elektrický náboj [C]
r	Poloměr [m]
R	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$R_{th}$	Tepelný odpor [ $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ]
s	Skluz [-]
T	Teplota [K]
U	Napětí [V]

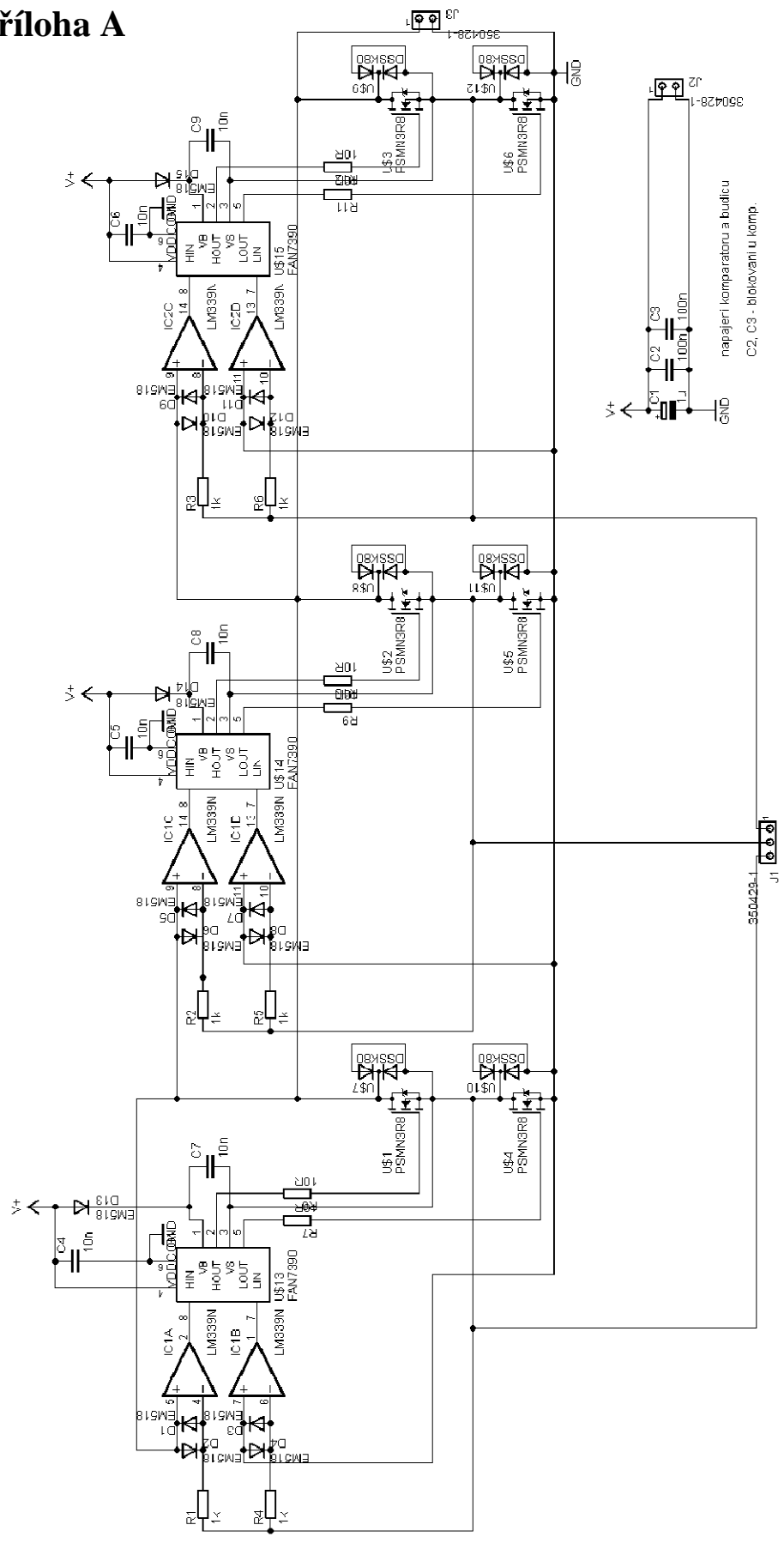


## Seznam příloh:

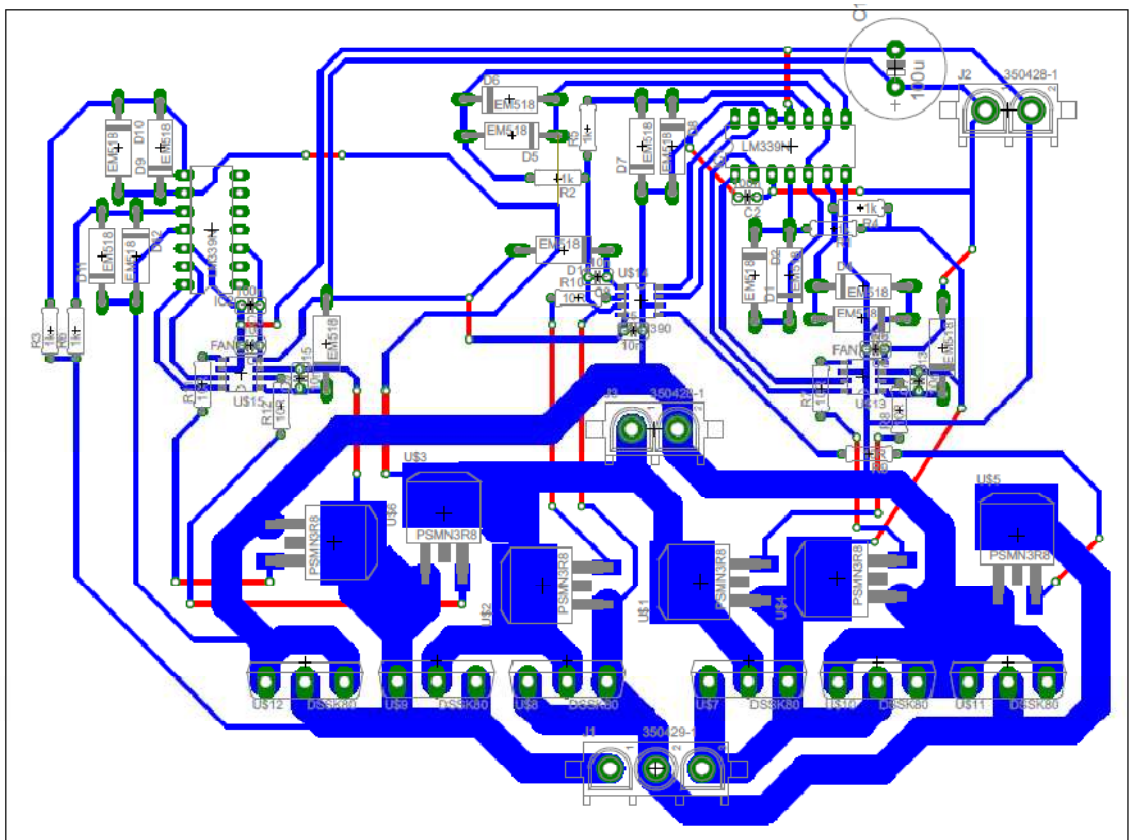
<b>Příloha A</b> .....	<b>52</b>
Schema zapojení, návrh desky plošného spoje a seznam použitých součástek usměřovače	52
Schema zapojení, návrh desky plošného spoje a seznam použitých součástek umělé zátěže	54
Schema zapojení, návrh desky plošného spoje a seznam použitých součástek procesorové jednotky	56
Schema zapojení, návrh desky plošného spoje a seznam použitých součástek bloku pro napěťové přizpůsobení snímače momentu	58
<b>Příloha B</b> .....	<b>60</b>
Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači	60
<b>Příloha C</b> .....	<b>65</b>
Fotodokumentace	65

CD obsahující elektronickou verzi této práce, schemata a návrhy desek plošných spojů vytvořená v programovém prostředí Eagle.

# Příloha A



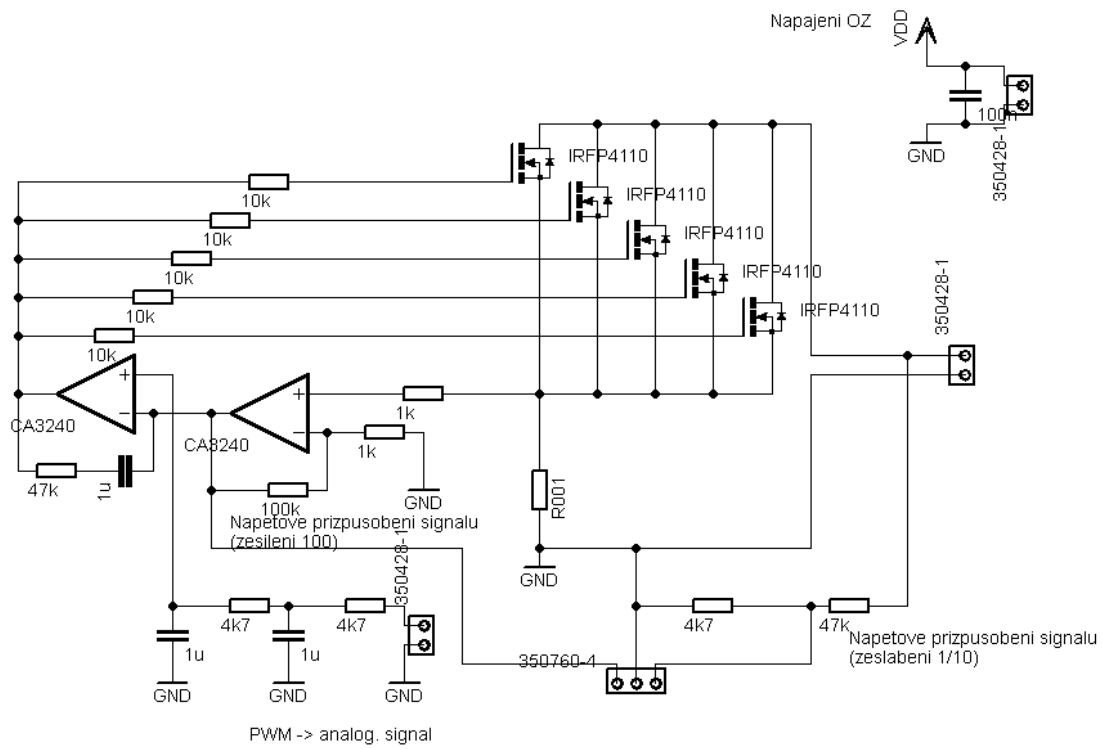
A-1 Schema zapojení tranzistorového usměrňovače



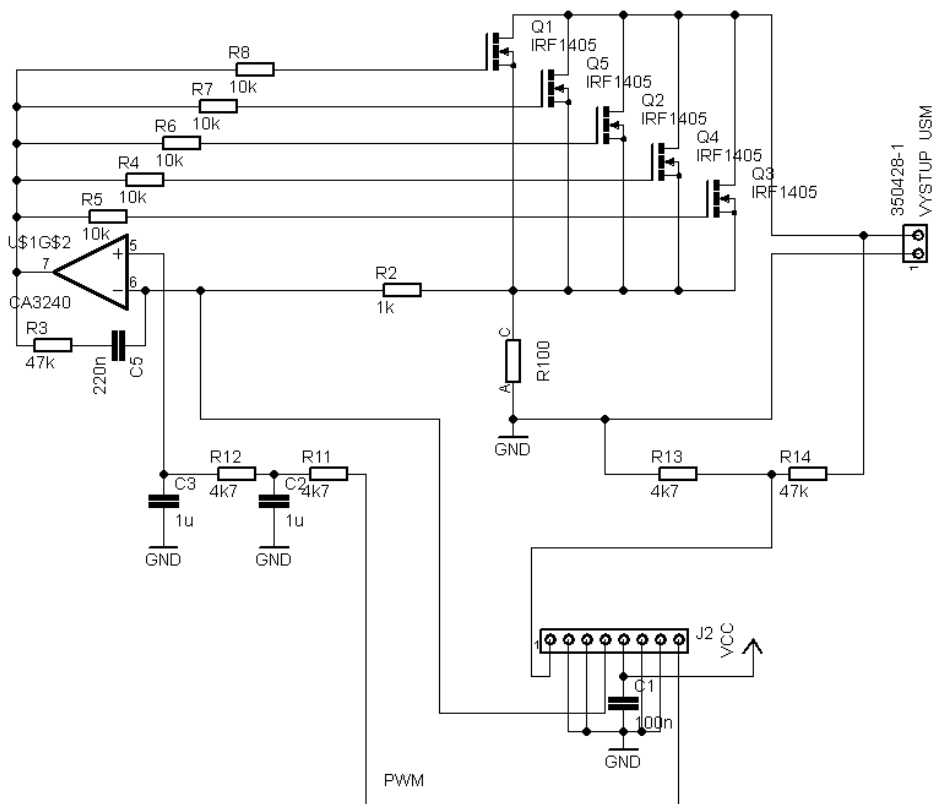
A-2 Deska plošného spoje usměrňovače

A-3 Seznam elektronických součástek použitých na usměrňovač

	Typ/pouzdro	Množství
Tranzistor	PSMN3R8/D2PACK	6x
Shottkyho dioda	DSSK 80-0045/TO247	6x
Budič	FAN7390/SOP8	3x
Komparátor	LM339/DIL14	2x
Rezistor	1k $\Omega$	6x
Rezistor	10 $\Omega$	6x
Kondenzátor	1 $\mu$ F	1x
Kondenzátor	100nF	2x
Kondenzátor	10nF	6x
Dioda	EM518	15x

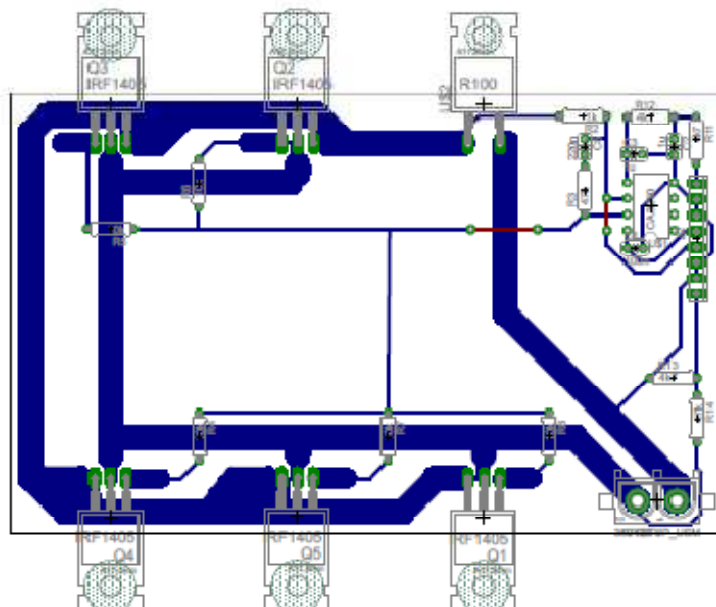


A-4 Schema zapojení umělé zátěže



A-5 Upravené schema zapojení umělé zátěže

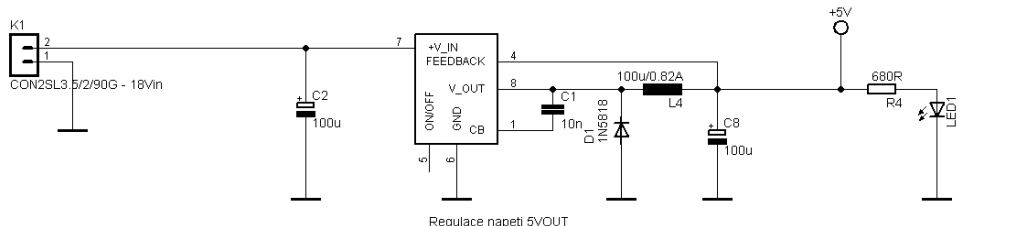




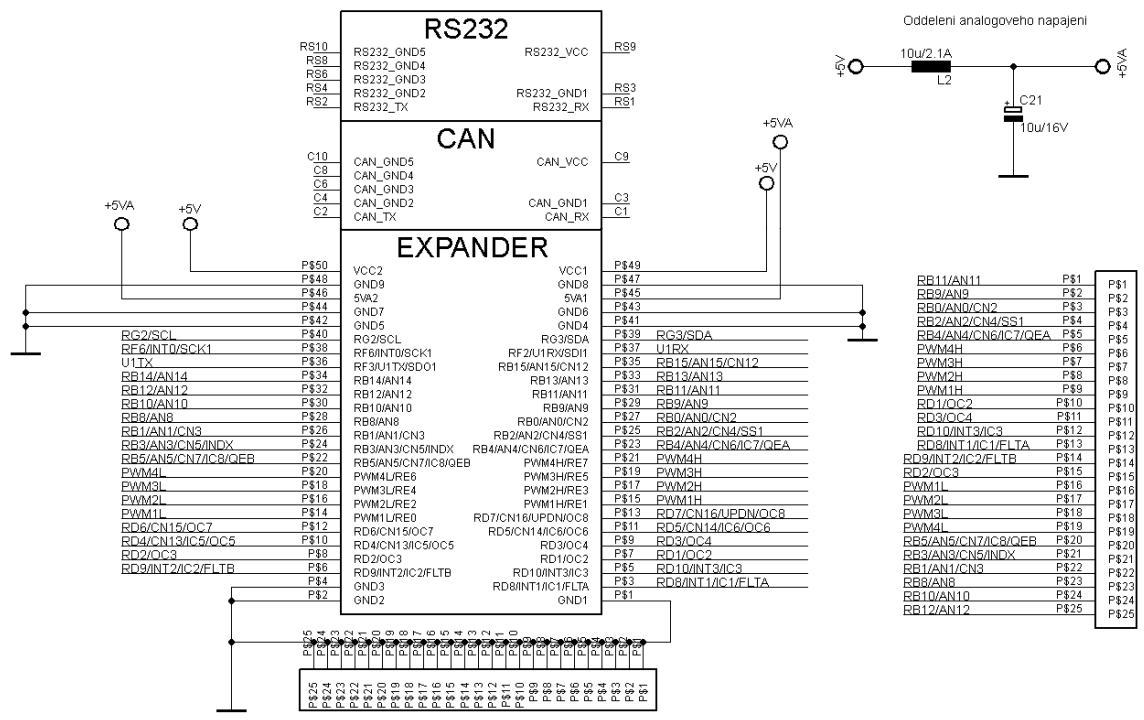
A-6 Návrh desky plošného spoje umělé zátěže

A-7 Seznam elektronických součástek použitých na umělou zátěž

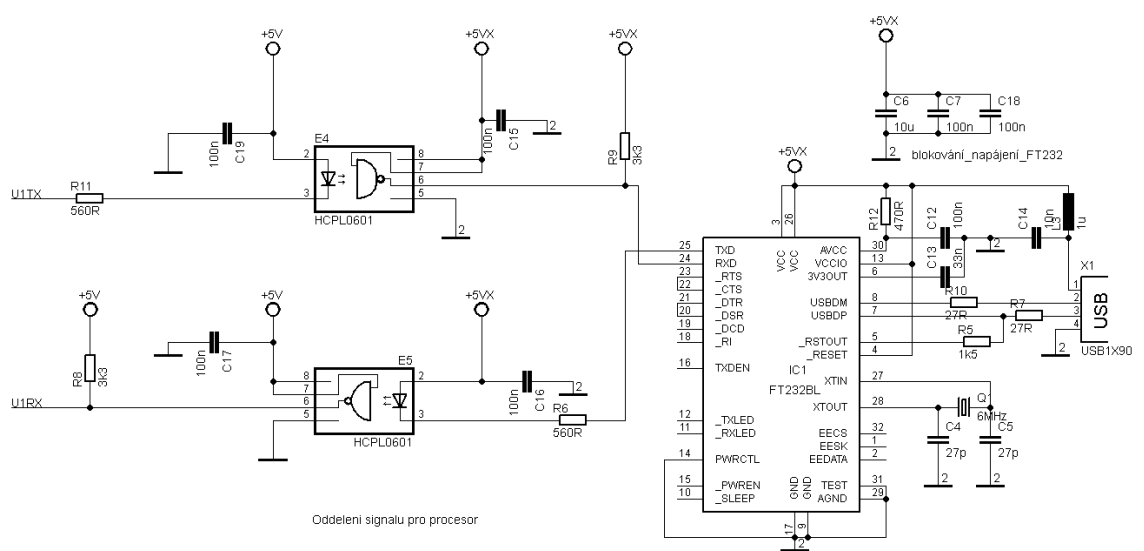
	Typ/pouzdro	Množství
Tranzistor	IRF1405/TO220	5x
Rezistor	100mΩ/TO220	1x
Operační zesilovač	CA3240/DIL08	1x
Rezistor	1kΩ	1x
Rezistor	4,7kΩ	3x
Rezistor	10kΩ	5x
Rezistor	47kΩ	2x
Kondenzátor	100nF	1x
Kondenzátor	1μF	2x
Kondenzátor	220nF	1x



Regulace napeti 5VOUT

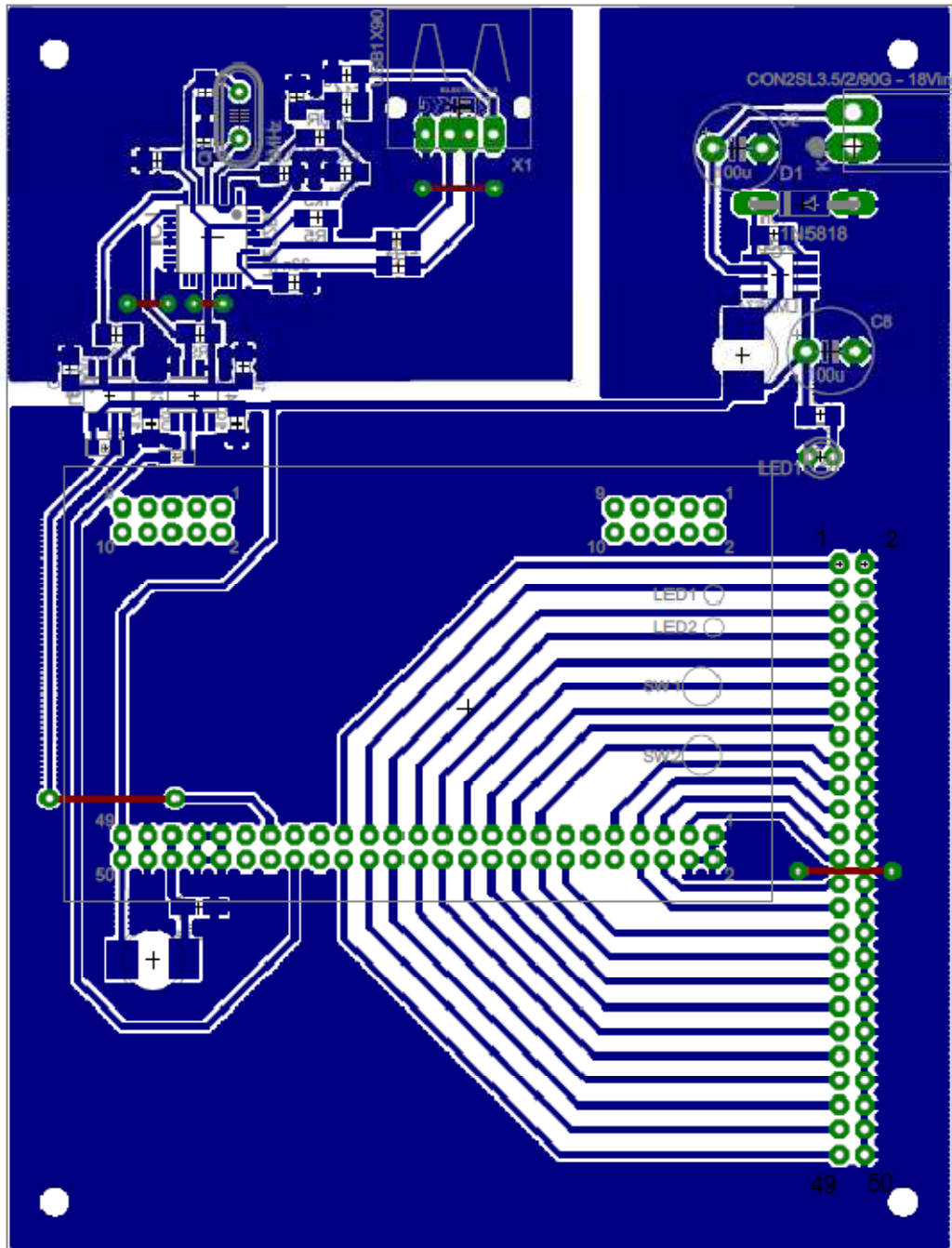


A-8 Schema zapojení napaječe řídicí a měřicí jednotky, znázornění vstupně-výstupních vývodů přivedených na patici



Oddelení signálu pro procesor

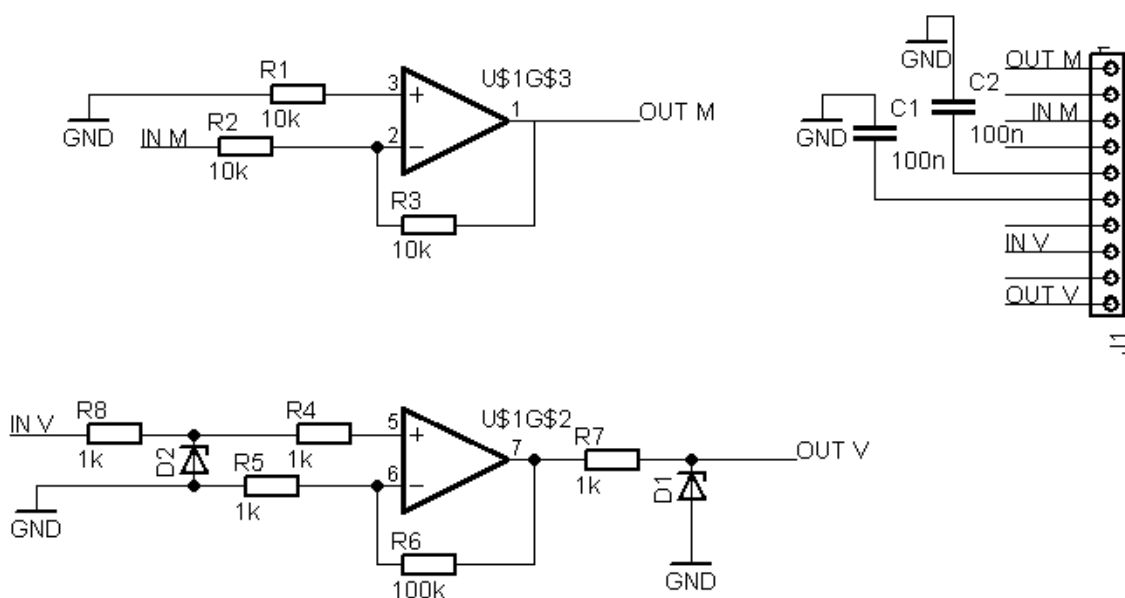
A-9 Schema bloku zazapojení bloku zajišťujícího komunikaci měřicí a řídicí jednotky s PC



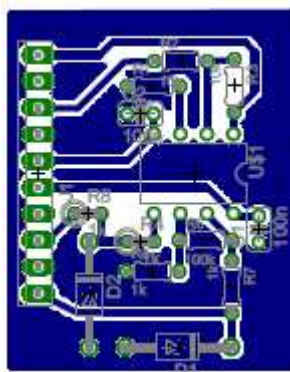
A-10 Návrh desky plošného spoje řídicí a měřicí jednotky

### A-11 Seznam elektronických součástek použitých na řídicí a měřicí jednotku

	Typ/pouzdro	Množství
Procesorová karta	Control Board dsPIC30f6015	1x
USB převodník	FT232BL/LQFP32	1x
Regulátor napětí	LM2674 5.0/SO08	1x
Optočlen	HCPL0601/SO8	2x
Krystal	6MHz/HC49U	1x
Rezistor	27Ω/SMD1206	2x
Rezistor	470Ω/SMD1206	1x
Rezistor	560Ω/SMD1206	2x
Rezistor	680Ω/SMD1206	1x
Rezistor	1,5kΩ/SMD1206	1x
Rezistor	3,3kΩ/SMD1206	2x
Kondenzátor	27pF/SMD1206	2x
Kondenzátor	10nF/SMD1206	1x
Kondenzátor	33nF/SMD1206	1x
Kondenzátor	100nF/SMD1206	7x
Kondenzátor	10μF/SMD1206	1x
Kondenzátor	10μF/SMDB elektrolyt.	1x
Kondenzátor	100μF/elektrolyt	2x
Tlumivka	1μ/SMD1210	1x
Tlumivka	10μ/SMT73	1x
Tlumivka	100μ/SMT75	1x
Dioda	1N5818	1x



A-12 Schema zapojení napěťového přizpůsobení pro snímač momentu a měření otáček

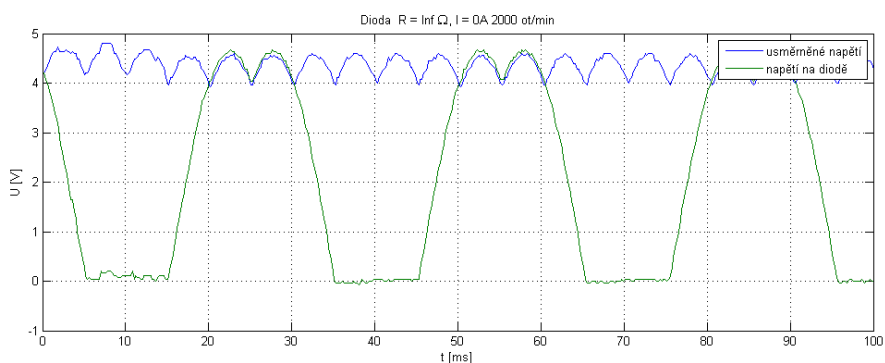
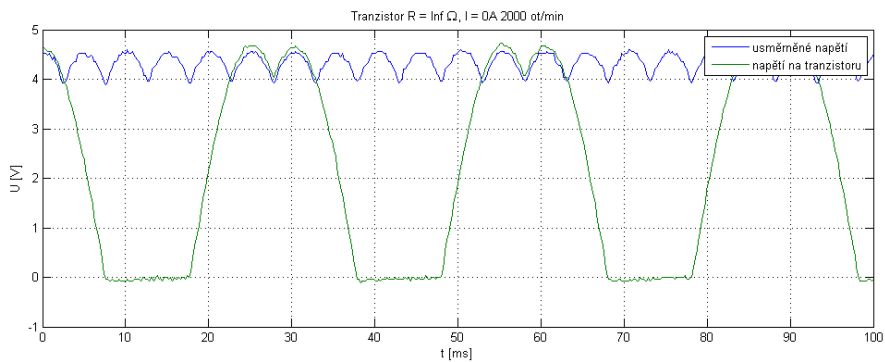


A-13 Návrh desky plošného spoje napěťového přizpůsobení pro snímač momentu a měření otáček.

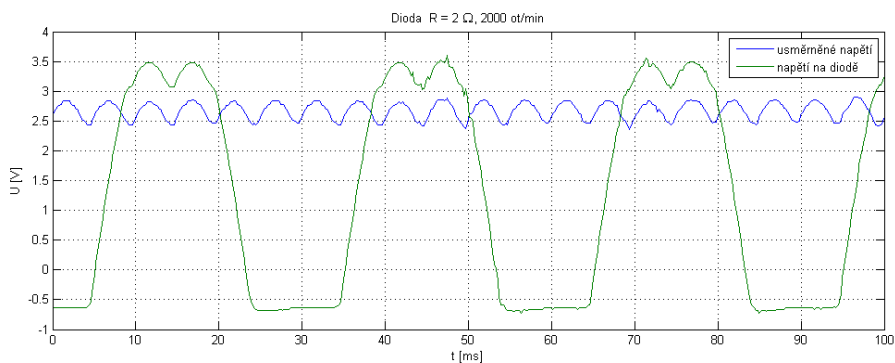
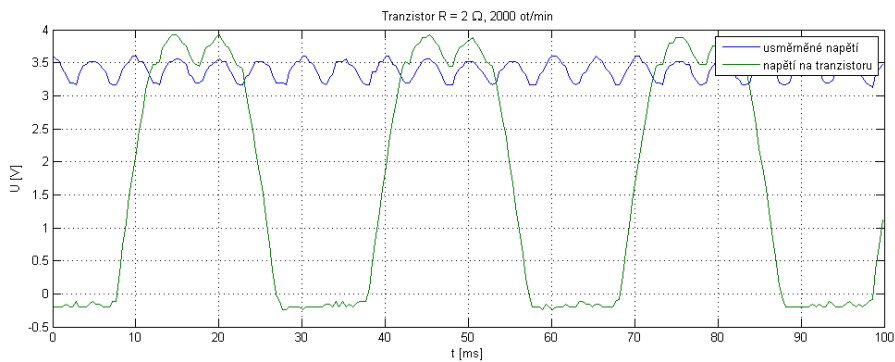
A-14 Seznam elektronických součástek použitých na napěťové přizpůsobení pro snímač momentu a měření otáček

	Typ/pouzdro	Množství
Operační zesilovač	CA3240/DIL08	1x
Zenerova dioda		2x
Rezistor	1k $\Omega$	4x
Rezistor	10k $\Omega$	3x
Rezistor	100k $\Omega$	1x
Kondenzátor	100nF	2x

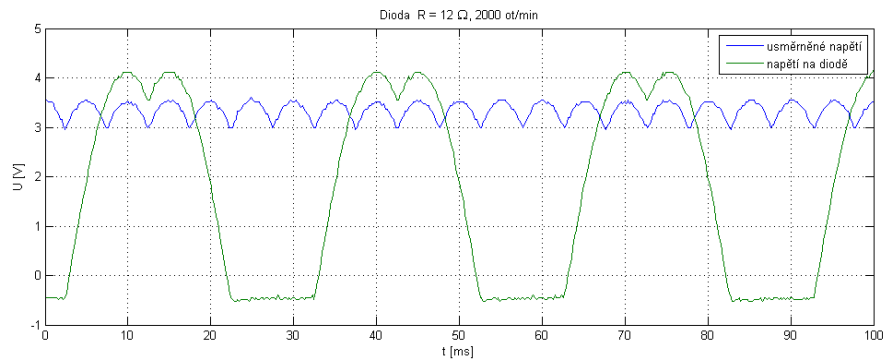
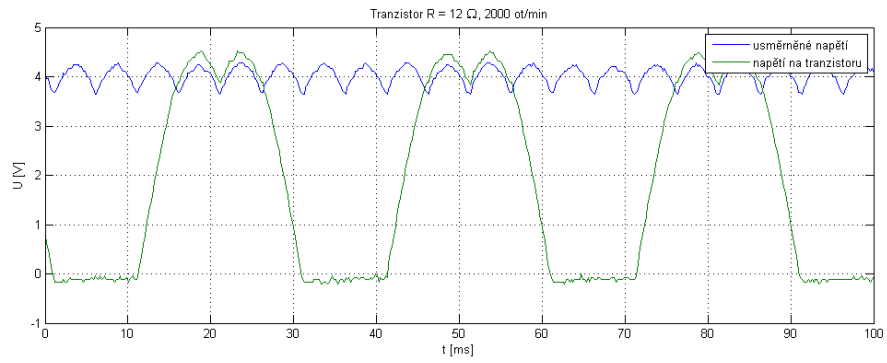
## Příloha B



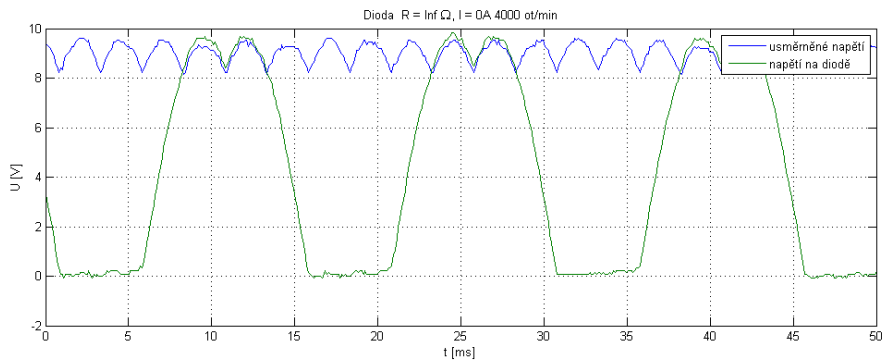
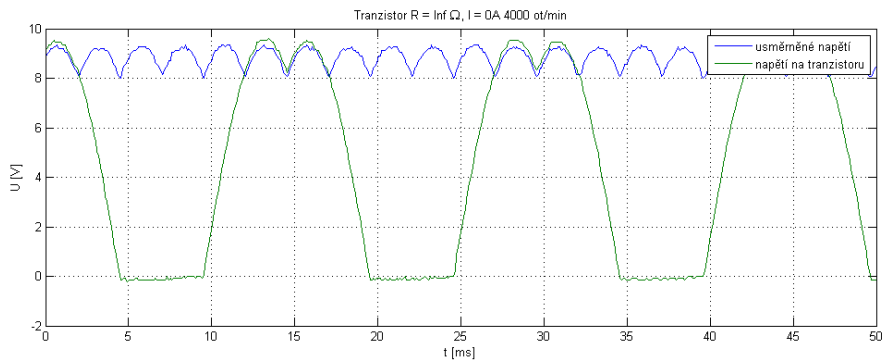
B-1 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači při rychlosti 2000 otáček/min. naprázdno.



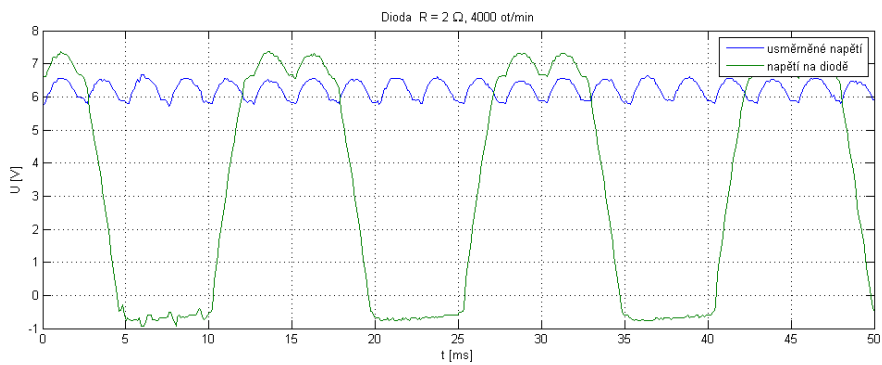
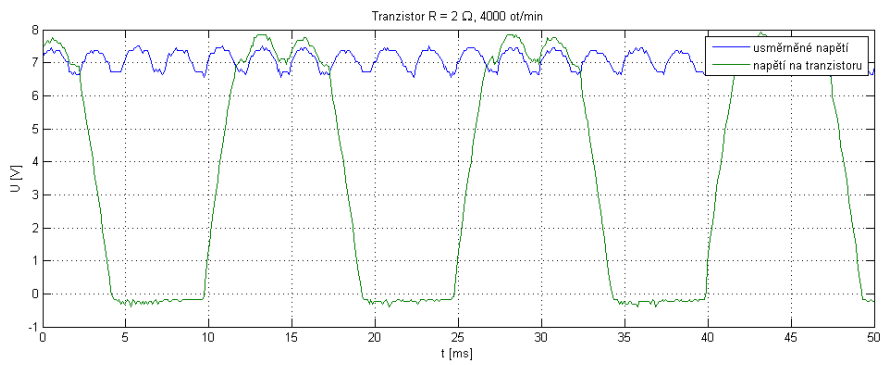
B-2 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači při rychlosti 2000 otáček/min. se zátěží  $2\Omega$ .



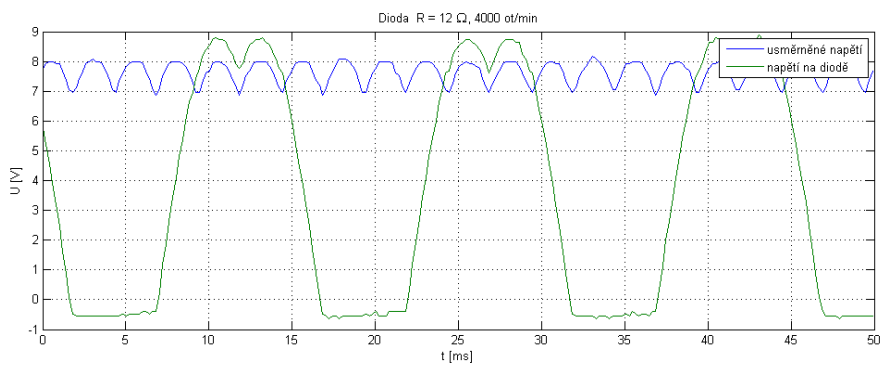
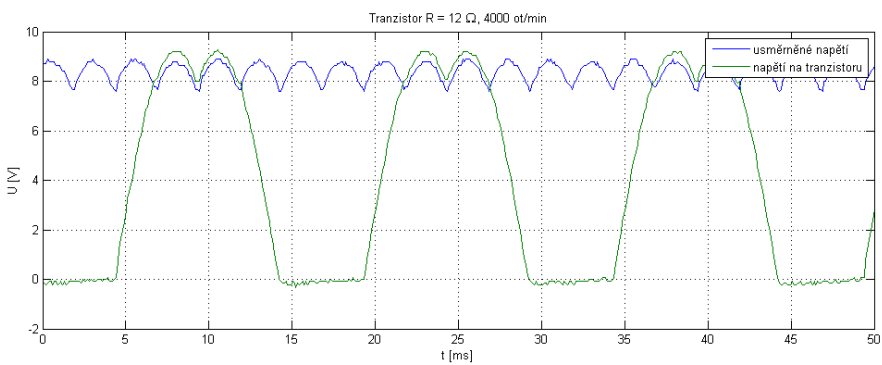
B-3 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači při rychlosti 2000 otáček/min. se zátěží 12 $\Omega$ .



B-4 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači při rychlosti 4000 otáček/min. naprázdno

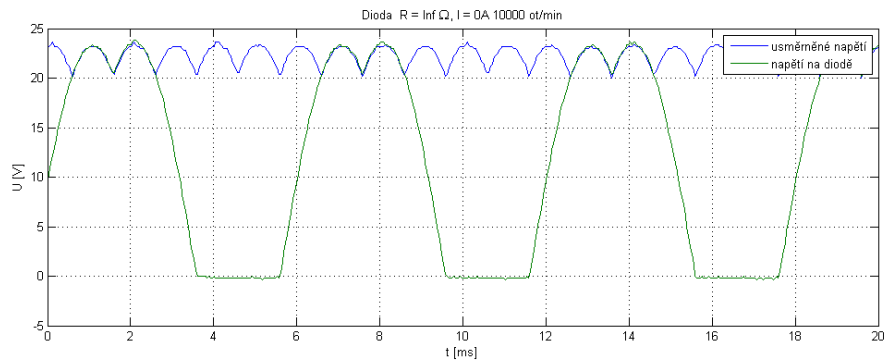
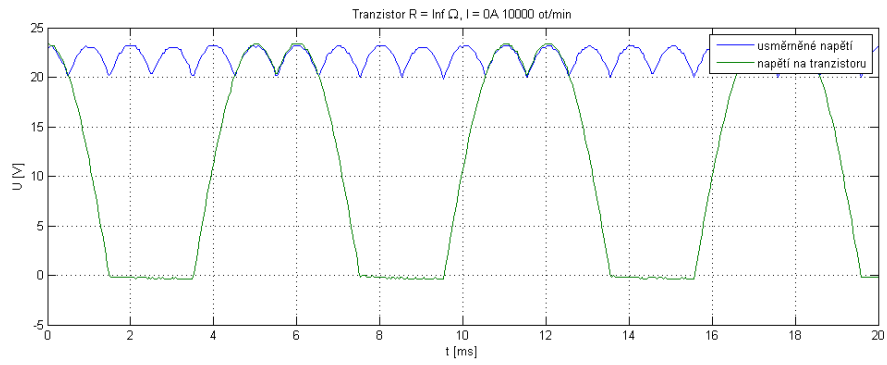


B-5 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměrňovači při rychlosti 4000 otáček/min. se zátěží 2 $\Omega$ .

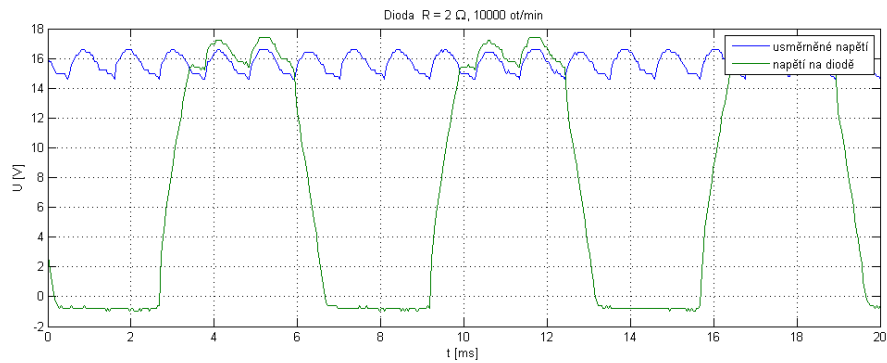
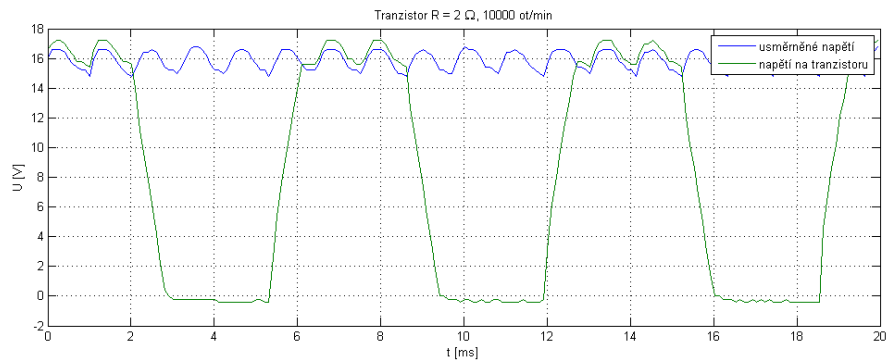


B-6 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměrňovači při rychlosti 4000 otáček/min. se zátěží 12 $\Omega$ .

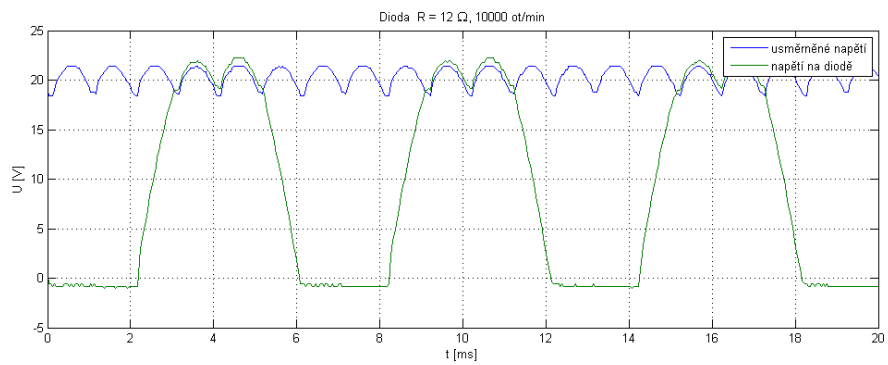
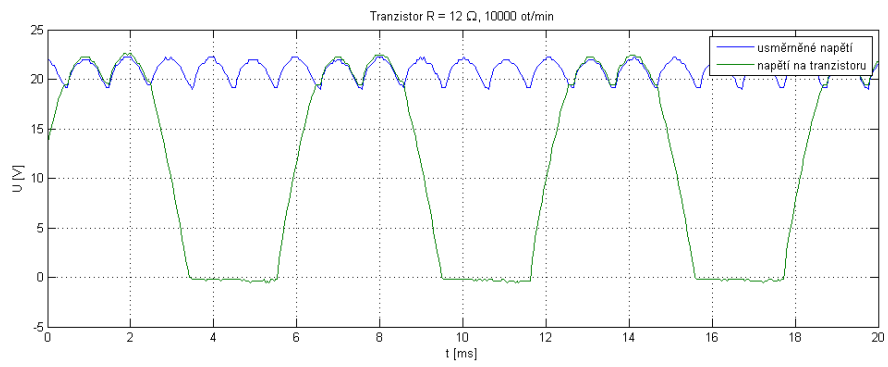




B-7 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměrňovači při rychlosti 10000 otáček/min. naprázdno

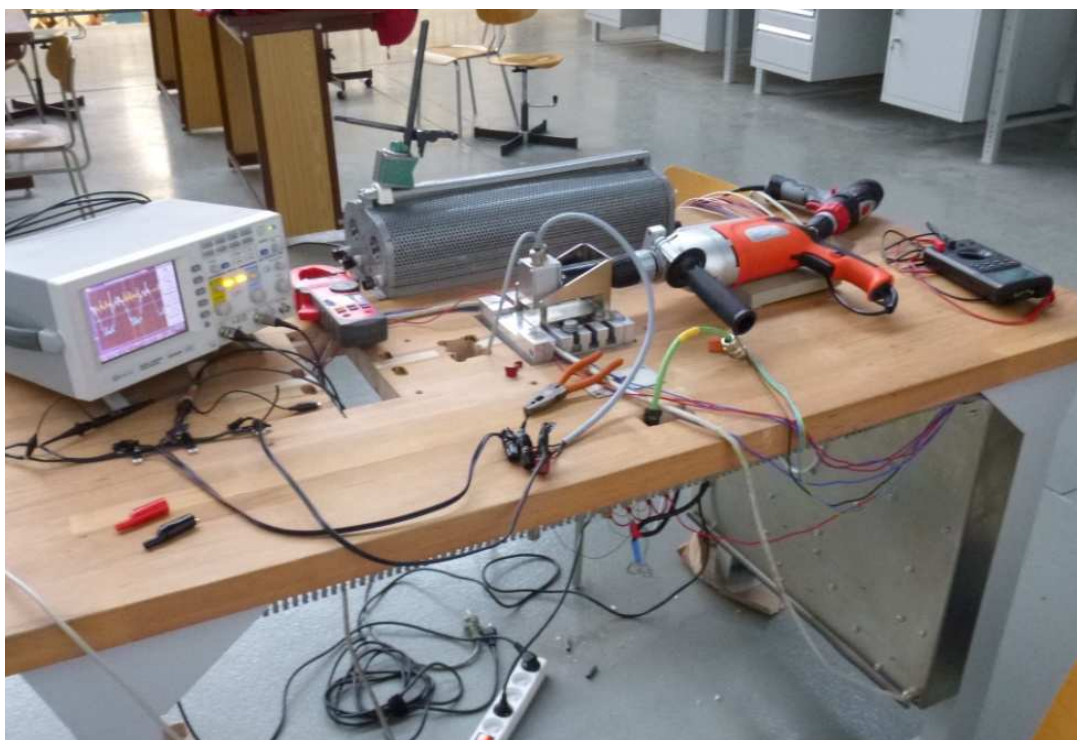


B-8 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměrňovači při rychlosti 10000 otáček/min. se zátěží  $2\Omega$ .

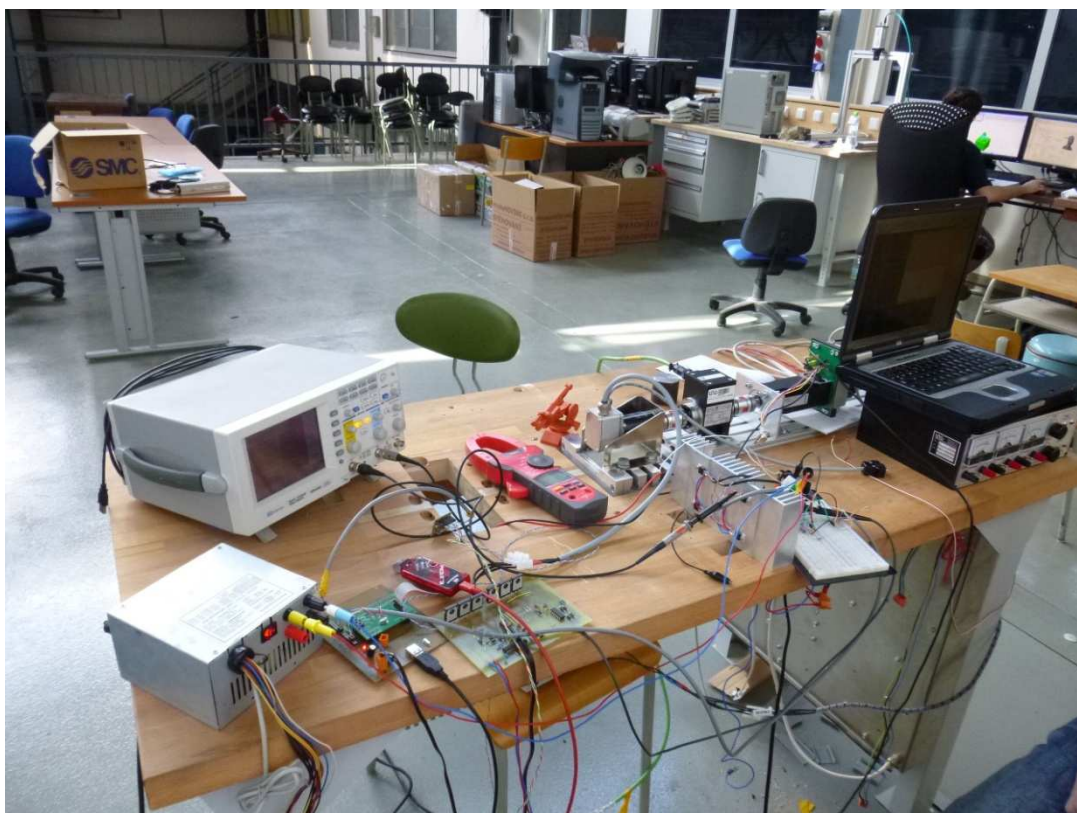


B-9 Porovnání průběhu napětí na tranzistorovém a diodovém usměřovači při rychlosti 10000 otáček/min. se zátěží  $12\Omega$ .

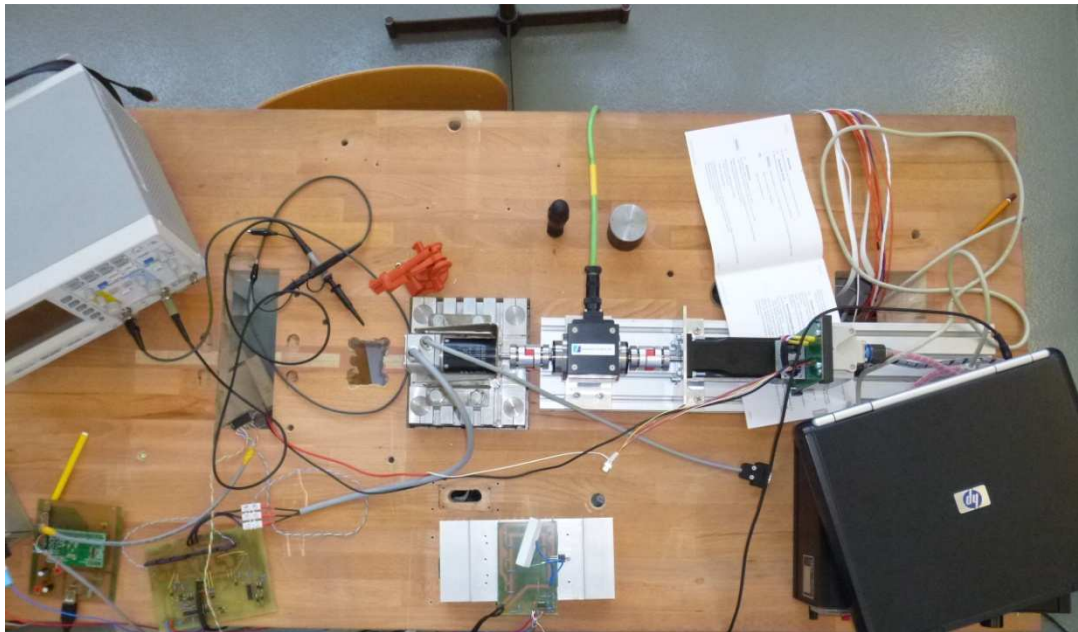
## Příloha C



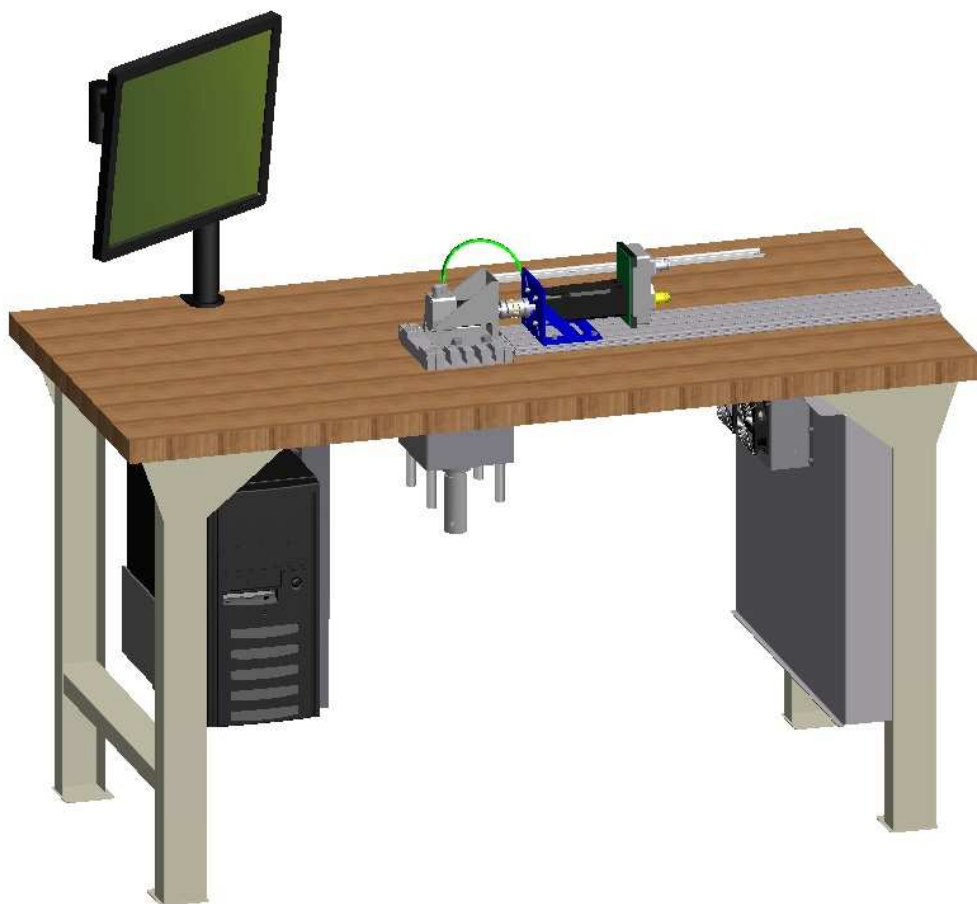
C-1 První podoba pracoviště se zátěžným motorem roztáčeným vrtačkou



C-2 Podoba pracoviště se zátěžným motorem roztáčeným EC motorem.



C-3 Podoba pracoviště se zátěžným motorem roztáčeným EC motorem.



C-4 Návrh mechanické konstrukce testovacího pracoviště [22]