



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

POHON REGULAČNÍHO TROJFÁZOVÉHO AUTOTRANSFORMÁTORU

THREE-PHASE VARIABLE AUTOTRANSFORMER ACTUATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Nevřela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Tomáš Nevřela

ID: 164347

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Pohon regulačního trojfázového autotransformátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte schémata a DPS řídicí jednotky s výkonovým modulem.
2. Vytvořte model soustavy pohonu s autotransformátorem a navrhněte regulátor.
3. Zařízení realizujte a oživte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru. Brno, 2005.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této práce je zrealizovat pohon trojfázového regulačního autotransformátoru. Projekt obsahuje teoretický základ z elektrických pohonů, na základě kterého je volen typ motoru, způsob řízení a regulátor pro potřeby konkrétního pohonu. Součástí práce je návrh a výroba hardwaru s mikroprocesorem, sestávajícího z řídicí, měřicí a silové části.

Abstract

The aim of this work is to implement an actuator for three-phase variable autotransformer. The project includes a theoretical base of electric actuators on the basis of which is chosen the type of motor, its method of control and regulator, necessary for a specific actuator. Parts of the thesis are design and production of hardware with microprocessor, consisting of control, measurement and power part.

Klíčová slova

autotransformátor; pohon; polohová regulace; stejnosměrný motor; regulátor

Keywords

autotransformer; actuator; position control; DC motor; regulator

Bibliografická citace

NEVŘELA, T. *Pohon regulačního trojfázového autotransformátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Knobloch.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Pohon regulačního trojfázového autotransformátoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne27.5.2016.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Knoblochovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne27.5.2016.....

Podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	14
2 AUTOTRANSFORMÁTOR	15
2.1 POHÁNĚNÝ AUTOTRANSFORMÁTOR	15
3 POHONY	19
3.1 POHONY SE STŘÍDAVÝMI MOTORY	19
3.1.1 ASYNCHRONNÍ MOTORY	19
3.1.2 SYNCHRONNÍ MOTORY	19
3.1.3 ŘÍZENÍ STŘÍDAVÝCH MOTORŮ	20
3.2 POHONY SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY	20
3.2.1 MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY	21
3.2.2 ŘÍZENÍ DC MOTORŮ	22
3.3 MODEL DC MOTORU	23
4 POHON AUTOTRANSFORMÁTORU.....	26
4.1 MOTOR PRO POHON AUTOTRANSFORMÁTORU	26
4.2 KONSTRUKCE POHONU	28
4.2.1 UCHYCENÍ MOTORU	28
4.2.2 KONCOVÉ SENZORY	29
4.3 HARDWARE.....	30
4.3.1 ŘÍDICÍ ČÁST.....	31
4.3.2 MĚŘICÍ ČÁST	32
4.3.3 SILOVÁ ČÁST.....	33
4.4 MODEL SOUSTAVY S DC MOTOREM	35
4.5 REGULÁTORY	36
4.6 NÁVRH REGULÁTORU POHONU	37
4.6.1 PROUDOVÁ SMYČKA	37
4.6.2 OTÁČKOVÁ SMYČKA.....	38
4.6.3 POLOHOVÁ SMYČKA	40



4.7 REALIZACE REGULÁTORU POHONU.....	42
4.7.1 PROUDOVÁ SMYČKA.....	43
4.7.2 OTÁČKOVÁ SMYČKA.....	43
4.7.3 POLOHOVÁ SMYČKA	44
4.7.4 PROGRAM REGULÁTORU	46
4.7.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ.....	47
5 ZÁVĚR.....	49



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Model ramena autotransformátoru s jezdcem a protizávažím.	16
Obr. 2: Schéma autotransformátoru zapojeného do hvězdy	17
Obr. 3: Průběhy zdeformovaného výstupního napětí s nepřipojeným středním vodičem	18
Obr. 4: Průběhy nezdeformovaného výstupního napětí s připojeným středním vodičem	18
Obr. 5: Autotransformátor	18
Obr. 6: Model stejnosměrného motoru s permanentními magnety [6]	21
Obr. 7: Náhradní schéma SS motoru s permanentními magnety	24
Obr. 8: Průběh napětí a proudu v motoru - modrá - napětí, fialová - proud	26
Obr. 9: Autotransformátor s pohonem	28
Obr. 10: Pohon autotransformátoru	29
Obr. 11: Senzory koncových poloh.....	30
Obr. 12: Návrh plošného spoje v Altium Designer	31
Obr. 13: Část schématu s popisem signálů na konektorech.....	31
Obr. 14: Schéma měřicí části hardwaru	33
Obr. 15: Schéma silové části hardwaru	34
Obr. 16: Vyrobená DPS tvořící hardwarovou část pohonu	34
Obr. 17: Model DC motoru v simulinku.....	35
Obr. 18: Smyčka regulátoru proudu	37
Obr. 19: Přejížděvací funkce navrženého regulátoru proudu - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota	38
Obr. 20: Smyčka regulátoru rychlosti otáčení	39
Obr. 21: Přejížděvací funkce navrženého regulátoru otáček - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota	40
Obr. 22: Smyčka regulátoru výstupního napětí.....	40
Obr. 23: Přejížděvací funkce navrženého regulátoru polohy - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota	41
Obr. 24: Přejížděvací funkce nově navrženého regulátoru polohy - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota.....	42
Obr. 25: Schéma paralelního spojení regulátorů	45
Obr. 26: Průběh střídavé měniče v závislosti na požadované hodnotě výstupního napětí.....	46
Obr. 27: Průběh výstupního napětí při regulaci z nejnižšího do nejvyššího převodu.....	48
Obr. 28: Vývojový diagram logických funkcí programu regulátoru.....	48



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 : Změřené hodnoty statického momentu.....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 : Změřené a vypočtené hodnoty z měření na motoru</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3 : Hodnoty veličin použitých v model motoru.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 4 : Hodnoty zesílení navrženého regulátoru</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5 : Hodnoty zesílení skutečného regulátoru.....</i>	<i>45</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	Střídavý proud	
$c\Phi$	Konstanta motoru s permanentními magnety	[Wb]
DC	Stejnoseměrný proud	
DPS	Deska plošných spojů	
F	Mechanická síla	[N]
f	Frekvence	[Hz]
Φ_i	Úhel natočení rotoru	[rad]
f_m	Frekvence spínání měniče	[Hz]
F_{si}	Zesílení smyčky regulátoru proudu	
F_{su}	Zesílení smyčky regulátoru výstupního napětí	
$F_{s\omega}$	Zesílení smyčky regulátoru otáček	
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
I	Elektrický proud	[A]
i_a	Proud tekoucí motorem	[A]
I_{max}	Maximální hodnota proudu tekoucího motorem	[A]
i_{mot}	Převodový poměr převodovky motoru	[-]
I_{norm}	Normovaný elektrický proud	[A]
i_{skut}	Skutečná hodnota proudu tekoucího motorem	[A]
i_{tr}	Převodový poměr transformátoru	[-]
J_{motoru}	Kvadratický moment rotoru motoru	[kg·m ²]
J_{red}	Redukovaný kvadratický moment	[kg·m ²]
$J_{soustavy}$	Kvadratický moment soustavy	[kg·m ²]
k_{CI}	Zesílení čidla proudu	
$k_{C\omega}$	Zesílení čidla otáček	



K_{Ii}	Zesílení integrační složky regulátoru proudu	
k_{Iu}	Zesílení integrační složky regulátoru výstup. napětí	
$k_{I\omega}$	Zesílení integrační složky regulátoru otáček	
k_m	Zesílení měniče regulátoru	[V]
k_{Pi}	Zesílení proporcionální složky regulátoru proudu	
k_{Pu}	Zesílení proporcionální složky regulátoru výstup. napětí	
$k_{P\omega}$	Zesílení proporcionální složky regulátoru otáček	
$k_{tr,max}$	Max. převodový poměr transformátoru	[-]
L_a	Indukčnost kotvy motoru	[H]
M_z	Zátěžný krouticí moment	[Nm]
n	Rychlost otáčení	[min ⁻¹]
OM	Optimální modul	
ω_{me}	Úhlová rychlost osy motoru	[rad·s ⁻¹]
PC	Osobní počítač	
PWM	Pulzně šířková modulace	
r	Délka ramene	[m]
R	Elektrický odpor	[Ω]
R_a	Elektrický odpor kotvy motoru	[Ω]
R_i	Regulátor proudu	
R_u	Regulátor výstupního napětí	
s	Střída měniče	[-]
SO	Symetrické optimum	
T_m	Perioda spínání měniče	[s ⁻¹]
$t_{s,max}$	Tolerance síťového napětí	[-]
U	Elektrické napětí	[V]



U_a	Výstupní napětí regulátoru	[V]
U_d	Napětí meziobvodu měniče	[V]
U_{dim}	Dimenzované napětí	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_{La}	Úbytek napětí na indukčnosti kotvy motoru	[V]
U_n	Napájecí napětí	[V]
U_{out_norm}	Normované výstupní napětí autotransformátoru	[V]
U_{Ra}	Úbytek napětí na odporu kotvy motoru	[V]
U_{skut}	Skutečná hodnota výstupního napětí	[V]
UVEE	Ústav výkonové elektroniky a elektrotechniky	
U_z	Střední napětí na zátěži	[V]
U_{zad}	Žádaná hodnota výstupního napětí	[V]
τ_a	Elektromagnetická časová konstanta motoru	[s]
τ_i	Časová konstanta regulátoru proudu	[s]
τ_m	Časová konstanta měniče	[s]
τ_ω	Časová konstanta regulátoru otáček	[s]
ω	Úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
ω_{norm}	Normovaná úhlová rychlost osy motoru	[rad·s ⁻¹]
Φ	Magnetický tok	[Wb]



1 ÚVOD

Elektrický pohon je zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na energii mechanickou. Než se elektrická energie promění v mechanickou, projde určitou fází, a tou je magnetická energie, neboli energie magnetického pole. Zařízení, která takovou přeměnu konají, se nazývají elektrické motory. Mezi taková zařízení však řadíme i např. elektromagnety. V dnešní době známe spoustu typů elektrických motorů. Do skupin je dělí především kvalita vstupující energie. Nejzákladnější rozdělení motorů tvoří skupiny poháněné stejnosměrným anebo střídavým proudem. Každá skupina má své přednosti a nezaměnitelné využití.

Abychom dokázali elektrický pohon řídit, musíme být schopni upravit vstupující energii, případně jiné vlivy, do takové kvality, aby se pohon choval očekávaným způsobem, ať už na základě odhadů, nebo výpočtů matematických či fyzikálních modelů. Pro řadu aplikací je ale tato kontrola nedostačující, a proto používáme sofistikovanější způsob řízení, který se nazývá regulace. Regulace je řízení se zpětnou vazbou. Regulaci provádí regulátor, tím může být člověk, mechanický systém, nebo analogový či digitální elektrický obvod. Regulátor bývá nejčastěji vybaven prvkem, díky kterého je schopen znát hodnotu regulované veličiny. Regulačním zásahem upravuje vstupní energii, případně jiné vlivy, aby výstupní veličinu udržel co nejblíže žádané hodnotě. Rozdíl mezi výstupní a žádanou hodnotou se nazývá odchylka, tu se snažíme ve většině případů eliminovat.

Spojením elektrického motoru a vhodného regulátoru vznikne elektrický pohon. Obecně se může elektrický pohon považovat za mechatronický systém, složený z prvků elektrických a mechanických, který zabezpečuje řízení nebo regulaci pohybu při přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Elektrické pohony jsou nezbytnou součástí dnešního života. Závisí na nich většina průmyslových činností. Jejich vývoj je zaměřen hlavně na zlepšování životnosti, spolehlivosti, výkonnosti a úspornosti. Kromě svého úkolu usnadnit člověku život jsou však v některých, zejména technologických procesech nezbytné. Na pohony jsou proto kladeny velké nároky. [1]

Smyslem této práce je zrealizovat pohon pro trojfázový autotransformátor. Vlivem nízké tvrdosti takového zdroje bude při různých změnách v obvodu docházet ke kolísání výstupního napětí. Kolísání může být způsobováno rovněž i kolísáním vstupního síťového napětí. Úkolem regulačního pohonu bude staticky regulovat napětí na výstupu autotransformátoru na nastavené hodnotě a simulovat tak síť s konstantním zdrojem napětí a malou impedancí.



2 AUTOTRANSFORMÁTOR

2.1 Poháněný autotransformátor

Trojfázový regulační autotransformátor je složen ze 3 jednofázových modulů. Maximální proud sekundárním vinutím je 18 A. Výstup autotransformátoru lze regulovat od 0% do 112,5 % hodnoty jmenovitého napětí na primární straně. Napájení je trojfázové sdruženým síťovým napětím 400 V. Autotransformátor je poháněn ručně a slouží k napájení testovaných měničů v laboratořích výkonové elektroniky. Ovládání všech 3 fází je na jedné společné ose s rozsahem otáčení cca 320°. Experimentálním měřením byl stanoven potřebný krouticí moment pro řízení autotransformátoru minimálně 1 Nm.

Tab. 1 : Změřené hodnoty statického momentu

	směr otáčení doleva	Směr otáčení doprava
výchylka rozsahu [%]	statický moment [Nm]	
10	0,996	0,981
30	1,01	1,01
50	1,02	1,03
60	0,981	1,01
90	0,961	0,981

Měření bylo provedeno pomocí 500 g závaží a mechanické páky, která byla pevně spojená s osou. Pomocí rovnice pro výpočet točivého momentu byly zjištěny výše uvedené hodnoty v tabulkách.

$$M = F \cdot r \quad (1)$$

Dosazením do rovnice dostaneme

$$M = m \cdot g \cdot r$$

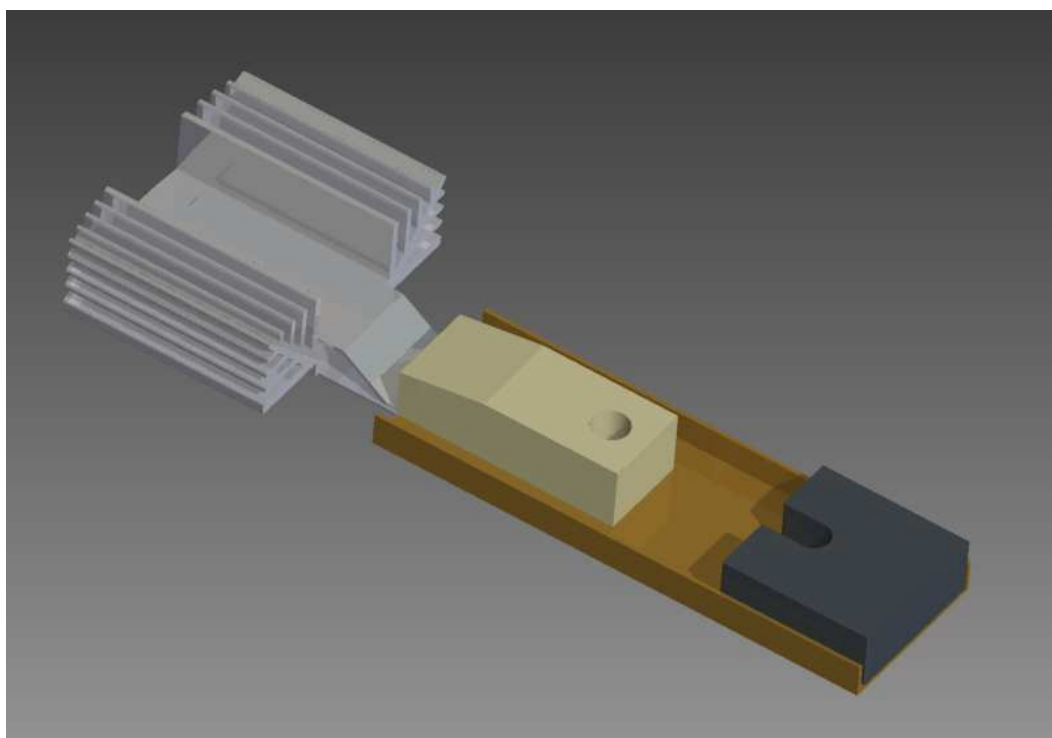
M je statický moment [Nm], m je hmotnost závaží [kg], g je gravitační zrychlení [m/s^2] a r je délka páky (vzdálenost závaží od osy) [m]

Příklad výpočtu 1. řádku **Tab. 1**:

$$M = 0,500 \cdot 9,81 \cdot 0,200 = 0,981 \text{ Nm}$$

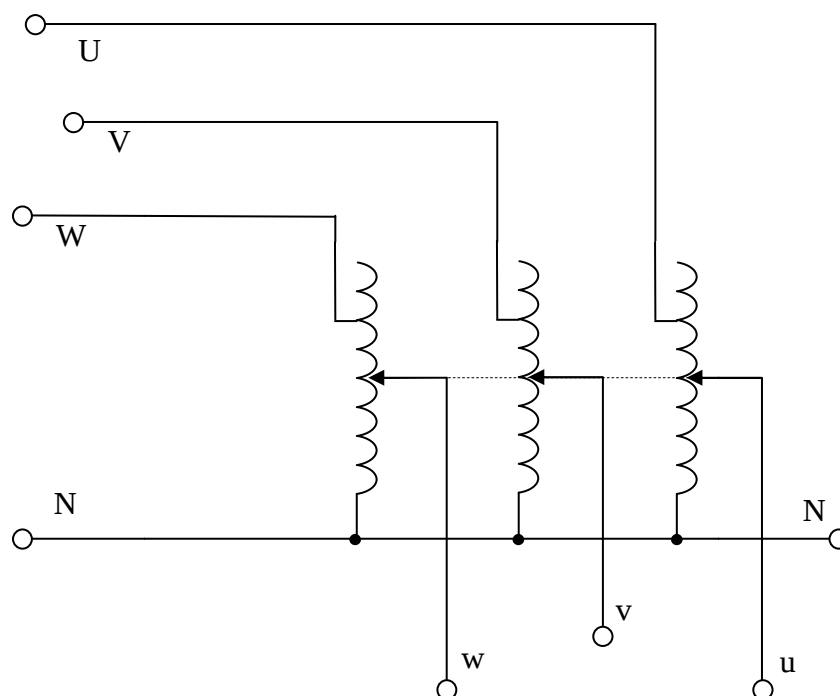
Tabulka ukazuje, že velikost statického momentu se liší v různých výchylkách jen nepatrně. Statický moment je způsoben z největší části třecí silou mezi uhlíkovými kartáči a vinutími autotransformátoru. Mezi těmito částmi navíc vzniká přechodový odpor, který se v průběhu polohy znatelně mění. Velikost přechodového odporu je silně závislá na tloušťce zoxidované vrstvy na povrchu vinutí, která je pohybem kartáče po vinutí snižována, a taky na velikosti vedeného proudu. Hodnoty přechodového odporu tak nelze jednoznačně určit. Během měření na autotransformátoru byly naměřeny hodnoty odporu v rozsahu 2,5 až 0,5 Ω . Pro zajištění stability ovládaného mechanismu jsou uhlíkové jezdce na hliníkových chladičích vybaveny protizávažím, aby nedocházelo k samovolnému pohybu kartáčů, a tím ke změně transformačního poměru. Při návrhu pohonu je potřeba nezanedbat trojici pohyblivých ramen, protože jejich hmotnost se projeví na dynamickém momentu, který bude potřeba vykonat při regulaci.

Pohyblivá ramena jsou složena z profilovaného nosníku, na jehož jednom konci je vodivý uhlíkový kartáč s hliníkovým chladičem a na druhém konci je ocelové protizávaží. Jezdec s hliníkovým chladičem je uchycen na keramickém izolátoru. Viz. **Obr. 1**. Podle modelu ramena, který byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional, je jeho těžiště ve středu otvoru pro procházející osu. Moment setrvačnosti pro hlavní osu byl programem spočten na $1,447 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Celková hmotnost jednoho ramene je podle výpočtu modelu 0,353 kg. Zjištěné údaje budou sloužit k výpočtu potřebného regulátoru.



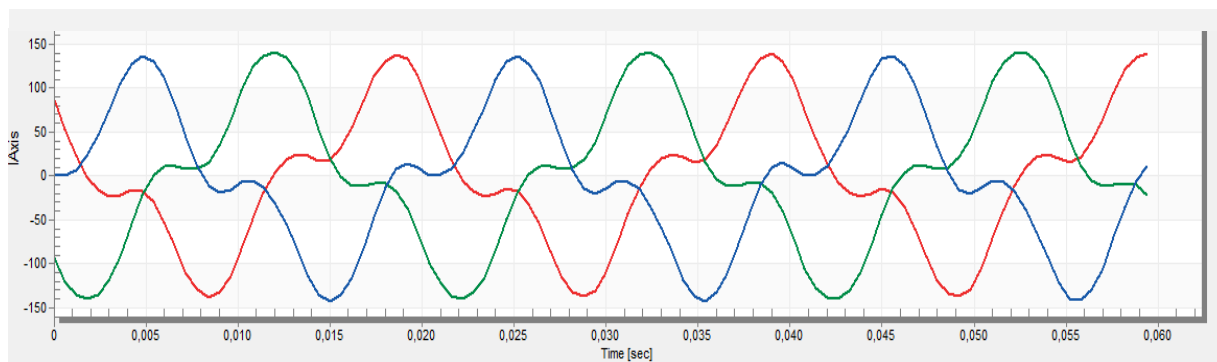
Obr. 1: Model ramena autotransformátoru s jezdcem a protizávažím.

Jak bylo uvedeno výše, trojfázový autotransformátor je složen ze 3 jednofázových modulů, které jsou spojeny v řadě za sebou pomocí závitových tyčí a distančních matic. Jejich středy prochází společná osa, na níž jsou uchyceny pohyblivá ramena s kartáči. Osa prochází skrz přední modul a na jejím konci je madlo, které slouží pro otáčení osy. Otáčením lze plynule regulovat převodový poměr všech tří fází najednou.

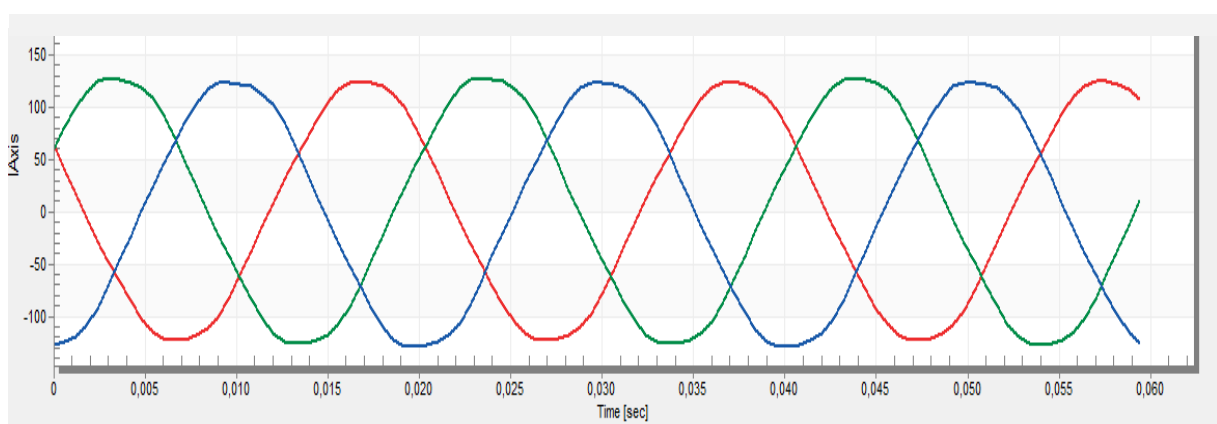


Obr. 2: Schéma autotransformátoru zapojeného do hvězdy

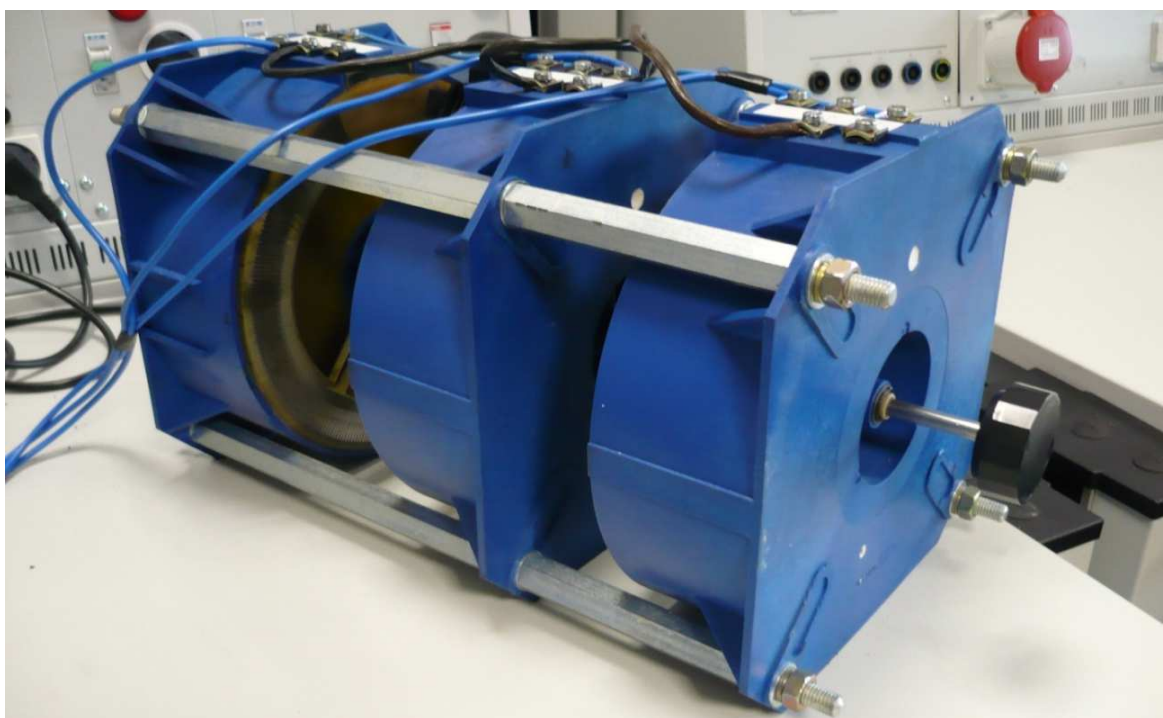
Každý modul je osazen svorkovnicí pro zapojení primárního i sekundárního vinutí. Zapojení lze kdykoliv změnit. V současnosti jsou vinutí zapojená do hvězdy. Její střed není připojen k střednímu vodiči sítě. Při napájení autotransformátoru naprázdno jsou tvary výstupních napětí zdeformované sinusovky. Tyto deformace jsou způsobeny pravděpodobně odlišnými magnetizačními proudy všech tří modulů. Tento jev může způsobovat problémy při měření výstupního napětí a lze jej vyřešit připojením středu vinutí ke středním vodiči sítě. Výstupní napětí pak budou mít tvary čistých sinusovek. Průběhy výstupního napětí jsou na Obr. 3 a na Obr. 4.



Obr. 3: Průběhy zdeformovaného výstupního napětí s nepřipojeným středním vodičem



Obr. 4: Průběhy nezdeformovaného výstupního napětí s připojeným středním vodičem



Obr. 5: Autotransformátor



3 POHONY

3.1 Pohony se střídavými motory

Pohony se střídavými motory jsou velmi rozšířené. Mezi hlavní vlastnosti těchto pohonů patří vysoká míra spolehlivosti a bezúdržbový provoz. Motory jsou často napájeny přímo ze sítě střídavým napětím, nebo frekvenčními měniči, které zajišťují jejich optimální řízení. Motory poháněné střídavým napětím se používají nejčastěji pro aplikace s vyššími výkony, zpravidla 300 W a výše, výjimkou nejsou motory s výkony v řádech megawattů. Rovněž se pro speciální aplikace používají střídavé motory s výkony v řádech wattů. Střídavé motory jsou nejrozšířenější v průmyslových aplikacích, kde jsou nezbytné pro jejich spolehlivost a bezúdržbový provoz, který je zajištěn především jejich jednoduchou konstrukcí a absencí komutátoru, či jiných kluzných kontaktů. Horší vlastnosti motory projevují při jejich rozběhu nebo změně řízení. Pro rozběh se často používá frekvenčních měničů nebo přepínání zapojení vinutí hvězda/trojúhelník. Střídavé motory se podle jejich chodu dělí na motory synchronní a asynchronní. [2]

3.1.1 Asynchronní motory

Asynchronní motor je vhodný pro aplikace, které nevyžadují konstantní rychlost otáčení. Mezi klady motoru patří zejména reakce na skokovou změnu zatížení. Nevýhodou je složitější regulace otáček, které je potřeba fyzicky měřit na výstupu motoru, protože nejsou vlivem proměnného skluzu konstantní. Skluz se mění se zatížením motoru. Konstrukčně patří asynchronní motor k nejjednodušším motorům. Jeho stator je tvořen vinutím. Rotor se často skládá z klecového vinutí, ve kterém se indukují proudy z magnetického pole statorového vinutí. Čím je větší rozdíl rychlosti otáčení rotoru od magnetického pole statoru, tím jsou indukované proudy větší. Indukované proudy svými silovými účinky otáčejí rotor. Motory jsou proto také nazývány jako indukční. Výhodou je, že asynchronní motor se dokáže po připojení na síť sám rozběhnout. [2]

3.1.2 Synchronní motory

Synchronní motory, jak napovídá jejich označení, pracují synchronně s rotujícím magnetickým polem statoru. Jejich stator je stejný jako u asynchronních motorů a rotor tvoří zdroj stacionárního magnetického pole. U větších motorů jsou rotory tvořeny samostatnými vinutími. Menší motory jsou zpravidla vybaveny permanentními magnety. Rotující magnetické pole statoru s sebou táhne magnetické pole rotoru a ten se tak otáčí stejnými otáčkami. Motor se nedokáže po připojení na síť sám rozběhnout. Na skokové zatížení reaguje buď změnou



zátěžného úhlu, což je geometrický posun mezi polohou rotoru a výsledným magnetickým tokem, nebo vypadnutím ze synchronismu, což znamená zastavení motoru a nutnost odpojení napájení. Synchronní motor se hodí tam, kde je potřeba udržet stálé otáčky a kde nedochází ke skokové změně zatížení. [2], [3]

3.1.3 Řízení střídavých motorů

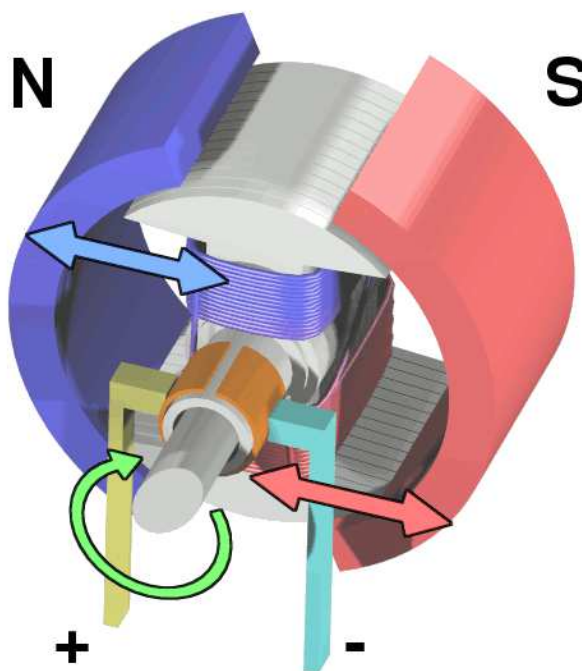
Řízení střídavých motorů je nejvýhodnější provádět frekvenčními měniči. Změna rychlosti otáčení je způsobena změnou frekvence napájecího napětí. Jiné způsoby řízení jsou neekonomické a z tohoto důvodu se dnes nepoužívají. Frekvenční měniče jsou navíc nutností pro synchronní motory, které se mají rozběhnout bez působení cizí síly. Nevýhodou frekvenčních měničů jsou jejich vysoké ceny, které zpravidla odpovídají ceně poháněného motoru. [2]

3.2 Pohony se stejnosměrnými motory

Stejnosměrný stroj je historicky nejstarším vynalezeným strojem, využíván je jak v režimu motorickém - motor, tak v režimu generátorickém, v tomto případě ho označujeme jako dynamo. Princip fungování i konstrukce stejnosměrného motoru jsou poměrně jednoduché. Motor má na svém rotoru cívku, která vytváří magnetické pole. Rotor je také nazýván kotvou. Ve statoru jsou buď permanentní magnety, nebo rovněž cívky, které tvoří druhé magnetické pole. Magnetické osy obou polí jsou navzájem kolmé. V tomto uspořádání působí maximálním momentem. Na vodiče kotvy působí síly, které způsobí jejich pohyb. Rotor se otáčí a s ním i jeho magnetické pole. Kdyby byla obě vinutí napájena stejným proudem, rotor by se pouze pootočil a zůstal ve stabilní poloze. Proto je potřeba napájet kotvu vždy takovým způsobem, aby byla magnetická pole statoru a rotoru navzájem kolmá. To vyžaduje větší počet budících cívek kotvy vedle sebe. Zapojení cívek musí být provedeno tak, aby se mohlo jejich magnetické pole pohybovat. Relativní pohyb pole, které má vždy stejnou geometrickou šířku, se provádí odpojením první cívky za současného připojení poslední cívky. Celý pól magnetického pole se posune proti směru otáčení rotoru o vzdálenost mezi sousedními cívkami. Pro tyto účely má stejnosměrný motor komutátor, který tvoří jeho nejslabší místo, protože podléhá opotřebení a vyžaduje údržbu. Je zdrojem rušení a je náchylný na čistotu prostředí. Skládá ze dvou uhlíkových kartáčů, které kloužou po lamelách a vedou do nich proud. Cívky kotvy jsou připojeny na lamely. Uhlíkové kartáče jsou uchyceny nehybně vůči statoru a spolu s lamelami na rotoru zajišťují takovou geometrickou vazbu, že je magnetická osa pole tvořeného cívkami připojenými na lamely vždy kolmá na magnetickou osu statoru. Aby nebyl chod motoru trhaný, umísťuje se do rotoru co

nejvíce cívek, vzdálenost 2 sousedních cívek určuje tzv. cívkový krok, což je vzdálenost cívek, které mohou být napájeny opačným proudem.

V případě, že má motor ve statoru místo magnetů vinutí, rozlišujeme několik typů motorů podle způsobu zapojení statorových a rotorových cívek. První možností je motor sériový, kdy jsou obě vinutí zapojena do série. Cívkami protéká vždy stejný proud. Další možností je motor derivační, kdy jsou obě vinutí zapojena paralelně. Na obou cívkách je tudíž stejné napětí a celkový proud tekoucí do motoru se rozdělí do rotoru a statoru. Kompaundní motor má část statorového vinutí zapojenou do série s rotorem a část zapojenou paralelně k rotoru. Motor má vlastnosti obou strojů, případně může pouhou změnou napájení přecházet z jednoho stavu do druhého. Posledním typem je motor s cizím buzením, kdy má statorové vinutí vlastní zdroj proudu a není nijak závislé na proudu tekoucím do rotoru. Vinutí místo magnetů se používá hlavně u velkých motorů, kde by bylo zakomponování magnetů náročné. Motory s vinutím na statoru mají rovněž lepší regulační vlastnosti. [2]



Obr. 6: Model stejnosměrného motoru s permanentními magnety [6]

3.2.1 Motor s permanentními magnety

Motor s permanentními magnety má namísto statorového vinutí magnety. Tyto magnety mají tvar válce a tvoří většinou jednu pólovou dvojici. Jediné vinutí v motoru se tak nachází na jeho rotoru. Motor je vybaven komutátorem, který rotor napájí. V tomto typu motoru je konstantní magnetický tok, proto dokážeme měnit otáčky motoru pouhou změnou indukovaného napětí.



Moment motoru je přímo úměrný proudu. U těchto motorů používáme konstantu motoru $c\Phi$, c značí konstantu motoru, danou jeho provedením a geometrickými rozměry a Φ značí jeho konstantní magnetický tok. Z tohoto důvodu se jako konstanta používá součin c a Φ . (U motorů s vinutím na statoru se používá konstanta motoru K , dána provedením a geometrickými rozměry motoru). Magnety bývají vybaveny zpravidla motory malých rozměrů a výkonů. Odpadá u nich starost o napájení a údržbu budícího statorového vinutí. Dnes se používají magnety z různých materiálů. Nejvýznamnější roli při volbě magnetů hraje jejich cena. Motor lze vybavit silnými a kvalitními magnety za vysokou cenu, případně obyčejnými, např. feritovými magnety. [5], [9]

3.2.2 Řízení DC motorů

Stejnoseměrné motory lze řídit několika způsoby. Existuje možnost řízení změnou napětí na kotvě motoru, nebo změnou proudu buzení (platí pro motory s vinutým buzením).

Nejjednodušší a historicky nejstarší způsob řízení je řízení odporovou regulací. Pomocí předřadných rezistorů dochází k maření části elektrické energie jdoucí do motoru, a tím omezení napětí nebo proudu podle potřeby. Proměnné nebo pevné rezistory lze zapojovat před celými motory, případně zvlášť před vinutí statoru či rotoru, a motor lze podle potřeby řídit. Jde o řízení nevhodné, protože část energie je proměňována na teplo. Princip je založen na jednoduchém způsobu změny celkového odporu obvodu, a tím způsobenou změnou proudu, který do něj teče, resp. omezení napětí, které bude na svorkách motoru, nebo části jeho vinutí. [2]

Další možný způsob řízení je řízením usměrňovačem. Použít lze např. tyristorový nebo tranzistorový usměrňovač napájený ze sítě. Změnou řídicího úhlu usměrňovače se mění napětí na jeho výstupu. Propracovanější systémy umožňují řízení ve všech kvadrantech spojené s rekuperací energie. [10]

Mezi způsoby napájení stejnosměrných motorů ze sítě se střídavým napětím patří mimo jiné kombinace transformátoru s usměrňovačem, např. Graetzovým obvodem. Transformátory mohou být s pevným nebo proměnným převodem. Regulace je poměrně přesná, jednoduchá a hospodárná. [10]

Často používaný způsob řízení je řízení pomocí spínaných měničů typu DC/DC. Tento způsob řízení se nazývá řízení PWM, což je zkratka názvu pro pulzně šířkovou modulaci, v anglickém jazyce "Pulse Width Modulation". PWM řízení je velice populární, protože se jedná o poměrně jednoduchý a spolehlivý způsob řízení. Pulzně šířková modulace využívá pouze dvou hodnot řídicího signálu, a to logické nuly a jedničky. Princip spočívá ve změně poměru doby zapnutí a vypnutí napájení. Hodnota řízení PWM může nabývat 0-100 %, této veličině se říká



střída. Je to část doby z celé periody, kdy je tranzistor sepnut. Tento způsob se využívá především v polovodičové spínací technice, protože právě v těchto dvou stavech (otevřený/zavřený) mají tranzistory nejmenší ztráty. Frekvence spínání je různá. Běžně začíná na jednotkách kHz a končí na desítkách (případně stovkách) kHz. PWM řízení se používá např. u řízení světelného toku, řízení napětí a proudu u topných těles, a také řízení stejnosměrných motorů. Hodnota středního napětí na zátěži se počítá jako součin napětí měniče a střídá.

$$U_z = U_d \cdot s \quad (2)$$

U_z je střední napětí na zátěži (V), U_d je napětí měniče (V) a s je střída.

Vlivem indukčnosti vinutí motoru začne při sepnutí tranzistoru motorem protékat proud, který bude narůstat. Při vypnutí tranzistoru bude klesat. Jev se opakuje s každou periodou. Vzniká tzv. zvlnění proudu, které je největší při střídě PWM 50%. Čím je frekvence nosného signálu větší, tím bývá hodnota zvlnění menší. Pozornost je potřeba věnovat zvlnění proudu při jeho nízkých hodnotách, kdy je polovina hodnoty zvlnění proudu větší než jeho střední hodnota. Potom nastává jev, kterému se říká režim přerušovaných proudu. Dolní špičky zvlnění se dostávají pod nulovou hodnotu proudu a proud není v těch chvílích veden. Na zátěži se v tomto okamžiku objevuje napětí U_i , neplatí potom rovnice (2). [4]

3.3 Model DC motoru

Při práci s modelem stejnosměrného motoru vycházíme z předpokladu, že má konstantní magnetický tok Φ a konstantu c , což je u motorů s permanentními magnety zaručeno. Jejich regulace je poměrně jednoduchá. Otáčky stejnosměrného motoru jsou přímo úměrně závislé na napětí a jeho moment na proudu. Závislosti vycházejí z napět'ových a proudových rovnic.

Napět'ová rovnice:

$$U_i = c\Phi \cdot \omega \quad (3)$$

$c\Phi$ je konstanta motoru (Wb), U_i je indukované napětí v kotvě (V) a ω je úhlová rychlost rotoru (rad/s).

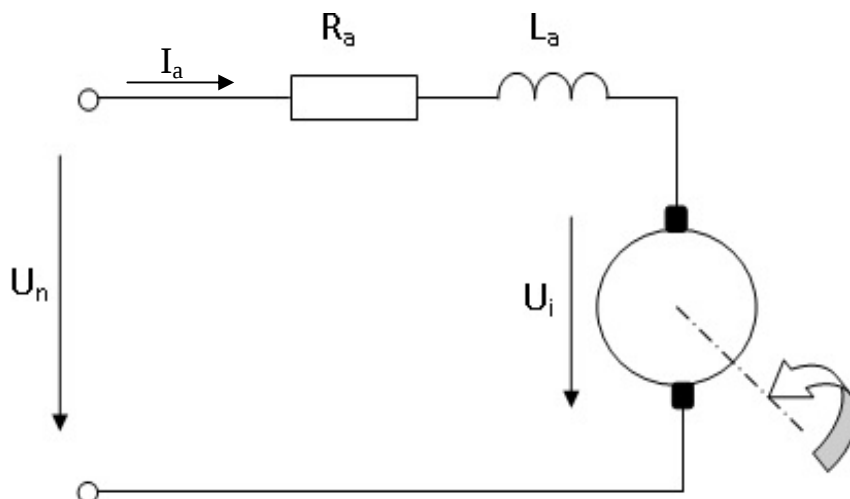
Proudová rovnice:

$$M = c\Phi \cdot I \quad (4)$$

M je točivý moment hřídele motoru (Nm) a I je proud tekoucí motorem (A).

V obou rovnicích vystupuje konstanta motoru $c\Phi$. Ta je dána především konstrukčním řešením motoru. Závisí na velikosti vzduchové mezery, na magnetické indukci, geometrických rozměrech, materiálu magnetů apod.

Pro určení výchozích vlastností stejnosměrného motoru používáme jeho náhradní schéma.



Obr. 7: Náhradní schéma SS motoru s permanentními magnety

Náhradní schéma stejnosměrného motoru se skládá z rezistoru R_a , který nahrazuje ohmický odpor motoru na jeho svorkách. Největší podíl na tomto odporu má odpor vinutí. Další část může tvořit přechodový odpor mezi kartáči a komutátorem, resp. odpor na kluzném kontaktu. Cívka L_a v náhradním schématu zastupuje indukčnost motoru, kterou tvoří závity vinutí. V kotvě motoru se vlivem neustálých změn elektromagnetického pole indukuje napětí U_i . Jako v každém elektrickém obvodu musí i v obvodu náhradního schématu platit Kirchhoffovy zákony a Ohmův zákon. Úbytek napětí na rezistoru R_a a úbytek napětí na indukčnosti L_a jsou dány proudem motoru.

$$U_{R_a} = R_a \cdot I_a \quad (5)$$

$$U_{L_a} = L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \quad (6)$$

Po dosazení do druhého Kirchhoffova zákona.

$$U_n = U_{R_a} + U_{L_a} + U_i \quad (7)$$

Dosazením z rovnic (5) a (6) a úpravou dostaneme rovnici (8).



$$U_n = I_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + U_i \quad (8)$$

Známe-li otáčky hřídele a konstantu motoru $c\Phi$, můžeme dosazením rovnice (3) získat rovnost ve tvaru:

$$U_n = I_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + c\Phi \cdot \omega \quad (9)$$

Pro potřeby návrhu regulátor je nutné znát přenos motoru. Využíváme k tomu jeho matematický model. Obvod kotvy motoru je popsán rovnicí (8). Po Laplaceově transformaci získáváme rovnici:

$$U = R_a \cdot I(p) + pL_a \cdot I(p) + U_i(p) \quad (10)$$

Přenos motoru $F_1(p)$ je poměr výstupu ke vstupu. Pro návrh regulátoru proudu se přenos motoru počítá při zabrzděném rotoru, to znamená, že hodnota indukovaného napětí je nula a úbytek napětí na kotvě motoru je tvořen pouze ohmickým odporem a indukčností vinutí. Vstupem do motoru je typicky napětí a výstupem motoru je jeho moment. Vstupní napětí se počítá jako napájecí napětí motoru, od kterého se odečte jeho indukované napětí. Matematický model je potom popsán rovnicí (11).

$$F_1(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p)} = \frac{1}{R_a + pL_a} = \frac{1/R_a}{1 + p\tau_a} \quad (11)$$

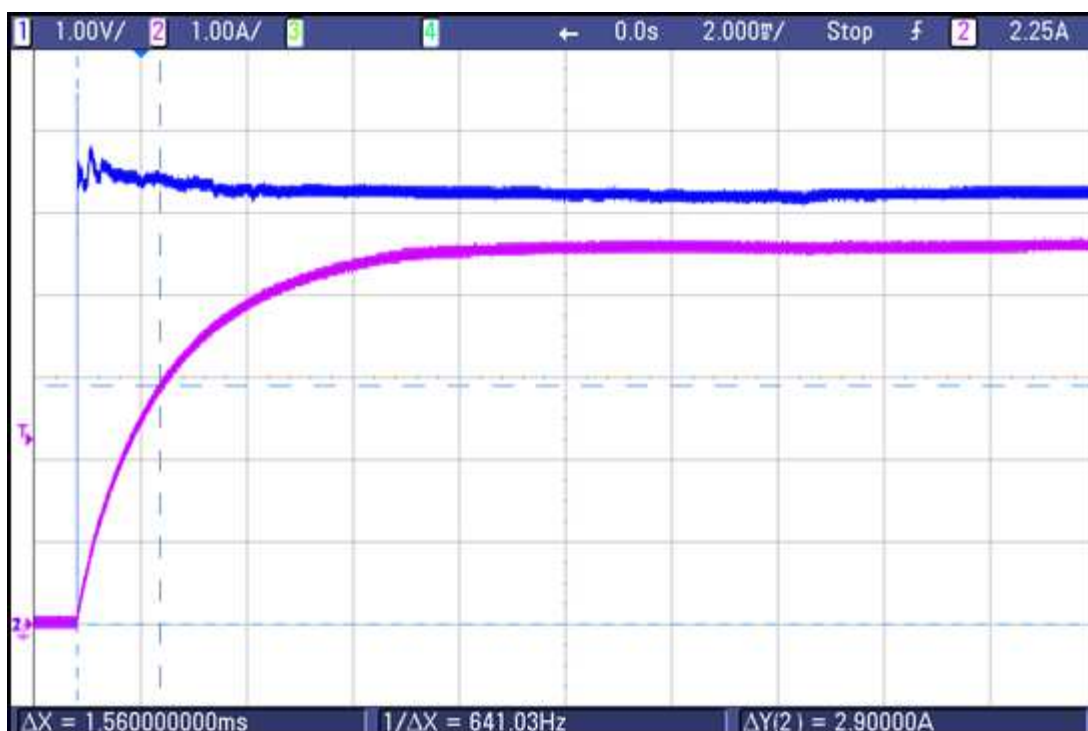
τ_a je časová konstanta motoru. Tu zjistíme podle rovnice (12). [4], [11]

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (12)$$

4 POHON AUTOTRANSFORMÁTORU

4.1 Motor pro pohon autotransformátoru

Pro pohon autotransformátoru byl zvolen stěračový DC motor z osobního automobilu Škoda Favorit. Motor je napájen napětím 12 V. Na svém výstupu má převodovku, díky které je vhodný pro přímé spojení s osou autotransformátoru. Tento komutátorový motor s permanentními magnety má celkem 3 kartáče, tedy i 3 různé kombinace připojení napájecího napětí. Každé dvojici odpovídá jedna konstanta motoru $c\Phi$. Prakticky to dovoluje měnit otáčky motoru při konstantním napájecím napětí pouhou změnou napájecích vodičů. Každé dvojici odpovídá jedna konstanta a tudíž jedna rychlost otáčení. První dvojice kartáčů svírá mezi sebou úhel 180° , druhá dvojice úhel přibližně 120° a poslední 60° . Motor je pro účely pohonu autotransformátoru zapojen na dvojici kartáčů svírajících mezi sebou úhel 180° . Při tomto zapojení má motor největší konstantu $c\Phi$, to znamená, že bude mít největší možný moment při stejné hodnotě proudu. Velikost krouticího momentu je přitom nejdůležitějším požadavkem na motor. Určení všech potřebných parametrů motoru bylo provedeno měřením a výpočty. Z měření přechodného děje na motoru byla určena indukčnost motoru, jeho elektromagnetická časová konstanta a elektrický odpor. Měření bylo provedeno skokovým připojením napětí k motoru při zabrzděném rotoru. Záznam průběhu proudu při skokové změně napětí je na Obr. 8.



Obr. 8: Průběh napětí a proudu v motoru - modrá - napětí, fialová - proud



Elektromagnetická časová konstanta, tedy doba, za kterou proud dosáhne 63 % hodnoty svého ustáleného stavu, je 1,56 ms. Odpor motoru byl vypočten podle Ohmova zákona z hodnot naměřených na motoru v ustáleném stavu.

$$R_a = \frac{U}{I} = \frac{5,2}{4,6} = 1,13 \, \Omega \quad (13)$$

R_a je elektrický odpor motoru (Ω). U je napětí na motoru (V) a I je proud tekoucí motorem (A).

Indukčnost motoru L_a byla vypočtena podle vzorce na výpočet elektromagnetické časové konstanty.

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (14)$$

$$L_a = R_a \cdot \tau_a = 1,13 \cdot 1,56 \cdot 10^{-3} = 1,76 \cdot 10^{-3} \, \text{H} = 1,76 \, \text{mH} \quad (15)$$

L_a je indukčnost motoru (H), τ_a je elektromagnetická konstanta motoru (s).

Z výsledku měření otáček, proudu a napětí byl vypočtena konstanta motoru $c\phi$. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v Tab. 2.

Tab. 2 : Změřené a vypočtené hodnoty z měření na motoru

U [V]	I [A]	n [min ⁻¹]	U _i [V]	c ϕ [Wb]	směr otáčení
9	0,675	1599	8,23725	0,049193	+
12	0,71	2174	11,1977	0,049186	+
15	0,76	2786	14,1412	0,048470	+
9	0,67	1644	8,2429	0,047879	-
12	0,75	2238	11,1525	0,047586	-
15	0,76	2862	14,1412	0,047183	-

Příklad výpočtu 1. řádku:

$$U_i = U - R_a \cdot I = 9 - 1,13 \cdot 0,675 = 8,23725 \, \text{V}$$

$$c\phi = \frac{U_i}{\omega} = \frac{U_i}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{8,23725}{2\pi \frac{1599}{60}} = 0,049193$$

Průměrná konstanta motoru $c\phi = 0,04825$.

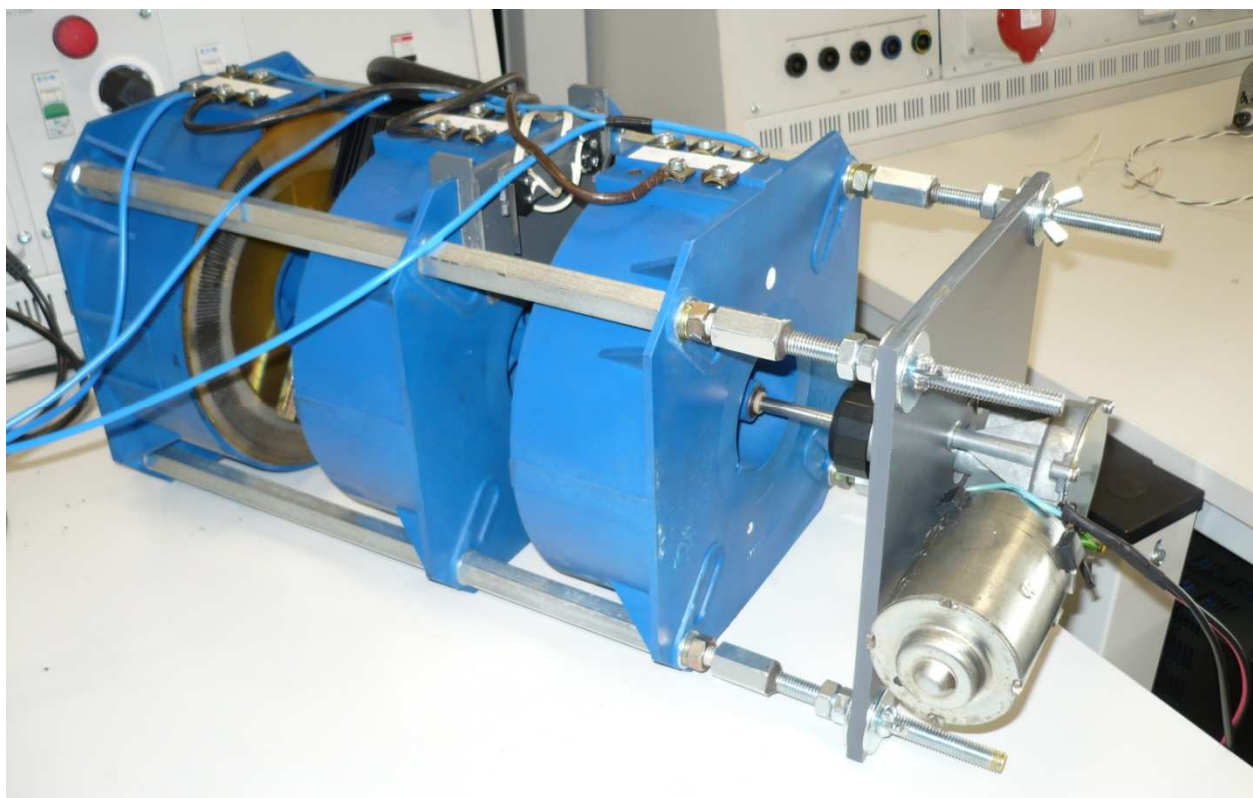
Motor má na svém výstupu implementovanou převodovku. Ta se skládá z jednoho šnekového a jednoho přímého převodu. Převodový poměr převodovky je $i = 66,23$.

4.2 Konstrukce pohonu

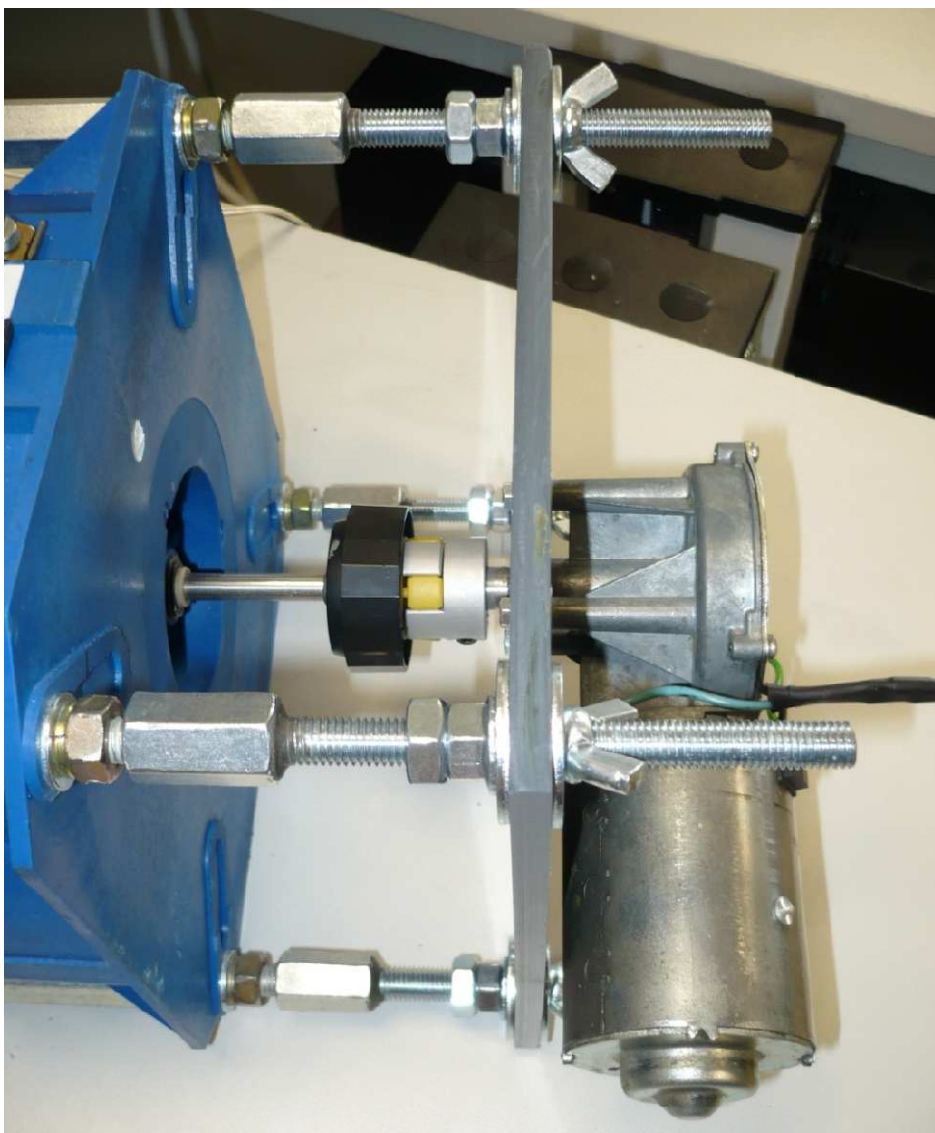
Pohon autotransformátoru byl navržen jako přídatné zařízení. Hlavním požadavkem na pohon bylo, aby nenarušoval konstrukci autotransformátoru a nebylo potřeba na něm vytvářet nevratné změny. Současně bylo žádoucí, aby bylo možno pohon snadno montovat i demontovat bez použití nářadí a proces nebyl zdlouhavý.

4.2.1 Uchycení motoru

Stěračový motor je uchycen pomocí 3 šroubů M6 za jeho uchycovací adaptéry. Ty se nacházejí na jeho převodovce a svými konci vytvářejí rovinu kolmou na výstupní osu motoru. Motor je uchycen na plastové desce, která je rovnoběžná s čelem autotransformátoru a je od něj odsazena o 90 mm. Deska je vyrobená z plastu o tloušťce 8 mm. K autotransformátoru je uchycena pomocí 4 závitových tyčí a průměru 10 mm. Ty jsou spojeny pomocí prodlužujících matic s tyčemi svazující celý autotransformátor.



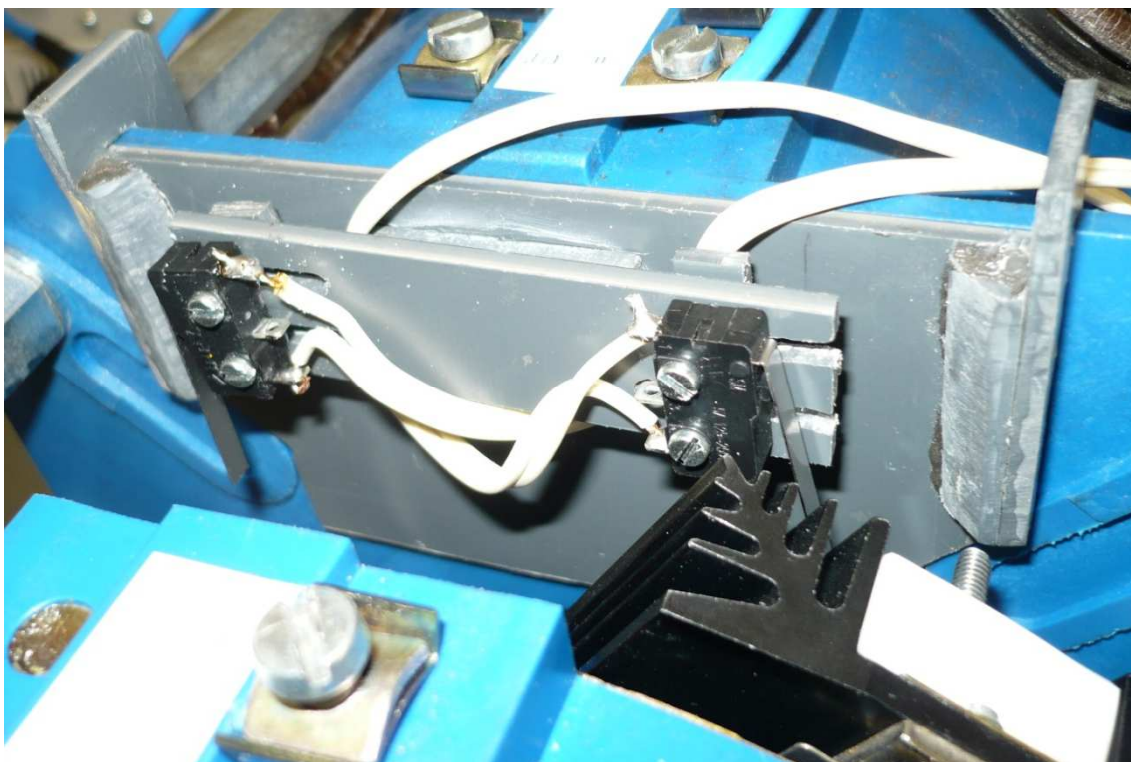
Obr. 9: Autotransformátor s pohonem



Obr. 10: Pohon autotransformátoru

4.2.2 Koncové senzory

Dorazové čidla jsou realizovány pákovými mikrospínači. Pro každou koncovou polohu je použit jeden. Tyč vycházející z chladiče uhlíkového kartáče se v koncových polohách opírá o páky mikrospínačů a spíná je, jejich rozpojovací kontakt přeruší proud protékající obvodem. Pro signalizaci koncové polohy bylo záměrně voleno rozpojení proudovodné dráhy, aby se zvýšila bezpečnost pohonu a při případném přerušení jeho obvodu nebo destrukci čidel se pohon zastavil. Provoz pohonu bez zapojení koncových čidel se nedoporučuje, protože by mohl poškodit autotransformátor a vyžadoval by vodivé propojení svorek pro zapojení koncových čidel.



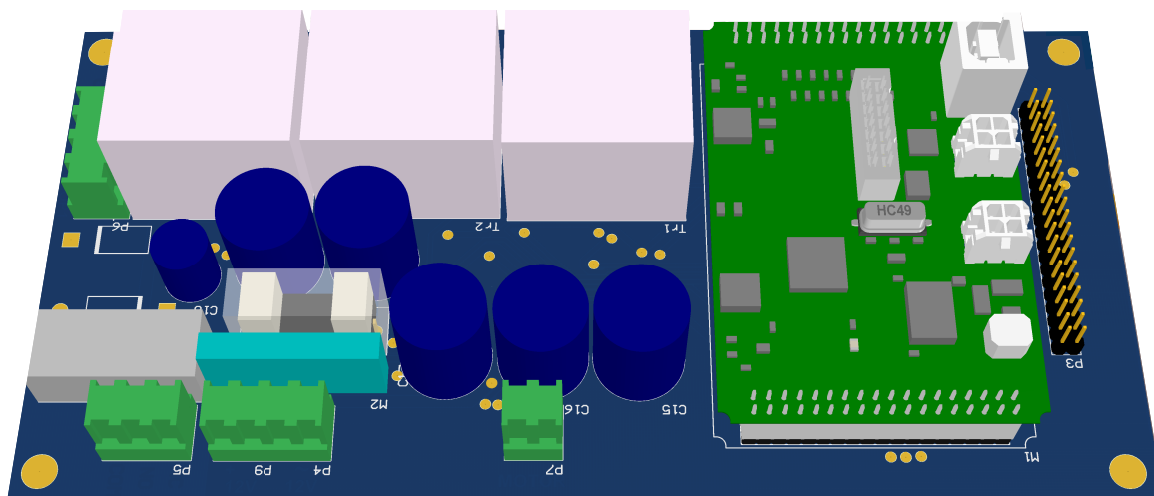
Obr. 11: Senzory koncových poloh

Polohu čidel lze měnit díky vyfrézovaným drážkám. Takto lze snadno vyladit polohu, kdy bude signalizovaná koncová poloha autotransformátoru.

4.3 Hardware

Hardware pohonu se skládá z celkem 3 částí. První, řídicí část tvoří především mikroprocesor. Druhá, silová část je složena z výkonových tranzistorů a jejich budičů. Třetí částí je část měření, ve které se nacházejí transformátory pro měření výstupního napětí a rezistory pro měření proudu tekoucího motorem. Hardware byl z důvodu kompaktnosti navržen na jeden plošný spoj o rozměrech 194 mm na 95 mm. K výrobě byl použit oboustranný cuprexit. Plošný spoj byl vyroben fotocestou v laboratořích na UVEE. Celé schéma včetně plánu plošného spoje bylo vytvořeno v programu Altium Designer.

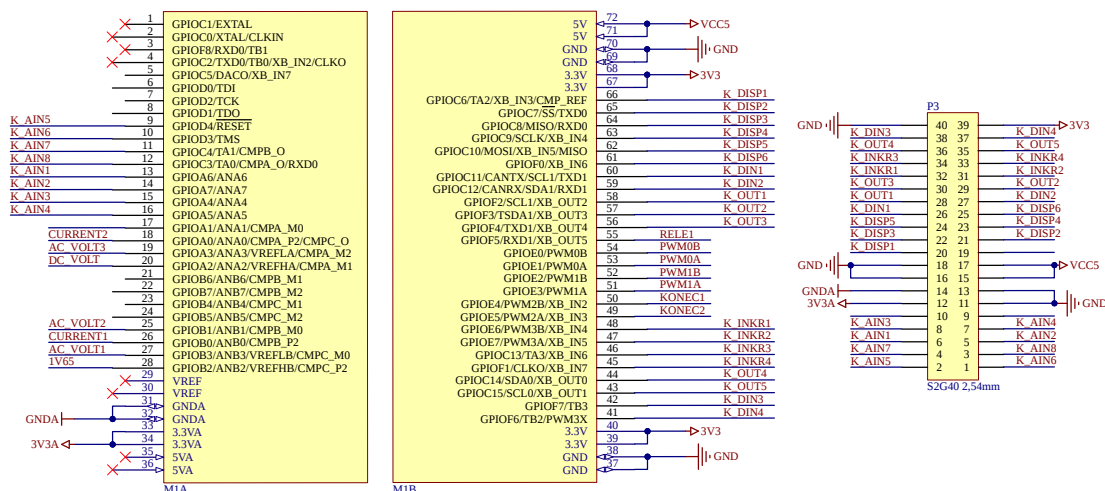
Plošný spoj je vybaven usměrňovacím můstkem a může být napájen stejnosměrným i střídavým napětím. Navržené napájecí napětí plošného spoje odpovídá napájecímu napětí motoru, tj. 12 V. Obvod je chráněn proti přepětí sérii dvou zenerových diod. Hladina napětí jejich stabilizace je 18,2 V. Při napájecím napětí do této hodnoty nedojde k destrukci plošného spoje ani jeho komponent. Krátkodobé přepětí v obvodu může vzniknout např. prudkým brzděním motoru.



Obr. 12: Návrh plošného spoje v Altium Designer

4.3.1 Řídicí část

Řídicí část tvoří hlavně konektory pro připojení mikrokontroléru Freescale, ve kterém probíhá kompletní řízení pohonu. Řídicí část je vzájemně propojena se silovou a měřicí částí. Do mikrokontroléru jsou vedeny z měřicí části výstupy ze všech potřebných měření napětí nebo proudů a vyvedeny z něj jsou do silové části signály pro řízení tranzistorů a ovládání relé. Dále je deska osazena 40 pinovým konektorem, který slouží jako příprava pro připojení displeje, tlačítek, inkrementálních čidel a potenciometrů. Na konektor jsou vyvedeny digitální a analogové vstupy a digitální výstupy. Tento konektor umožní v budoucnu připojit k hardwaru desku osazenou displejem a tlačítky, která rozšíří uživatelský vstup. K ovládání pohonu pak nebude potřeba připojení k PC.



Obr. 13: Část schématu s popisem signálů na konektorech



4.3.2 Měřicí část

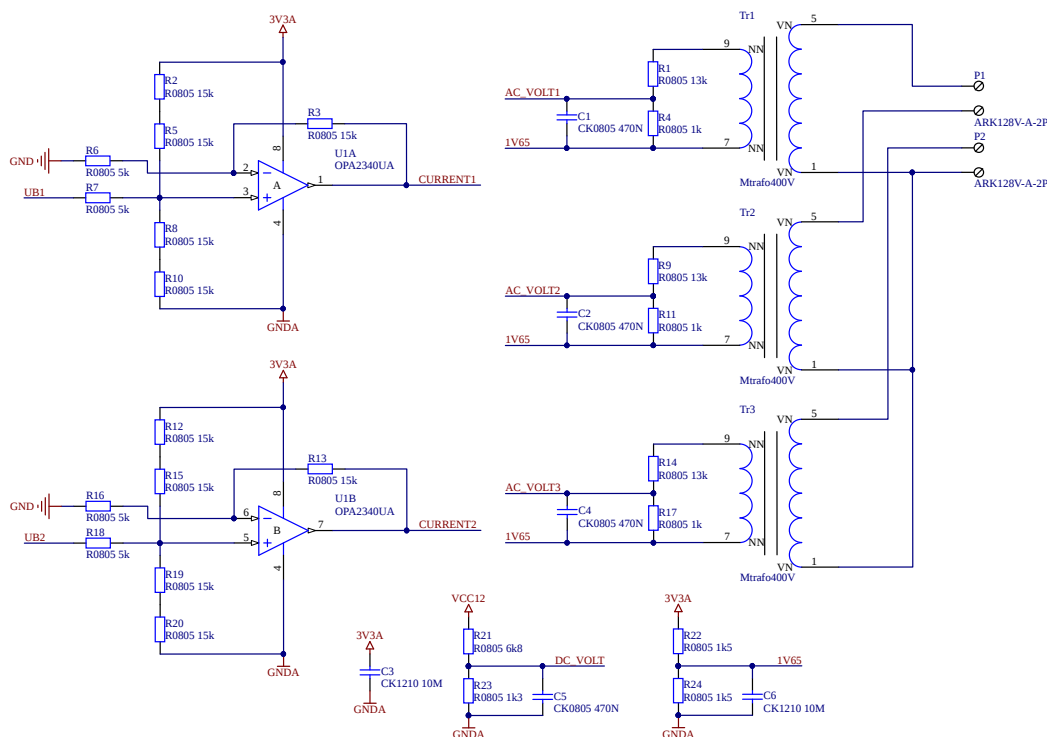
Pro potřeby regulátoru jsou na plošném spoji měřena výstupní napětí autotransformátoru na všech třech fázích. Výpočtem v programu je známá aktuální hodnota napětí na výstupu. Toto napětí je zpětnou vazbou regulátoru. Měření probíhá ve 3 napěťových transformátorech, které měří napětí každé fáze vůči středu vinutí zapojeného do hvězdy. Připojení vodičů z výstupu autotransformátoru je realizováno šroubovacími svorkami. Svorkovnice obsahují 4 zdířky, 3 pro jednotlivé fáze a 1 společnou pro střední vodič. Transformátory mají převod udávaný výrobcem 400V/12V. Hodnota napětí 400V byla zvolena záměrně, aby magnetizační proud nezkresloval měřené napětí. Běžné měřicí transformátory na 230 V jsou přesycené a výstupní napětí nemají tvary sinusovek. Vlivem kolísání napětí v síti či nastavením převodového poměru nad 100 % (autotransformátor umožňuje 112, 5%) je maximální uvažované napětí, které se může na výstupu autotransformátoru objevit 285 V efektivní hodnoty. Na tuto hodnotu je dimenzováno i měření výstupního napětí.

$$U_{dim} = U_n \cdot k_{tr,max} \cdot t_{s,max} = 230 \cdot 1,125 \cdot 1,1 = 284,7 \text{ V} \quad (16)$$

U_{dim} je dimenzované napětí (V), U_n je jmenovité napětí sítě (V), $k_{tr,max}$ je maximální převod transformátoru (-), $k_{tr,max} = 1,125$ a $t_{s,max}$ je maximální tolerance napětí v síti (-), $t_{s,max} = \pm 10 \%$

Rozsah měření mikrokontroléru je 0 - 3,3 V. Na nezatíženém měřicím transformátoru byl zjištěn převodový poměr 230V/25,14 V. Při uvažovaném maximálním napětí 285 V se bude na výstupu měřicího transformátoru vyskytovat až 31,15 V (efektivní hodnoty). Na výstupech všech 3 měřicích transformátorů jsou proto odporové děliče s poměrem vstupu a výstupu $(31,15 \cdot \sqrt{2})\text{V}/1,65\text{V}$. Na jejich společný uzel je přivedena referenční hladina napětí 1,65 V. Napětí na odporovém děliči bude mít průběh sinusovky s amplitudami v rozsahu hodnot 0 - 1,65 V, resp. 1,65 - 0V a 1,65 - 3,3 V. Napětí "peak-peak" bude dosahovat hodnot 0 - 3,3 V, tj. přesně pro potřeby mikrokontroléru. Referenční napěťová hladina 1,65 V je rovněž pro kontrolu měřena a je tvořena odporovým děličem s poměrem vstupu a výstupu 3,3V/1,65V. Zdroj napětí hodnoty 3,3 V se nachází na desce s mikrokontrolérem. Pro potřeby regulátoru je dále měřeno napětí meziobvodu měniče, to je provedeno odporovým děličem v poměru vstupu a výstupu 20,56V/3,3V, a proudy tekoucí oběma větvemi měniče. Měření proudu je realizováno měřením úbytku napětí na rezistorech. Bočníky, které spojují větve měniče se zemí jsou tvořeny paralelním spojením 15 rezistorů s hodnotou elektrického odporu 1 Ω . Protože jsou bočníky spojeny se zemí digitální částí mikroprocesoru a měření probíhá v analogové části, je měření provedeno pomocí operačních zesilovačů OPA2340. Aby bylo umožněno měřit proudy tekoucí

směry, je jako referenční hodnota zesilovače připojeno opět napětí 1,65 V. Výsledný převod měřicího obvodu proudů je $(-8,25 \text{ až } 8,25)\text{A}/(0 \text{ až } 3,3)\text{V}$.



Obr. 14: Schéma měřicí části hardwaru

4.3.3 Silová část

Silovou část tvoří napájení obvodu a řízení motoru. Napájecí svorky jsou zapojeny před usměrňovací můstek, který umožňuje napájení střídavým i stejnosměrným proudem. Napájení řídicí části, tj. mikrokontroléru, je zajištěno stabilizátorem pevného napětí 5V 7805. Napájení zbytku obvodu na hladině napětí 12V je chráněno tavnou pojistkou se jmenovitým proudem 8A. Měnič je navržen jako 4-kvadrantový, aby byla zajištěna maximální dynamika pohonu. Čtyřkvadrantový měnič je tvořen 2 tranzistory MOSFET s N-kanálem IRFR 4105 a 2 tranzistory MOSFET s P-kanálem IRFR 5305. Jako budiče jsou použity integrované obvody TC4428, s jedním invertujícím a druhým neinvertujícím výstupem. Každá větev je napájena jedním budičem. Budiče jsou napájeny přímo z mikrokontroléru výstupy určenými na PWM řízení. Před každým vstupem do budičů jsou signálové cesty spojeny se zemí přes velký odpor a neotevřený tranzistor MOSFET. Tranzistory jsou řízeny signály z rozpínacích kontaktů vypínačů, které tvoří dorazové čidla pohybového mechanismu autotransformátoru. V případě absence těchto čidel musí být svorky pro čidla vodivě propojeny, hrozí ale zničení autotransformátoru. Na plošném spoji se dále nachází relé s jedním přepínacím kontaktem vyvedeným na šroubovací svorkovnici. Tento kontakt může sloužit např. k ovládní stykače umístěného na výstupu autotransformátoru,

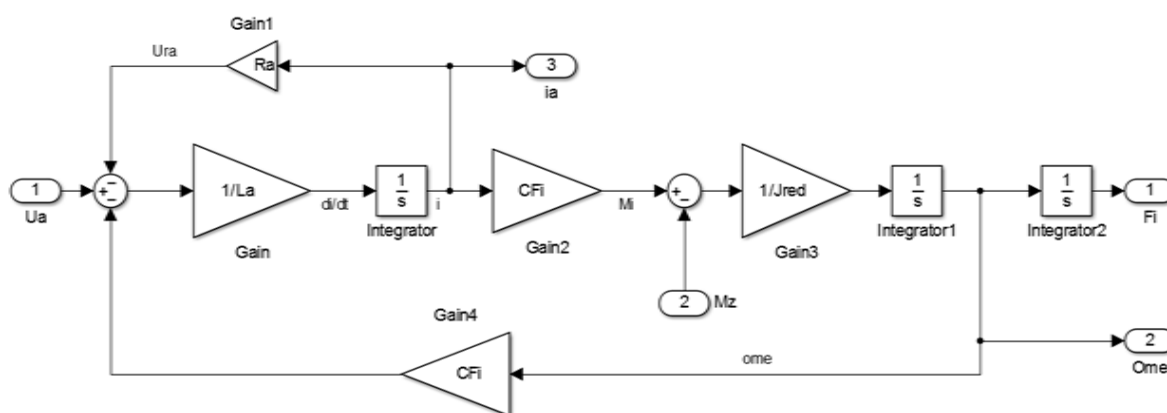
The photograph shows the physical components of the power supply unit. On the left is a blue PCB with a microcontroller (labeled 'MCP100'), several push buttons, and a USB connector. To the right are three large black electrolytic capacitors, three black toroidal transformers, and various smaller components like diodes and resistors, all mounted on a brown PCB. The text 'Bakalárska práca: Pohonná autotransformátory' is visible at the bottom of the image.

Obr. 16: Vyrobená DPS tvořící hardwarovou část pohonu

4.4 Model soustavy s DC motorem

Model vytvořený v simulinku vychází ze zjištěných hodnot stejnosměrného motoru s převodovkou a autotransfornátorem.

Prvním blokem modelu soustavy je model DC motoru. Vstupem do motoru je výstupní napětí regulátoru U_a a zátěžný moment M_z , který představuje statický moment autotransfornáturu přepočítaný přes převodový poměr převodovky na osu motoru. Výstupem z motoru jsou jeho otáčky značené ω_{me} . Proud tekoucí kotvou motoru je označen i_a , a úhel natočení rotoru Φ_i .



Obr. 17: Model DC motoru v simulinku

Hodnoty použitých veličin jsou

Tab. 3 : Hodnoty veličin použitých v model motoru

veličina	Označení	hodnota
indukčnost	L_a	$1,763 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
El. odpor	R_a	$1,13 \text{ } \Omega$
Konstanta motoru	$C\Phi_i$	$0,04825 \text{ Wb}$
Redukovaný moment	J_{red}	$5,302 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Zátěžný moment	M_z	$0,0151 \text{ Nm}$

Výpočet redukovaného momentu J_{red} :

$$J_{red} = J_{motoru} + J_{soustavy} \quad (17)$$

J_{motoru} je moment setrvačnosti rotoru motoru. Z jeho geometrickým rozměrů a hmotnosti byl spočten na $5,20321 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. $J_{soustavy}$ je moment setrvačnosti autotransfornáturu přepočítaný přes převodový poměr převodovky na osu motoru. Pro výpočet byla použita hodnota momentu



setrvačnosti vypočtena programem Autodesk Inventor pro vytvořený model ramena autotransformátoru.

$$J_{soustavy} = \frac{3 \cdot J_{ramena}}{i_{tr}^2} = \frac{3 \cdot 1,447 \cdot 10^{-3}}{66,23^2} = 9,897 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (18)$$

$$J_{red} = 5,20321 \cdot 10^{-5} + 9,897 \cdot 10^{-7} = 5,30218 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.5 Regulátory

Při návrhu zpětnovazebního regulátoru vycházíme z modelu řízené soustavy a z dějů v ní probíhajících. Návrh vyžaduje matematický model soustavy, který musíme sestavit na základě skutečné regulované soustavy. K simulaci se hodí použít software Matlab Simulink. Pro návrh je potřeba znát přenos regulované soustavy, tj. poměr mezi vstupem a výstupem. Při běžném návrhu méně složitých soustav je výhodné použít pro manuální výpočet Laplaceovu transformaci, která usnadní výpočet obyčejných diferenciálních rovnic. Obecně známe 3 základní typy regulátorů, a to P regulátor, I regulátor a D regulátor. Zcela běžné je používání jejich kombinací např. PID, PI, PD regulátor apod. Každá složka má svou hodnotu zesílení. P regulátor je označován jako proporcionální. Je to prostý zesilovač. Jeho regulační odchylka je přímo úměrná jeho akční veličině. P regulátor je rychlý a stabilní, pracuje však s trvalou odchylkou, kterou nedokáže eliminovat na nulovou hodnotu. Dalším typem je I regulátor, neboli integrační člen. Akční veličina je přímo úměrná integrálu regulační odchylky. Oproti P regulátoru je I regulátor pomalejší a méně stabilní, avšak dokáže v jednoduché soustavě eliminovat regulační odchylku úplně na nulu. Poslední používaný, D regulátor, je regulátor, jehož akční veličina je přímo úměrná derivaci regulační odchylky. D regulátor zrychluje regulační děje, ovšem zesiluje šum, pročež může být nepoužitelný v některých soustavách. Samostatný D regulátor není možno fyzicky vytvořit. [8]

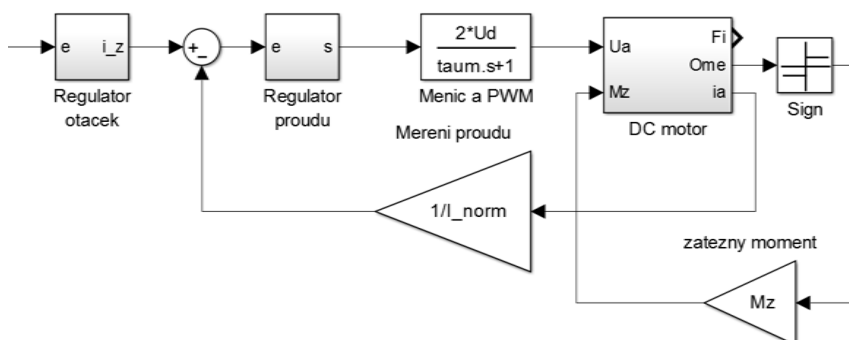
Pro návrh regulátoru využíváme nejčastěji 2 metody. Metodu symetrického optima (SO) a metodu optimálního modulu (OM). Vždy volíme jednu metodu podle tvaru rovnice v přecházejícím bodě. Metoda SO se hodí především pro řešení astatické soustavy. Odezva na skok řízení má překmit 43%. Ustálení je rychlejší, než v případě metody OM. Metoda OM se používá pro řešení statických soustav. Odezva na skok řízení má překmit 4,3% a ustálení je pomalejší, než v případě metody SO. [7]

4.6 Návrh regulátoru pohonu

Regulátor pohonu autotransformátoru je navržen jako polohový regulátor s podřízenou otáčkovou a proudovou smyčkou. Návrh regulátoru byl proveden standardním postupem od nejvnitřnější smyčky směrem ven. Nejvnitřnější smyčka je proudová smyčka. Otáčková smyčka je nadřazena proudové smyčce. Vnější, polohová smyčka je nadřazená otáčkové smyčce. Pro potřeby mikroprocesoru jsou hodnoty všech měřených, regulovaných nebo zjišťovaných veličin přepočítány na rozsah hodnot od -1 do +1. Z tohoto důvodu byly pro model soustavy zavedeny normované hodnoty veličin, které představují jejich maximální možné velikosti. Okamžité hodnoty jsou vždy jen poměrným číslem normovaných hodnot.

4.6.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka pracuje s přímými hodnotami proudu tekoucího motorem, které jsou naměřeny pomocí bočníku v měřicí části hardwaru. Proudová smyčka zajišťuje rychlejší dynamiku regulace a omezuje maximální proud, tím chrání motor před účinky vysokého proudu.



Obr. 18: Smyčka regulátoru proudu

Přenos smyčky regulátoru proudu je:

$$F_{si} = \frac{1}{R_a} \cdot k_m \cdot k_{CI} = \frac{1}{R_a} \cdot 2 \cdot U_d \cdot \frac{1}{I_{norm}} \quad (19)$$

Pro výpočet je vhodné použít metodu optimálního modulu.

$$\tau_m = \frac{1}{2} \cdot T_m = \frac{1}{2 \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 10\,000} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (20)$$

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (21)$$

$$\tau_{i1} = \tau_a \quad (22)$$

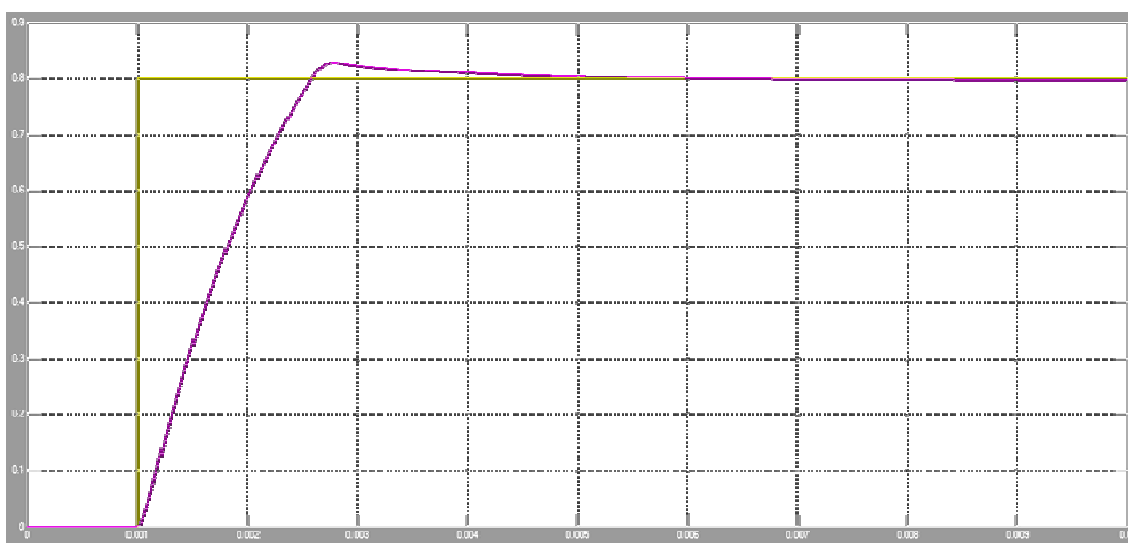
$$\tau_{i0} = 2 \cdot \tau_m \cdot F_{si} \quad (23)$$

Integrační složka regulátoru proudu má hodnotu:

$$k_{ii} = \frac{1}{\tau_{i0}} = \frac{1}{2 \cdot \tau_m \cdot F_{si}} = \frac{R_a \cdot I_{norm}}{2 \cdot \tau_m \cdot 2 \cdot U_d} = \frac{1,13 \cdot 8,25}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 12} = 3884,38 \quad (24)$$

Proporcionální složka regulátoru proudu má hodnotu:

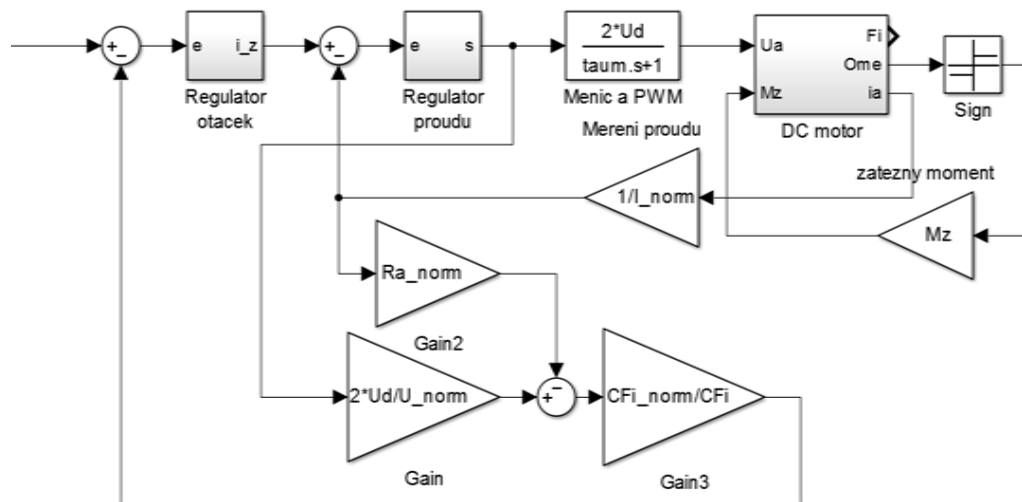
$$k_{pi} = \frac{\tau_{i1}}{\tau_{i0}} = \frac{R_a \cdot I_{norm} \cdot \tau_e}{2 \cdot \tau_m \cdot 2 \cdot U_d} = \frac{1,13 \cdot 8,25 \cdot 1,56 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 12} = 6,06 \quad (25)$$



Obr. 19: Přechodová funkce navrženého regulátoru proudu - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota

4.6.2 Otáčková smyčka

Otáčková smyčka zajišťuje co nejrychlejší a nejpresnější změnu rychlosti otáčení. Konstrukce motoru zakrývá celou jeho hlavní osu s rotorem a nedovoluje na motor umístit žádné čidlo pro měření rychlosti otáčení. Otáčková smyčka proto pracuje s estimovanou hodnotou rychlosti otáček. Otáčky budou zjišťovány výpočtem z naměřené hodnoty proudu a napětí a známé střídý měniče. Od napětí na svorkách motoru, které je dáno násobením střídý a napětí na meziobvodu měniče je odečten úbytek napětí na odporu motoru. Úbytek bude počítán násobením známého odporu motoru a měřeného proudu, který jím protéká. Otáčková smyčka bude tvořena pouze softwarově. Pro návrh regulátoru otáček pomocí simulace je vhodnější použít přímou hodnotu otáček z motoru dělenou normovanou hodnotou otáček. Estimace rychlosti otáčení totiž zanáší do regulace při přechodovém ději složitě popsatelnou chybu.



Obr. 20: Smyčka regulátoru rychlosti otáčení

Přenos smyčky regulátoru rychlosti otáček je:

$$F_{s\omega} = c\phi \cdot k_{c\omega} \cdot \frac{1}{J_{red}} \cdot \frac{1}{k_{ci}} = c\phi \cdot \frac{1}{\omega_{norm}} \cdot \frac{1}{J_{red}} \cdot I_{norm} \quad (26)$$

Pro výpočet je vhodné použít metodu symetrického optima.

$$\tau_i = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (27)$$

$$\tau_{\omega 1} = 4 \cdot \tau_i \quad (28)$$

$$\tau_{\omega 0} = 8 \cdot \tau_i^2 \cdot F_{s\omega} \quad (29)$$

Integrační složka regulátoru otáček má hodnotu:

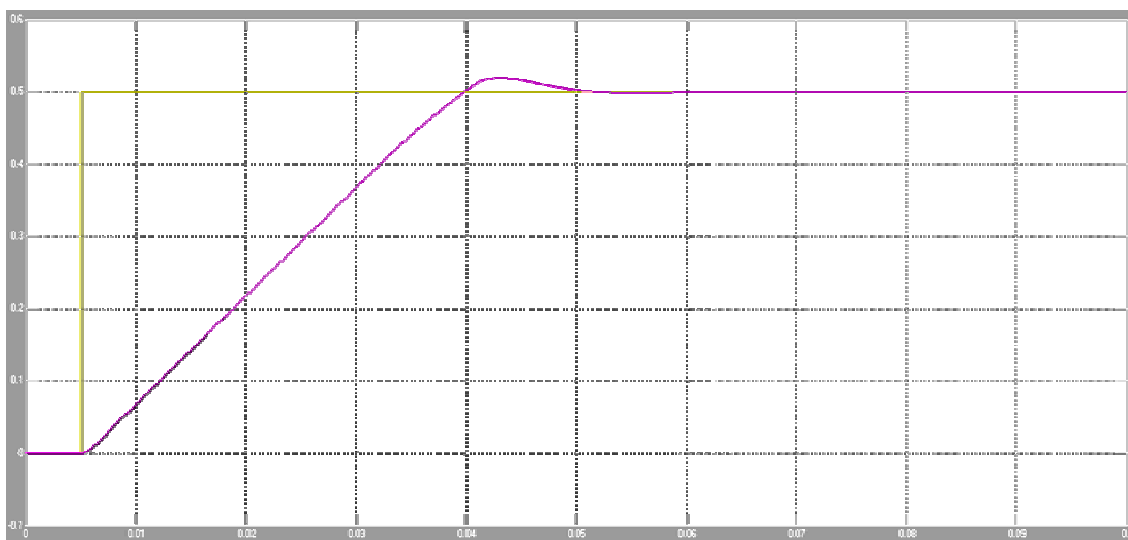
$$k_{I\omega} = \frac{1}{\tau_{\omega 0}} = \frac{1}{8 \cdot \tau_i^2 \cdot F_{s\omega}} = \frac{1 \cdot J_{red} \cdot \omega_{norm}}{8 \cdot \tau_i^2 \cdot c\phi \cdot I_{norm}} \quad (30)$$

$$= \frac{1 \cdot 5,302 \cdot 10^{-5} \cdot 100\pi}{8 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,04825 \cdot 8,25} = 5230,56$$

Proporcionální složka regulátoru otáček má hodnotu:

$$k_{P\omega} = \frac{\tau_{\omega 1}}{\tau_{\omega 0}} = \frac{4 \cdot \tau_i}{8 \cdot \tau_i^2 \cdot F_{s\omega}} = \frac{4 \cdot \tau_i \cdot J_{red} \cdot \omega_{norm}}{8 \cdot \tau_i^2 \cdot c\phi \cdot I_{norm}} \quad (31)$$

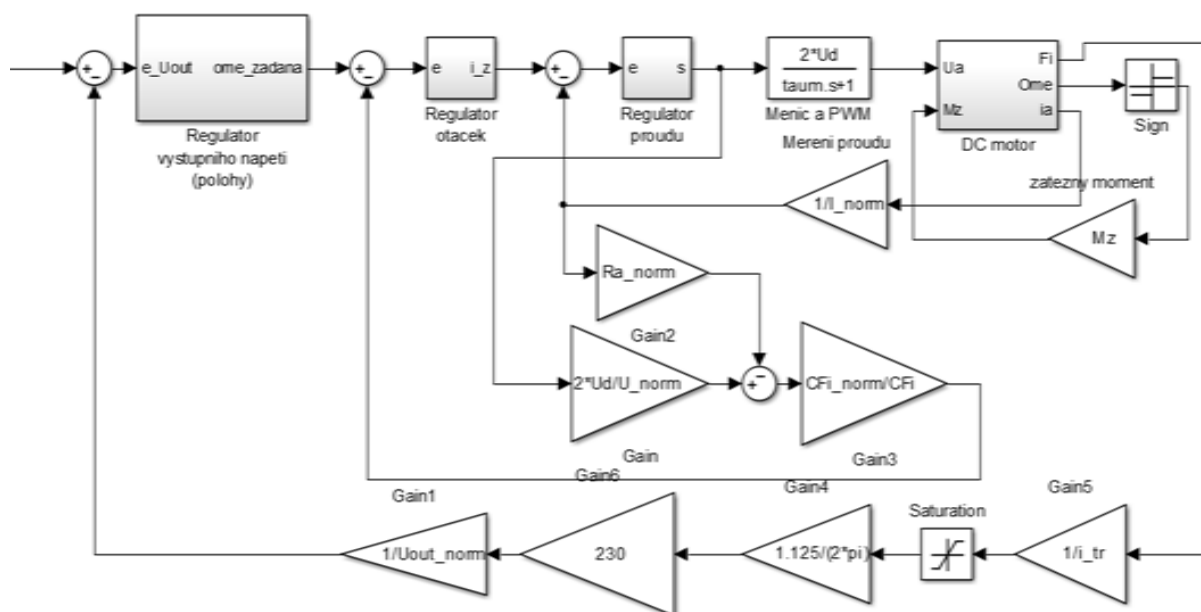
$$= \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 5,302 \cdot 10^{-5} \cdot 100\pi}{8 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,04825 \cdot 8,25} = 20,92$$



Obr. 21: Přejchodová funkce navrženého regulátoru otáček - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota

4.6.3 Polohová smyčka

Polohová smyčka je nejnadřazenější smyčkou celého regulátoru. Hodnota polohy, resp. hodnota napětí na výstupu autotransformátoru se zjišťuje přímo měřením všech 3 fázi napět'ovými transformátory v měřicí části hardwaru. V mikroprocesoru je počítaná hodnota šestipulzně usměrněného 3-fázového napětí. Pomocí filtru se vyhlazuje a slouží jako zpětná vazba regulátoru. Vstupem do regulátoru je uživatelem zadaná hodnota stejnosměrného (6-tipulzně usměrněného) napětí. Tento způsob regulace byl zvolen pro potřeby uživatelů autotransformátoru při testování měničů pracujících se stejnosměrným napětím.



Obr. 22: Smyčka regulátoru výstupního napětí

Přenos smyčky regulátoru výstupního napětí je:

$$F_{su} = \frac{1}{i_{mot}} \cdot \frac{i_{tr}}{2\pi} \cdot \frac{230}{U_{out_norm}} \quad (32)$$

Pro výpočet je vhodné použít metodu optimálního modulu.

$$\tau_{\omega} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (33)$$

$$\tau_{u1} = \tau_{\omega} \quad (34)$$

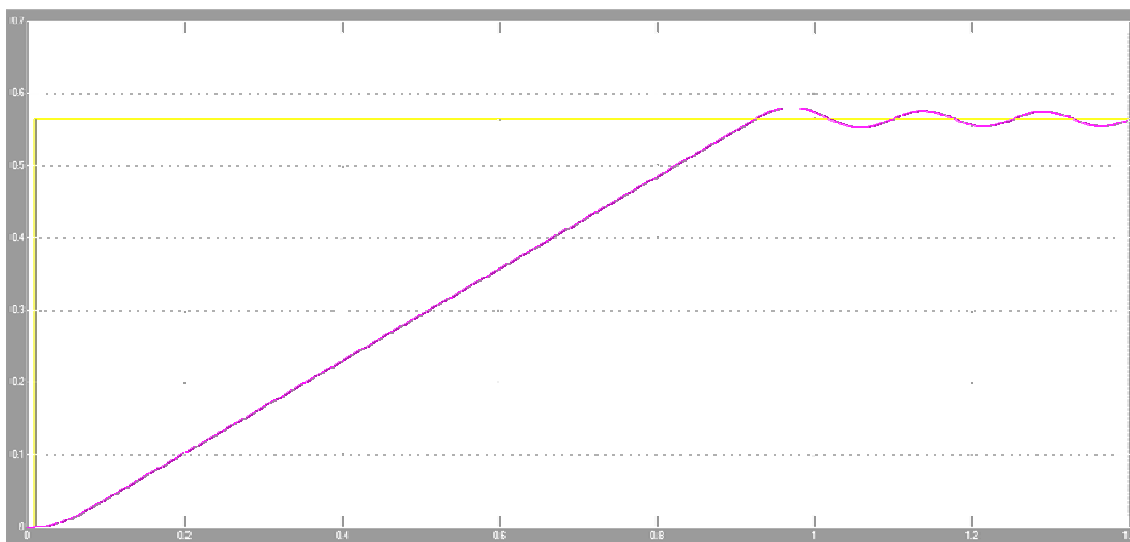
$$\tau_{u0} = 2 \cdot \tau_{\omega} \cdot F_{su} \quad (35)$$

Integrační složka regulátoru polohy má hodnotu:

$$\begin{aligned} k_{Iu} &= \frac{1}{\tau_{u0}} = \frac{1}{2 \cdot \tau_{\omega} \cdot F_{su}} = \frac{i_{mot} \cdot 2\pi \cdot U_{out_norm}}{2 \cdot \tau_{\omega} \cdot i_{tr} \cdot 230} \\ &= \frac{66,23 \cdot 2\pi \cdot 230}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 1,125 \cdot 230} = 3698,99 \end{aligned} \quad (36)$$

Proporcionální složka regulátoru polohy má hodnotu:

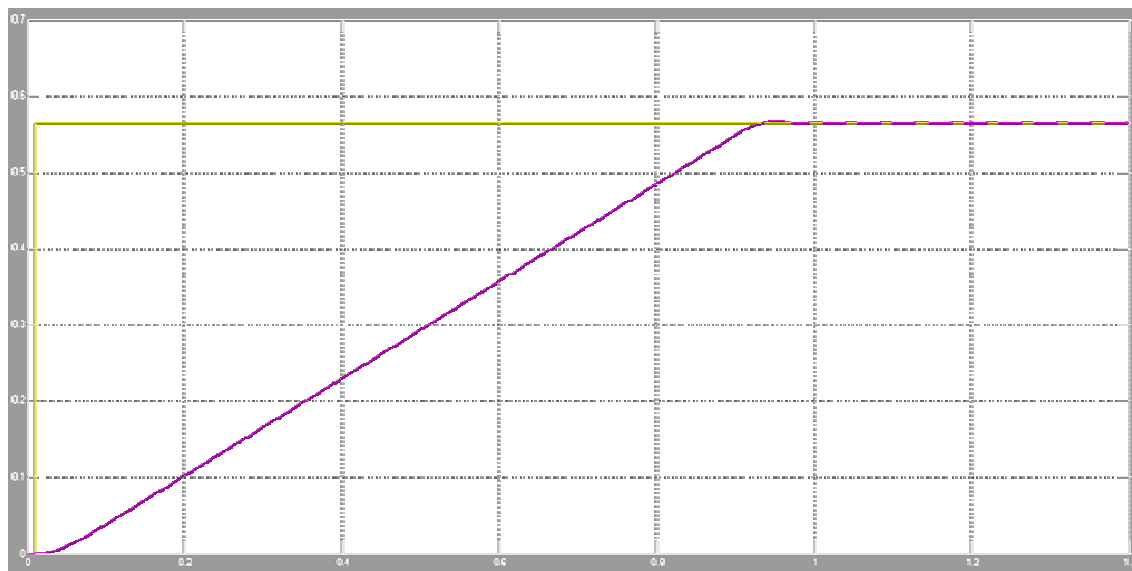
$$k_{Pu} = \frac{\tau_{u1}}{\tau_{u0}} = \frac{\tau_{\omega} \cdot i_{mot} \cdot 2\pi \cdot U_{out_norm}}{2 \cdot \tau_{\omega} \cdot i_{tr} \cdot 230} = \frac{66,23 \cdot 2\pi \cdot 230}{2 \cdot 1,125 \cdot 230} = 184,95 \quad (37)$$



Obr. 23: Přechodová funkce navrženého regulátoru polohy - žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota

Na první pohled je zřetelné, že soustava kmitá a tento nežádoucí vliv bude potřeba odstranit. Důvod kmitání se patrně ukrývá ve složitosti celé soustavy. Z modelu soustavy vyplývá, že

poloha je integrálem otáček. Integrační složka regulátoru bude zanedbána a regulátor polohy bude pouze proporcionální. Experimentální metodou v simulaci byla zjištěna vyhovující hodnota proporcionální složky $k_{pu} = 50$. Při této hodnotě zesílení je využita maximální rychlost pohonu bez překmitu, který je u regulace napětí nežádoucí.



Obr. 24: Přechodová funkce nově navrženého regulátoru polohy -žlutá - žádaná hodnota, fialová - skutečná hodnota

Tab. 4 : Hodnoty zesílení navrženého regulátoru

Složka regulátoru	Hodnota zesílení
k_{pi}	6,06
k_{li}	3884,38
$k_{p\omega}$	20,92
$k_{l\omega}$	5230,56
k_{pu}	50
k_{lu}	0

4.7 Realizace regulátoru pohonu

Z důvodu nelinearity celé soustavy, jejího proměnného zatížení a dalších nepříznivých vlivů se soustava chová jinak, než předpokládá model soustavy. Zdrojem nepříznivých vlivů jsou např.



proměnné mechanické zatížení motoru, vůle v převodovce motoru apod., např. třecí síla kartáčů se mění jak s jejich polohou, tak se směrem jejich pohybu. Model soustavy rovněž neuvažuje mechanické ztráty a moment setrvačnosti převodovky motoru, jejichž měření či odhad jsou složité. Převod autotransformátoru uvažovaný v modelu soustavy je lineárně závislý na poloze uhlíkových kartáčů, ve skutečnosti ale dochází ke změně počtu závitů vinutí a převod se mění pro krocích, lze jej považovat za diskrétní.

Realizace regulátoru byla založena na předpokladu, že nejpodřízenější smyčkou bude proudová smyčka. Otáčková smyčka bude nadřazená na proudovou smyčkou a polohová smyčka bude nadřazená nad otáčkovou smyčkou. Jedná se o stejný postup jako při návrhu regulátoru pro model soustavy v simulinku. Předpokladem je, že vstupem do polohové (napětíové) smyčky je žádaná hodnota výstupního napětí. Výstupem z regulátoru polohy jsou požadované otáčky, které vstupují do otáčkové smyčky. Vstup do proudové smyčky je požadovaný proud, který vychází z otáčkové smyčky. Výstupem z proudové smyčky je požadovaná střída, která vstupuje do měniče. Všechny smyčky mají zápornou zpětnou vazbu.

4.7.1 Proudová smyčka

Během ožiování a nastavování regulátoru byl zjištěn zásadní problém s měřením všech potřebných veličin. Nejpodřízenější smyčka, tj. proudová smyčka, pracuje s hodnotou proudu naměřeného pomocí bočníku na větvi měniče. Při snaze zprovoznit regulátor proudu podle vypočítaných hodnot zesílení jeho jednotlivých složek se regulátor nechoval správně. Proud kmital ve svém maximálním rozsahu, což bylo doprovázeno nepříjemným zvukem. Pohyb motoru nebylo možné zajistit. Jako možná příčina se jeví nedostatečně přesná znalost parametrů motoru. Regulátor proudu byl proto nastaven experimentálně a je typu PI. Hodnota zesílení proporcionální složky je $k_{Pi} = 2,2$ a hodnota integrační složky $k_{Ii} = 0,55$.

4.7.2 Otáčková smyčka

Otáčková smyčka regulátoru je jeho nejslabším místem. Regulátor pracuje s estimovanou hodnotou otáček, která zanáší do soustavy nemalé chyby. Při nízkých otáčkách motoru je estimovaná hodnota značně nepřesná a tudíž nepoužitelná. Při malém proudu v motoru jsou jeho otáčky vlivem mechanických ztrát nulové, ale estimátor otáček nulovou rychlost nepředpokládá. Problému přitěžuje mechanická vůle v převodovce motoru. Pro vyšší hodnoty otáček je přesnost výpočtu vyšší, pro přesnou regulaci polohy však potřebuje motor spolehlivě pracovat i při malých otáčkách. Problém by snadno vyřešilo čidlo otáček motoru, případně přesná znalost rychlosti otáčení motoru.



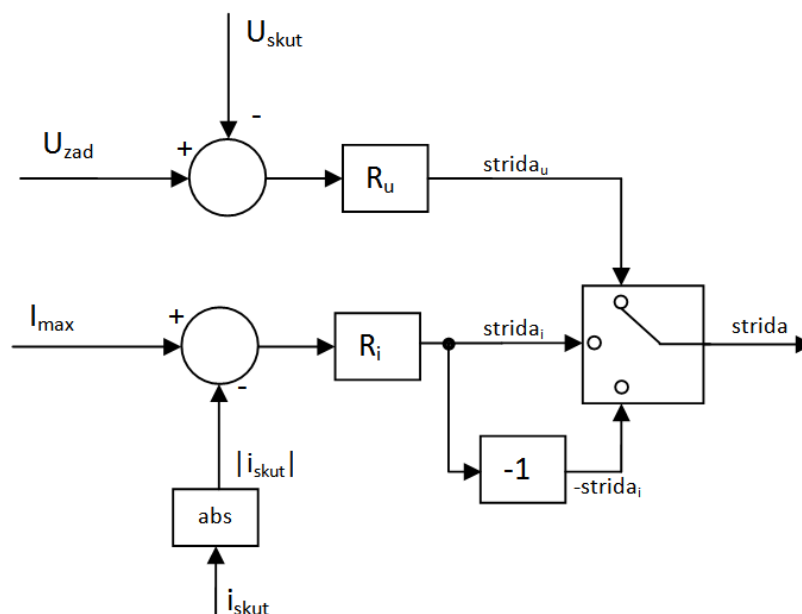
4.7.3 Polohová smyčka

Smyčka regulátoru polohy má jako zpětnou vazbu napětí na výstupu autotransformátoru, které měří na všech 3 fázích napěťovými transformátory. Stejně jako u 2 předchozích podřízených smyček byly hodnoty navrženého regulátoru nepoužitelné.

Špatně pracující otáčková smyčka zhoršovala regulovatelnost celé soustavy. Problém byl vyřešen ignorací otáčkové smyčky. Polohová smyčka má tak pouze jednu podřízenou smyčku, a to proudovou. Při návrhu regulátoru polohy bylo nutné respektovat požadavek na co nejmenší překmit polohy a co největší rychlost regulace. Překmit v řádu jednotek procent může při vyšších hodnotách napětí znamenat překmit např. 15-20 V, což může být pro určité aplikace nepřijatelné. Během ladění regulátoru měl výhodné vlastnosti P regulátor, byl poměrně rychlý, ale pracoval s velkou odchylkou, ta dosahovala v krajních případech i 30 V. Z principu P regulátoru je známo, že vždycky pracuje s určitou odchylkou a nikdy ji nedokáže eliminovat na nulovou hodnotu. Pro tyto potřeby slouží integrační regulátor. PI regulátor byl pomalejší než P regulátor a dosahoval poměrně velkého překmitu. Dokázal však eliminovat odchylku na téměř nulovou hodnotu. Výsledkem optimalizace regulace výstupního napětí je použitý PI regulátor, který má při odchylce větší než 10 V nulovou integrační složkou a funguje tedy jako čistý P regulátor. Jakmile se rozdíl mezi skutečnou a žádanou hodnotou zmenší pod 10 V, implementuje se do regulátoru integrační složka a vzniklý PI regulátor doreguluje napětí do potřebné hodnoty bez překmitu. Regulátor tak pracuje ve 2 stavech, pracuje rychle, přesně a bez překmitů. Přepínání regulátoru mezi typy P a PI probíhá pomocí logických operací, které porovnávají velikost odchylky s nastavenou hodnotou.

Během testování bylo zjištěno, že ignorací proudové smyčky se dynamika regulátoru polohy značně zlepšila. Vzniká ale problém s omezováním velikosti proudu. Při zanedbání regulátoru proudu může proud dosahovat vysokých hodnot a může dojít k poškození motoru. Aby se předešlo negativním účinkům vysokého proudu, je paralelně vedle regulátoru výstupního napětí zapojen regulátor proudu, na jehož vstupu je nastavena maximální dovolená velikost proudu. Regulátor se tak nachází neustále v saturaci a jeho výstupem je tak maximální možná střída do měniče. Hodnota střídý je počítána pro oba směry otáčení. Na výstupech obou regulátorů probíhá porovnávání hodnot stříd. Jestliže je střída vycházející z regulátoru výstupního napětí menší než maximální střída a současně větší než minimální střída z regulátoru proudu, je přivedena na vstup měniče. Pokud by hodnota střídý regulátoru výstupního napětí překročila maximální nebo minimální mez proudové smyčky, což znamená, že by do motoru vstupoval větší proud než

maximální dovolený, bude na vstup měniče připojena střída z regulátoru proudu. Proud se tak zastaví na omezení. Přepínač je realizován logickými operacemi a porovnáváním.

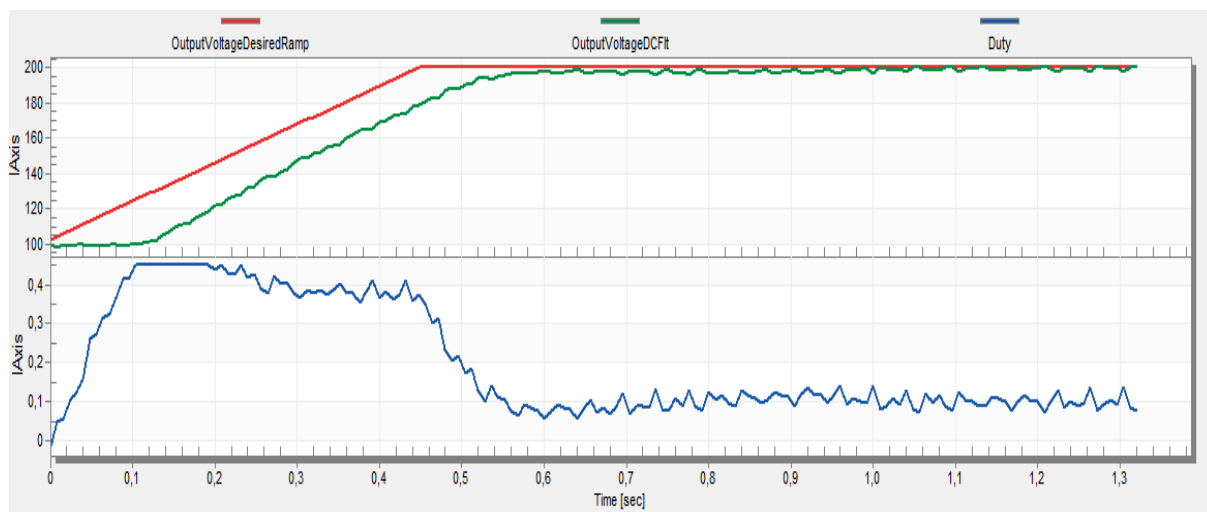


Obr. 25: Schéma paralelního spojení regulátorů

Skutečné hodnoty proporcionálních a integračních složek všech regulačních smyček jsou odlišné od vypočítaných hodnot pro model soustavy. Hodnoty byly zjištěny experimentálně sledováním žádaných a skutečných průběhů regulovaných veličin. Hodnoty zesílení jednotlivých složek jsou v Tab. 5. Hlavním důvodem odlišnosti jsou výše zmíněné problémy s měřením regulovaných veličin a také odlišné vlastnosti regulované soustavy.

Tab. 5 : Hodnoty zesílení skutečného regulátoru

Složka regulátoru	Hodnota zesílení
k_{pi}	2,2
k_{li}	0,55
$k_{p\omega}$	-
$k_{l\omega}$	-
k_{pu}	16
k_{lu}	0,01 (při $e > 10V$)



Obr. 26: Průběh střídý měniče v závislosti na požadované hodnotě výstupního napětí

4.7.4 Program regulátoru

Ve smyčce programu regulátoru dochází k měření výstupního napětí, k jeho regulaci a ke kontrole, zda se kartáče nenacházejí na konci rozsahu autotransformátoru. Důležitou součástí programu je měření výstupního napětí autotransformátoru a jeho správná interpretace. Jelikož mají výstupní napětí všech 3 fází harmonický průběh, je potřeba výpočtem zjistit jejich regulovanou hodnotu. Existuje několik možných způsobů jak a jakou hodnotu napětí měřit. Vývojový diagram logických operací programu je zobrazen na Obr. 28. Použité regulátory využívají funkce knihovny, a tím usnadňují práci s nimi. Nastavení např. PI regulátoru polohy vyžaduje pouze vstupní a výstupní proměnnou a hodnoty zesílení jednotlivých složek regulátoru. Vstupem do regulátoru výstupního napětí je požadované napětí. To je počítáno pomocí přírůstku po rampě z hodnoty výstupního napětí zadané uživatelem. Tento způsob výpočtu byl zvolen proto, aby nedocházelo ke skokovým změnám na vstupu regulátoru. Napětí narůstá, případně klesá po rampě, jejíž strmost byla odvozena od maximální rychlosti pohybu kartáčů autotransformátoru. Rychlost nárůstu je přibližně stejná, jako rychlost motoru. Tento způsob regulace nijak nezpomaluje regulační schopnosti pohonu a slouží především k zajištění větší stability regulace. Obr. 26 je toto napětí značeno OutputVoltageDesiredRamp. Skutečná vypočítaná hodnota napětí je označena OutputVoltageDCFit. Jak lze na průběhu vidět, skutečná hodnota napětí je v závěsu za rostoucím žádaným napětím. V celém regulačním procesu dosahuje regulační odchylka značně menší hodnoty, než v případě skokové změny požadovaného napětí.



4.7.5 Měření napětí

Během testování pohonu byly používány 2 různé způsoby měření napětí. První způsob regulace počítá ze všech 3 fází hodnotu napětí, která odpovídá hodnotě šestipulzně usměrněného trojfázového napětí. Výsledek výpočtu je dále filtrován, aby funkce nepopisovala průběh typických kopečků doprovázejících usměrňování, ale odpovídala střední hodnotě usměrněného napětí. Vstupem do regulátoru je rovněž požadovaná střední hodnota šestipulzně usměrněného napětí. Tento způsob regulace byl zvolen pro potřeby testování výkonových měničů se stejnosměrným obvodem. Pro zjištění hodnoty usměrněného napětí z harmonických průběhů byl použit výpočet podle vzorce (41).

$$u_a = |u_1 - u_2| \quad (38)$$

$$u_b = |u_2 - u_3| \quad (39)$$

$$u_c = |u_3 - u_1| \quad (40)$$

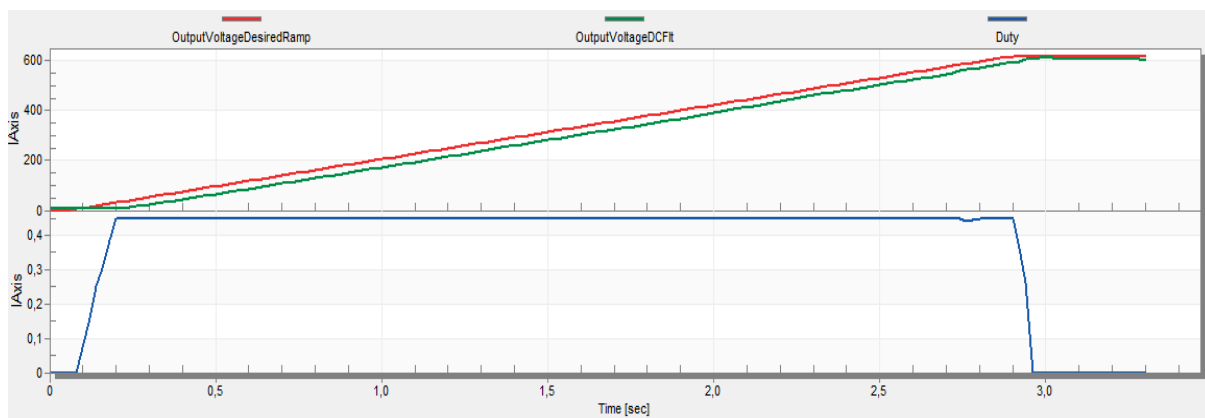
$$u_{ss} = (u_a > u_b ? u_a : u_b) > u_c ? (u_a > u_b ? u_a : u_b) : u_c \quad (41)$$

Napětí u_1 je napětí první fáze, napětí u_2 je napětí druhé fáze a napětí u_3 značí napětí poslední fáze. Vzorec (41) popisuje porovnávání rozdílů jednotlivých dvojic napětí. Výsledkem porovnávání je nejvyšší aktuální rozdíl, tj. nejvyšší hodnota napětí v daném okamžiku. Zjednodušeně lze říct, že funguje jako špičkový detektor napětí.

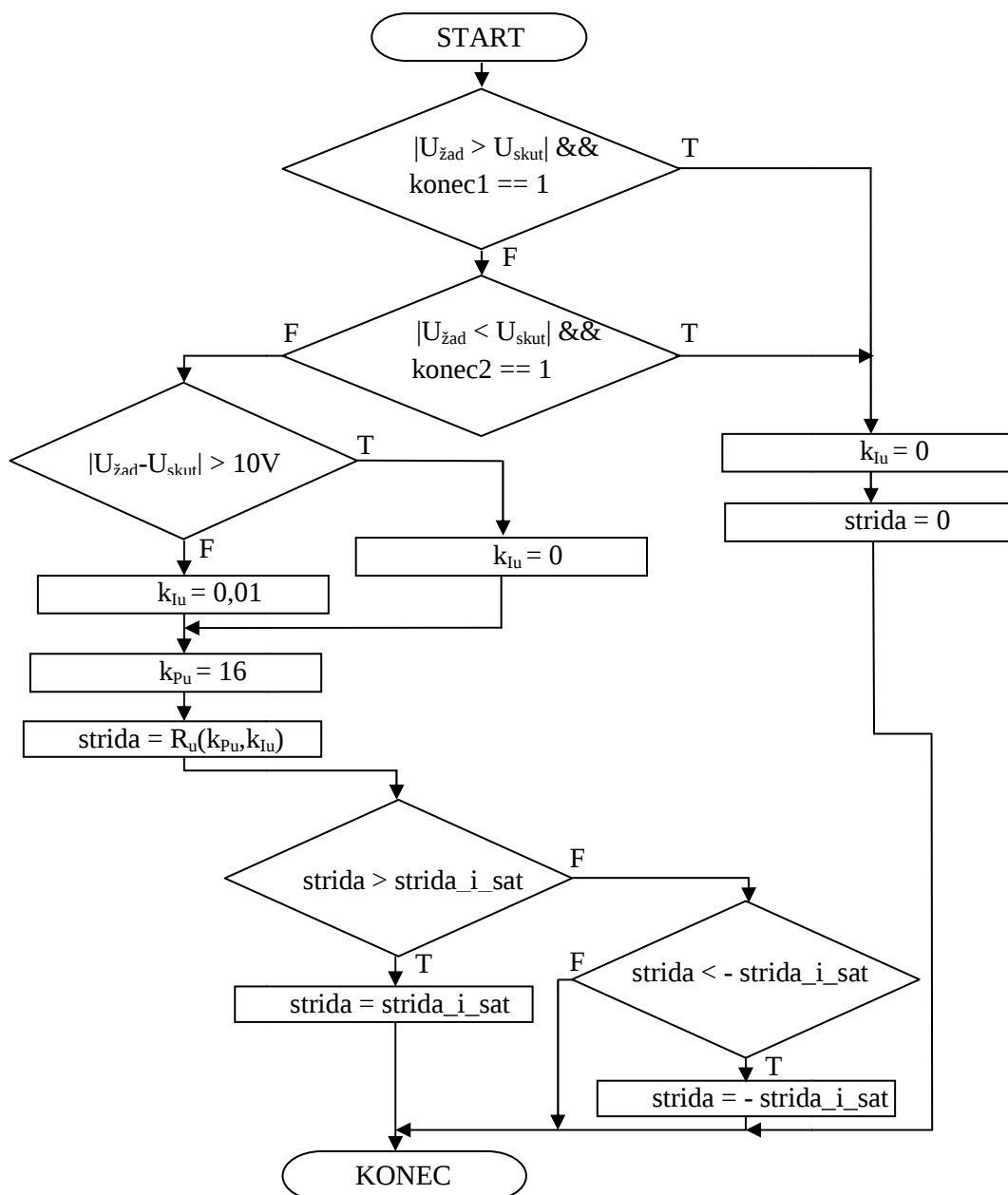
Druhý způsob výpočtu zjišťuje z okamžitých hodnot všech 3 fází amplitudu napětí. Výpočet je náchylný na nesymetrii síťového napětí, kterou mohou dále zhoršovat různé převodové poměry jednotlivých fází. Z toho důvodu hodnota amplitudy mírně kolísá. Výhodou výpočtu amplitudy napětí je snadný výpočet a regulace efektivní hodnoty napětí. Výpočet amplitudy napětí je proveden podle vzorce (42).

$$u_{\text{ampl}} = \frac{2}{3} \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 - u_1 \cdot u_2 - u_1 \cdot u_3 - u_2 \cdot u_3} \quad (42)$$

Na Obr. 27 lze pozorovat průběh střídavy a výstupní a žádané hodnoty napětí při regulaci z nejnižšího převodu autotransformátoru do nejvyššího. Horní i dolní hodnoty napětí odpovídají sepnutým čidlům koncových poloh. Nejnižší hodnota výstupního napětí, kterou je schopen autotransformátor nastavit je 6 V. Na této úrovni zasahuje do regulace čidlo dolní koncové polohy. Maximální hodnota výstupního napětí je při sepnutí horního dorazového čidla přibližně 615 V. V obou případech se jedná o střední hodnotu šestipulzně usměrněného napětí. Hodnota zmíněné rychlosti je 2,8 sekundy na 609 V, to odpovídá rychlosti regulace 218 V/s.



Obr. 27: Průběh výstupního napětí při regulaci z nejnižšího do nejvyššího převodu



Obr. 28: Vývojový diagram logických funkcí programu regulátoru



5 ZÁVĚR

Práce se zabývá návrhem a výrobou pohonu pro trojfázový regulační autotransformátor. Funkční pohon slouží jako přídavné zařízení autotransformátoru, proto nezasahuje do jeho konstrukce, což bylo jedním z požadavků na pohon. Jako pohonná jednotka slouží střeračový motor z osobního automobilu, který je spojen přímo s osou autotransformátoru. Nejdůležitější součástí práce je navržený a vyrobený plošný spoj, který je podle funkčnosti rozdělen na 3 části. Jeho kompletní návrh byl proveden v programu Altium Designer a je podrobně popsán v kapitole 4.3. Regulaci výstupního napětí autotransformátoru provádí číslicový regulátor v mikrokontroléru Freescale v řídicí části plošného spoje. Motor pohonu je napájen čtyřkvadrantovým tranzistorovým měničem. Měření výstupního napětí probíhá pomocí napět'ových transformátorů rovněž na plošném spoji v jeho měřicí části. Pohon je schopen regulovat výstupní napětí s téměř nulovou odchylkou a bez překmitů. Jeho maximální regulační rychlost je přibližně 220 V za sekundu. Navržený číslicový PI regulátor mění hodnoty zesílení svých složek podle potřeby, aby měl všechny výše vypsané výhodné vlastnosti. Pohon je vybaven čidly, které detekují koncové polohy autotransformátoru, díky čemuž je zamezeno jeho poškození. Aby bylo možné obsluhovat pohon bez potřeby připojení k počítači, nachází se na plošném spoji 40 pinový konektor, na který jsou vyvedeny digitální vstupy a výstupy mikrokontroléru. Na konektoru jsou umístěné také analogové vstupy a referenční napět'ové hladiny. K pohonu je možno připojit tlačítka, inkrementální čidla, potenciometry či displej, čím lze rozšířit uživatelský vstup. Rozšíření celého pohonu je možno provést také softwarově, kde by bylo vhodné zajistit např. volbu druhu regulovaného napětí. Výroba obslužného terminálu včetně softwarového rozšíření se hodí pro další studentskou činnost.



LITERATURA

- [1] KOLAČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*: Skripta. Brno.
- [2] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. Brno. Elektronické skriptum. FEKT VUT v Brně.
- [3] KOČMAN, Stanislav a Václav VRÁNA. *Synchronní motory: určeno pro bakalářské studijní programy* [online]. 2005 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf. VŠB - TU Ostrava
- [4] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-422-8.
- [5] RADA, Václav. *Základy Eltech: SS motory* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/ELTECH/EL-MOTT-SS.DOC>. Učební text. FEKT VUT v Brně.
- [6] Wikipedia: *Electric motor* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Electric_motor_cycle_2.png
- [7] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. Brno, 2001. ISBN 80-214-1978-4. VUT Brno.
- [8] *PID regulátor*. Wikipedie [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/PID_regul%C3%A1tor
- [9] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony*. Praha, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [10] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. Brno, 2005.
- [11] ČERVINKA, Dalibor a Zdeněk FEILER. *Regulace rychlosti stejnosměrného motorku: (Laboratorní návod do předmětu BEPB)* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-27]. Laboratorní návod. FEKT VUT v Brně.

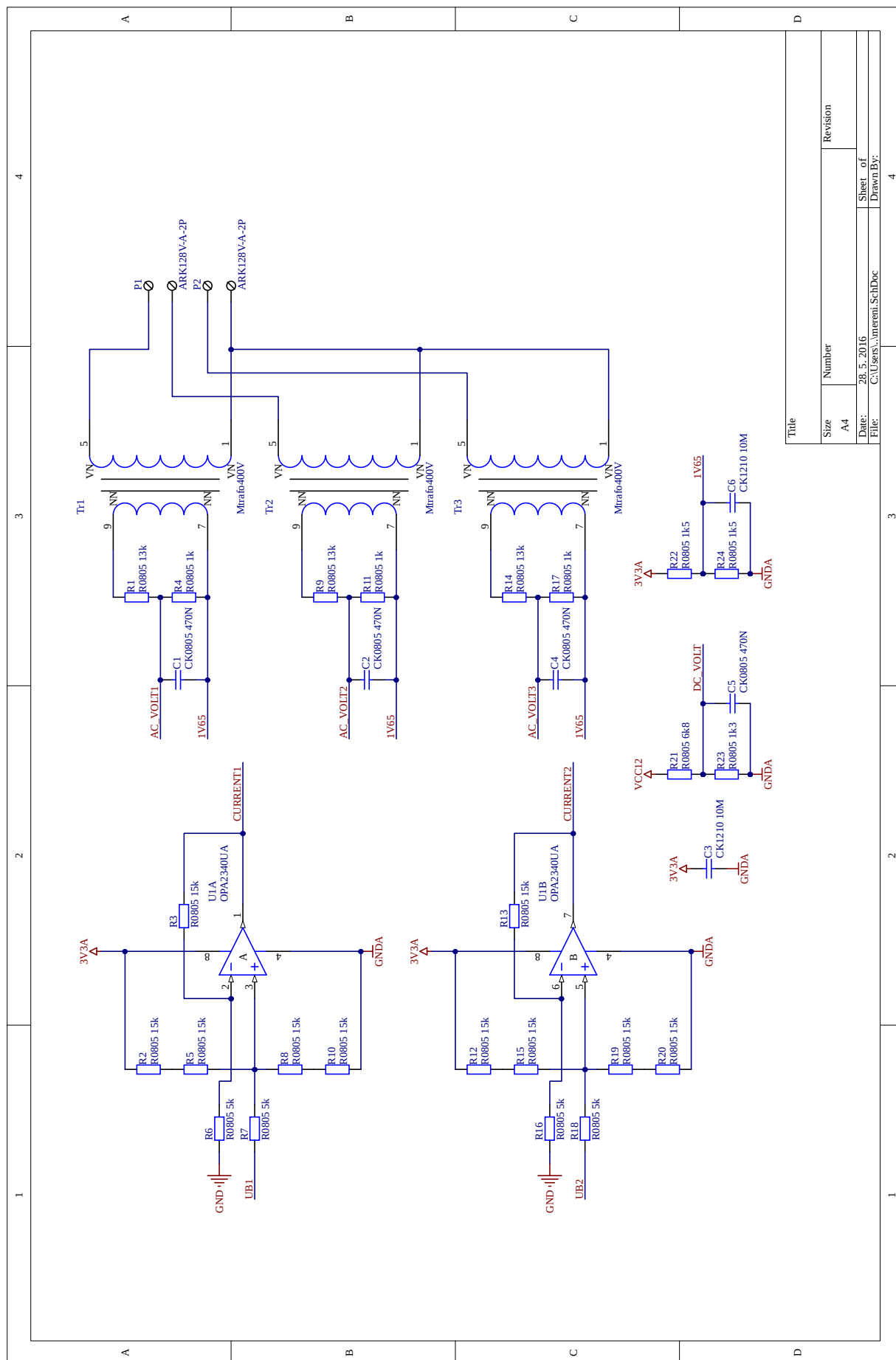


SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 - Schéma zapojení měřicí části hardwaru
- Příloha č.2 - Schéma zapojení silové části hardwaru
- Příloha č.3 - Část schématu s popisem signálu na konektorech
- Příloha č.4 - Plánek plošného spoje pro výrobu DPS - spodní strana
- Příloha č.5 - Plánek plošného spoje pro výrobu DPS - horní strana
- Příloha č.6 - Rozmístění součástek na horní straně DPS
- Příloha č.7 - Seznam použitých součástek na DPS
- Příloha č.8 - Zdrojový kód programu pro řízení pohonu
- Příloha č.9 - CD s obsahem elektronických verzí příloh a BP

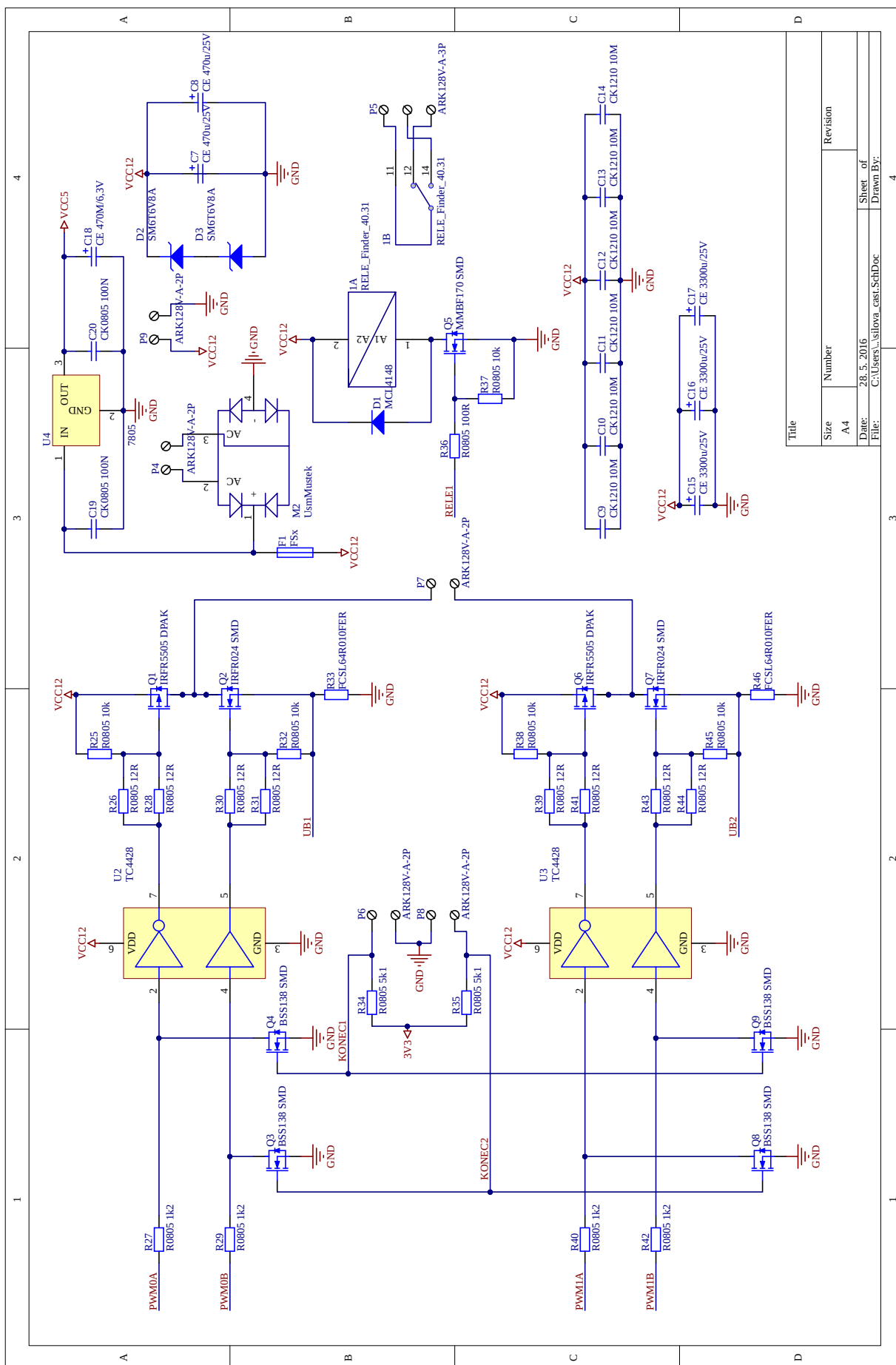


Příloha č.1 - Schéma zapojení měřicí části hardware

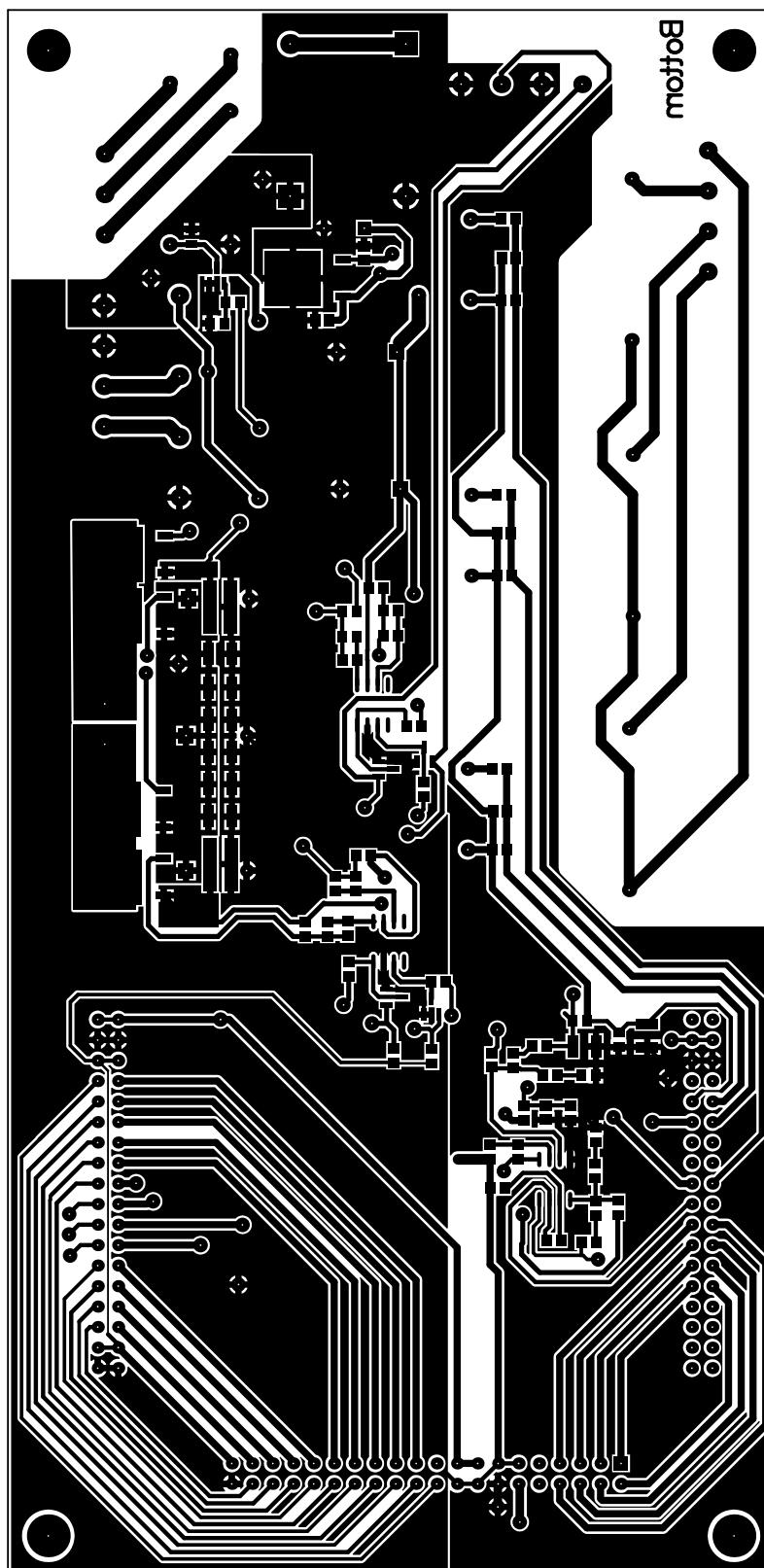




Příloha č.2 - Schéma zapojení silové části hardwaru

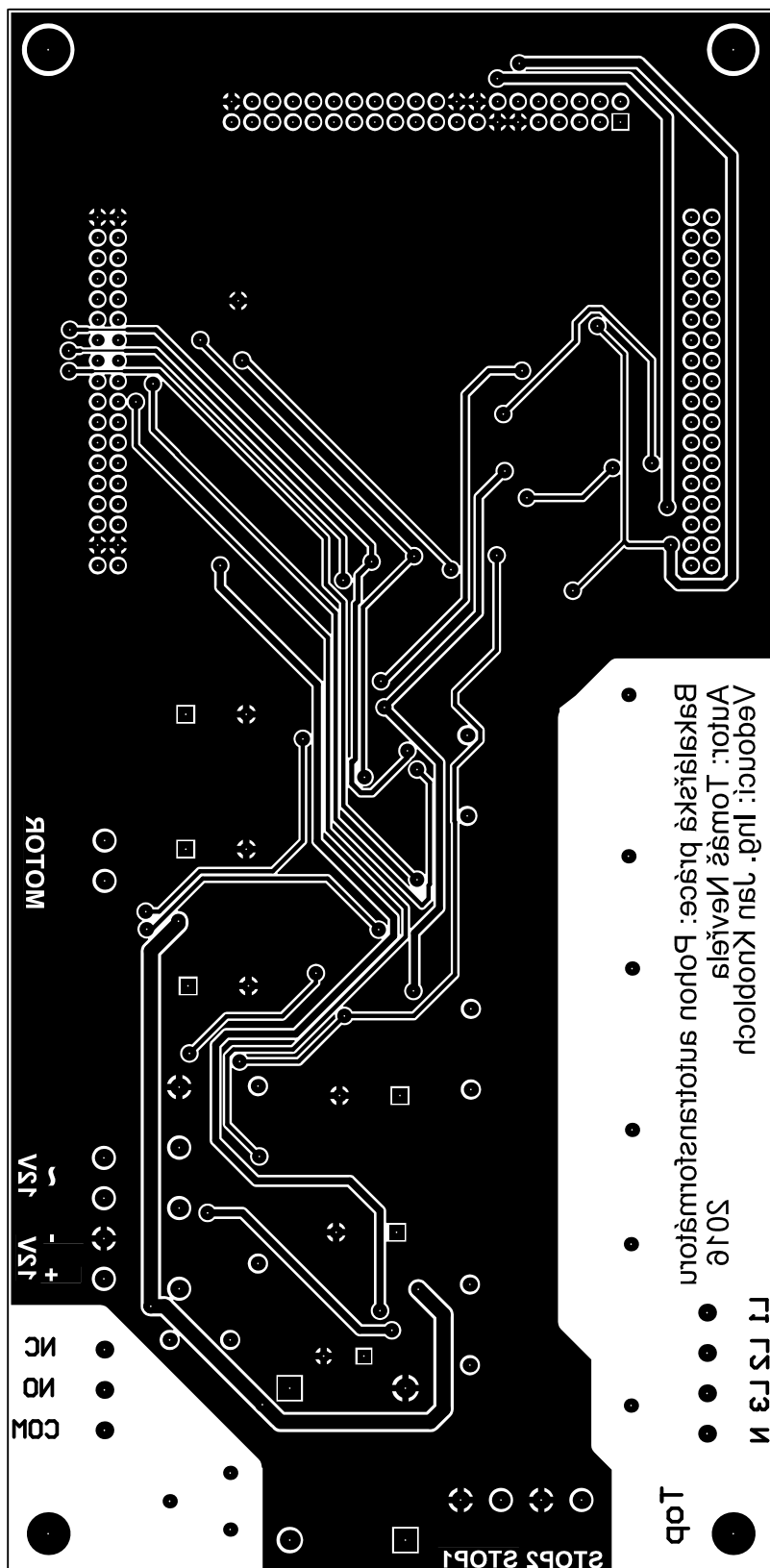


Příloha č.4 - Plánek plošného spoje pro výrobu DPS - spodní
strana



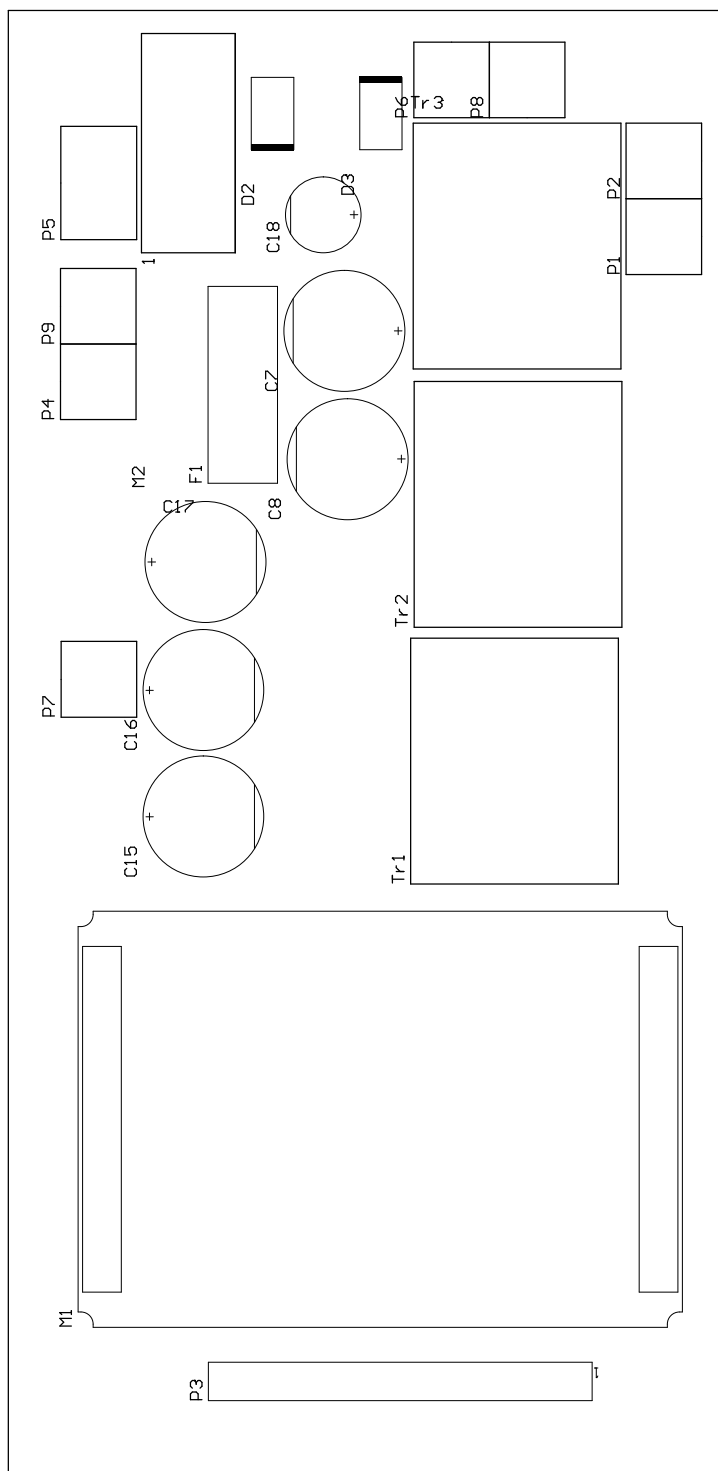


Příloha č.5 - Plánek plošného spoje pro výrobu DPS - horní strana





Příloha č.6 - Rozmístění součástek na horní straně DPS





Příloha č.7 - Seznam použitých součástek na DPS

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
RELE_Finder_40.31		1	RELE_Finder_40.31	RELE_Finder_40.31	1
CK0805 470N	Ceramic capacitor SMD 0805	C1, C2, C4, C5	CAPC2012N	CAPC0805	4
CK1210 10M	Ceramic capacitor SMD 1210	C3, C6, C9, C10, C11, C12, C13, C14	CAPC3225N	CAPC1210	8
CE 470u/25V	CapPol radial RM7.5	C7, C8	CAPPR7.5-16x20	CAPPR7.5-16	2
CE 3300u/25V	CapPol radial RM7.5	C15, C16, C17	CAPPR7.5-16x20	CAPPR7.5-16	3
CE 470M/6,3V	CapPol radial RM5	C18	CAPPR5-10x12.5	CAPPR5-10	1
CK0805 100N	Ceramic capacitor SMD 0805	C19, C20	CAPC2012N	CAPC0805	2
MCL4148	High Conductance Fast Diode	D1	MELF-D2012_MICRO	D_1N4148	1
SM6T6V8A	Transil UNI	D2, D3	DO-201AD	D_SM6TxxA	2
FSx	Fuse 5x20mm	F1	FUSE_ZH32	Fuse_5x20	1
uP_symbol		M1	uP_deska_symbol	uP_symbol	1
UsmMustek		M2	UsmMustek	UsmMustek	1
ARK128V-A-2P	Svorkovnice sroubovací roztec 5mm	P1, P2, P4, P6, P7, P8, P9	P_ARK128V-A-2P	P_ARK128V-A-2P	7
S2G40 2,54mm	Dual Row 40pin header - MLW40G	P3	HDR2X20	P_Header 20X2	1
ARK128V-A-3P	Svorkovnice sroubovací roztec 5mm	P5	P_ARK128V-A-3P	P_ARK128V-A-3P	1
IRFR5505 DPAK	P-Channel MOS-FET	Q1, Q6	TO252-3N	Q_MOSFET-P	2
IRFR024 SMD	N-Channel MOS-FET	Q2, Q7	TO252-3N	Q_MOSFET-N	2
BSS138 SMD	N-Channel MOS-FET	Q3, Q4, Q8, Q9	SOT23-3N	Q_FET-N_SOT23	4
MMBF170 SMD	N-Channel MOS-FET	Q5	SOT23-3N	Q_FET-N_SOT23	1
R0805 13k	Resistor 0805	R1, R9, R14	RESC2012N	Res0805	3
R0805 15k	Resistor 0805	R2, R3, R5, R6, R10, R12, R13, R15, R19, R20	RESC2012N	Res0805	10
R0805 1k	Resistor 0805	R4, R11, R17	RESC2012N	Res0805	3
R0805 5k	Resistor 0805	R6, R7, R16, R18	RESC2012N	Res0805	4
R0805 6k8	Resistor 0805	R21	RESC2012N	Res0805	1
R0805 1k5	Resistor 0805	R22, R24	RESC2012N	Res0805	2
R0805 1k3	Resistor 0805	R23	RESC2012N	Res0805	1
R0805 10k	Resistor 0805	R25, R32, R37, R38, R45	RESC2012N	Res0805	5
R0805 12R	Resistor 0805	R26, R28, R30, R31, R39, R41, R43, R44	RESC2012N	Res0805	8
R0805 1k2	Resistor 0805	R27, R29, R40, R42	RESC2012N	Res0805	4
FCSL64R010FER	Resistor shunt	R33, R46	RSH_FCSL64	Res_shunt	2
R0805 5k1	Resistor 0805	R34, R35	RESC2012N	Res0805	2
R0805 100R	Resistor 0805	R36	RESC2012N	Res0805	1
Mtrafo400V		Tr1, Tr2, Tr3	Mtrafo400V	Mtrafo400V	3
OPA2340UA	Low-Power, Precision FET-Input Operational Amplifiers	U1	SOIC127P600-8AN	OPA2340UA	1
TC4428	Mosfet driver	U2, U3	SOIC127P600-8AN	TC4428	2
7805	Stabilizer	U4	TO252-3N	78xx	1



Příloha č.8 - Zdrojový kód programu pro řízení pohonu - 1.část

```
/*
 *
 * File Name: main.c
 *
 * Description: Main application file generated automatically from the
 *              DSP56800E_Quick_Start stationery
 *
 * Target: MC56F8257 device
 *
 */
*****/

/* required DSP56F800E_Quick_Start header */
#include "qs.h"

/* low-level driver headers for each module used */
#include "occs.h"
#include "sys.h"
#include "adc.h"
#include "cop.h"
#include "crc.h"
#include "dac.h"
#include "gpio.h"
#include "hscmp.h"
#include "iic.h"
#include "intc.h"
#include "mscan.h"
#include "pwm.h"
#include "qtimer.h"
#include "vref.h"
#include "sci.h"
#include "spi.h"
#include "xbar.h"
#include "freemaster.h"

#include "gflib.h"

static GFLIB_CONTROLLER_PI_P_PARAMS_T RegCurrentData;
Int16 RegCurrentSatFlag;

static GFLIB_CONTROLLER_PI_P_PARAMS_T RegOmeData;
Int16 RegOmeSatFlag;

static GFLIB_CONTROLLER_PI_P_PARAMS_T RegOutputVoltageData;
Int16 RegOutputVoltageSatFlag;
UWord16 RegOutputVoltageEnable;

GFLIB_RAMP16_T OutputVoltageRampParam;

Frac16 OutputVoltageDesired, OutputVoltageDesiredRamp;

Frac16 strida0_bot, stridal_bot;
Frac16 Duty, DutyCurrent, DutyOutVolt;
Frac16 CurrentDesired;

Frac16 OmeDesired;
Frac16 Ome;
Frac16 OmeFlt;
Frac16 OmeFiltrC0 = FRAC16(0.051), OmeFiltrC1;

Frac16 Ranorm = FRAC16(0.99); // FRAC16(0.4534);
Frac16 CfinormCfi = FRAC16(0.7373);
Frac32 RanormVoltage;
Frac32 MotorVoltage;

UWord16 rele;
UWord16 konec1;
UWord16 konec2;

Frac16 OutputVoltageAmpl;
Frac16 OutputVoltageDC;
Frac16 OutputVoltageDCFlt;
Frac16 OutputVoltageDCFiltrC0 = FRAC16(0.014), OutputVoltageDCFiltrC1; //?

UWord16 SWTimerCnt, SWTimerMax = 20, SWTimerFlag;

Frac16 tmp16a, tmp16b, tmp16c;

union
{
    struct
    {
```



Příloha č.8 - Zdrojový kód programu pro řízení pohonu - 2.část

```
    Frac16 Current2; // 0 ANA0
    Frac16 ACVolt3; // 1 ANA3
    Frac16 DCVolt; // 2 ANA2
    Frac16 K_Ain1; // 3 ANA6
    Frac16 Current1; // 4 ANB0
    Frac16 ACVolt2; // 5 ANB1
    Frac16 ACVolt1; // 6 ANB3
    Frac16 Vrefmid; // 7 ANB2
};
adc_tBuff All;
}ADCResults;

//adc_tBuff

void main (void)
{
    ioctl(SYS, SYS_INIT, NULL);
    ioctl(COP, COP_INIT, NULL);
    ioctl(GPIO, GPIO_INIT_ALL, NULL);

    ioctl(EFPWM, EFPWM_INIT, NULL);
    ioctl(SCI_0, SCI_INIT, NULL);
    ioctl(ADC, ADC_INIT, NULL);
    ioctl(XBAR, XBAR_INIT, NULL);

    // Nastaveni parametru regulatoru proudu
    RegCurrentData.f16PropGain = FRAC16(0.55);
    RegCurrentData.f16IntegGain = FRAC16(0.55);
    RegCurrentData.i16PropGainShift = 2;
    RegCurrentData.i16IntegGainShift = 0;
    RegCurrentData.f16UpperLimit = FRAC16(0.45);
    RegCurrentData.f16LowerLimit = FRAC16(-0.45);
    CurrentDesired = FRAC16(0.30);

    // Nastaveni parametru regulatoru vystupniho napeti
    RegOutputVoltageData.f16PropGain = FRAC16(0.5);
    RegOutputVoltageData.f16IntegGain = FRAC16(0.01);
    RegOutputVoltageData.i16PropGainShift = 5;
    RegOutputVoltageData.i16IntegGainShift = 0;
    RegOutputVoltageData.f16UpperLimit = FRAC16(0.45); //?
    RegOutputVoltageData.f16LowerLimit = FRAC16(-0.45); //?

    // Rampa zadaneho vystupniho napeti
    OutputVoltageRampParam.f16RampUp = FRAC16(.001);
    OutputVoltageRampParam.f16RampDown = FRAC16(.001);

    // inicializace interrupt controlleru a povoleni preruseni
    ioctl(INTC, INTC_INIT, NULL);
    archEnableInt();

    FMSTR_Init();

    while(1)
    {
        ioctl(GPIO_F, GPIO_WRITE_DATA, BIT_5 & (rele << 5));
        FMSTR_Poll();
        /* feed the watchdog periodically */
        ioctl(COP, COP_CLEAR_COUNTER, NULL);
    }
}

#pragma interrupt
void pwmcpr_isr(void)
{
    ioctl(EFPWM_SUB0, EFPWMS_CLEAR_SUBMODULE_FLAGS, EFPWM_COMPARE_VAL0);
}

#pragma interrupt saveall
void adceos_isr(void)
{
    ioctl(ADC, ADC_CLEAR_STATUS_EOSI, NULL);
    // Nacteni dat z ADC
    ioctl(ADC, ADC_READ_ALL_SAMPLES, ADCResults.All);
    ADCResults.Current1 = -ADCResults.Current1;

    // Vypocet 6-pulzne usmerneneho napeti:
    tmp16a = abs_s(ADCResults.ACVolt1 - ADCResults.ACVolt2);
    tmp16b = abs_s(ADCResults.ACVolt2 - ADCResults.ACVolt3);
```



Příloha č.8 - Zdrojový kód programu pro řízení pohonu - 3.část

```
tmp16c = abs_s(ADCResults.ACVolt3 - ADCResults.ACVolt1);
OutputVoltageDC = (tmp16a > tmp16b ? tmp16a : tmp16b) > tmp16c ? (tmp16a > tmp16b ? tmp16a :
tmp16b) : tmp16c;

// Vypocet okamzite velikosti prostoroveho vektoru (amplitudy)
OutputVoltageAmp1 = (GFLIB_SqrtPoly(L_mult(ADCResults.ACVolt1,ADCResults.ACVolt1) +
L_mult(ADCResults.ACVolt2,ADCResults.ACVolt2) +
L_mult(ADCResults.ACVolt3,ADCResults.ACVolt3) -
L_mult(ADCResults.ACVolt1,ADCResults.ACVolt2) -
L_mult(ADCResults.ACVolt3,ADCResults.ACVolt1) -
L_mult(ADCResults.ACVolt2,ADCResults.ACVolt3) ));

// Filtr vystupniho napeti
OutputVoltageDCFiltrC1 = FRAC16(1) - OutputVoltageDCFiltrC0;
OutputVoltageDCFilt = mac_r(L_mult(OutputVoltageDC, OutputVoltageDCFiltrC0),
OutputVoltageDCFilt, OutputVoltageDCFiltrC1 );

// Cist stav koncovych spinacu:
konec1 = (ioctl( GPIO_E, GPIO_READ_DATA, NULL) & BIT_4)>>4;
konec2 = (ioctl( GPIO_E, GPIO_READ_DATA, NULL) & BIT_5)>>5;

SWTimerCnt++;
if(SWTimerCnt >= SWTimerMax)
{
    // Rampa zadane hodnoty vystupniho napeti
    OutputVoltageDesiredRamp = GFLIB_Ramp16(OutputVoltageDesired, OutputVoltageDesiredRamp, &
OutputVoltageRampParam);
    SWTimerCnt = 0;
}

// reg vystupniho napeti
if(RegOutputVoltageEnable)
{
    if(konec1 && (OutputVoltageDesiredRamp > OutputVoltageDCFilt))
    {
        RegOutputVoltageData.f32IntegPartK_1 = 0;
        DutyOutVolt = 0;
    }
    else if(konec2 && (OutputVoltageDesiredRamp < OutputVoltageDCFilt))
    {
        RegOutputVoltageData.f32IntegPartK_1 = 0;
        DutyOutVolt = 0;
    }
    else
    {
        if( abs_s(OutputVoltageDesiredRamp - OutputVoltageDCFilt) > FRAC16(0.015))
        RegOutputVoltageData.f32IntegPartK_1 = 0;
        DutyOutVolt = GFLIB_ControllerPIp(OutputVoltageDesiredRamp - OutputVoltageDCFilt ,&
RegOutputVoltageData,&RegOutputVoltageSatFlag);
    }
}
else
    OutputVoltageDesired = OutputVoltageDCFilt;

// Estimace otacek
// MotorVoltage = (L_shl(L_mult(strida, ADCResults.DCVolt),1));
// RanormVoltage = L_mult(Ranorm, ADCResults.Current2);
// Ome = mult( extract_h(L_sub(MotorVoltage, RanormVoltage)), CfinormCfi );
// Filtr otacek
// OmeFiltrC1 = FRAC16(1) - OmeFiltrC0;
// OmeFilt = mac_r(L_mult(Ome, OmeFiltrC0), OmeFilt, OmeFiltrC1 );

// reg otacek
// CurrentDesired = GFLIB_ControllerPIpFasm(OmeDesired - OmeFilt ,&RegOmeData,&RegOmeSatFlag);

// reg proudu
DutyCurrent = GFLIB_ControllerPIpFasm(CurrentDesired - abs_s(ADCResults.Current2) ,&
RegCurrentData,&RegCurrentSatFlag);

Duty = DutyOutVolt < DutyCurrent ? ( DutyOutVolt > -DutyCurrent ? DutyOutVolt : -DutyCurrent)
: DutyCurrent;

ioctl(EFPWM_SUB0, EFPWMS_CENTER_ALIGN_UPDATE_CHANNEL_23, FRAC16(0.5)+Duty);
//ioctl(EFPWM_SUB0, EFPWMS_CENTER_ALIGN_UPDATE_CHANNEL_45, strida0_bot);
ioctl(EFPWM_SUB1, EFPWMS_CENTER_ALIGN_UPDATE_CHANNEL_23, FRAC16(0.5)-Duty);
//ioctl(EFPWM_SUB1, EFPWMS_CENTER_ALIGN_UPDATE_CHANNEL_45, strida1_bot);
FMSTR_Recorder();
ioctl(EFPWM, EFPWM_SET_LOAD_OK, EFPWM_SUBMODULE_0 | EFPWM_SUBMODULE_1);
}
```