

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Lukáš Morávek



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

ŘÍDICÍ MODUL BLDC MOTORU

BLDC MOTOR CONTROL MODULE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Morávek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Procházka, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Lukáš Morávek

ID: 146908

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí modul BLDC motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a realizujte zapojení řídicí a silové části měniče pro BLDC motor 48V/400 W/12 000 ot./min.
2. Navrhněte řídicí algoritmus měniče.
3. Oživte realizované obvody a ověřte navržený software.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Souček P., Servomechanismy ve výrobních strojích, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 210 s. ISBN:80-0-02902-6
- [2] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Petr Procházka, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a realizáciou hardvéru a softvéru pre riadenie a reguláciu vysokootáčkového pohonu s BLDC motorom, ktorý bude slúžiť ako vreteno pre CNC frézovačku. V práci je podrobne popísaný návrh schémy zapojenia a dosky plošných spojov silovej časti, riadiacej časti a napájacej časti trojfázového tranzistorového meniča riadeného DSP procesorom. Taktiež je podrobne popísaný program DSP procesora pre riadenie a reguláciu BLDC motora, ktorého funkcia je overovaná pomocou finálnych meraní. Výsledkom diplomovej práce je funkčný vysokootáčkový pohon s BLDC motorom.

Abstract

Diploma thesis describes design and realization of hardware and software for controlling and regulation of the high-speed drive with BLDC motor, which will serve as a spindle for CNC milling machine. The thesis described in detail the schematic design and the design of printed circuit board of the power part, control part and power supply part of the three-phase transistor inverter controlled by DSP processor. It is also described in detail program of DSP processor for controlling and regulation of the BLDC motors, which the function is verified by the final measurements. The result of Diploma thesis is functional high-speed drive with BLDC motor.

Kľúčové slová

BLDC motor; EC motor; vysokootáčkový pohon; vreteno; trojfázový menič; DSP procesor; regulácia otáčok; regulácia prúdu

Keywords

BLDC motor; EC motor; high-speed drive; spindle; three-phase inverter; DSP processor; speed control; current control

Bibliografická citácia

MORÁVEK, L. *Řídicí modul BLDC motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Procházka, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Riadiaci modul BLDC motora som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 20.5.2016

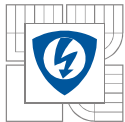
Podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce, Ing. Petr Procházka, PhD., za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce. Taktiež ďakujem firme Bel Power Solutions Dubnica nad Váhom za materiálnu a odbornú pomoc pod vedením Ing. Peter Hudák, PhD..

V Brne dňa 20.5.2016

Podpis autora



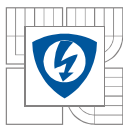
Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	8
ZOZNAM TABULIEK	10
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	11
ÚVOD	16
1 BLDC MOTOR	17
1.1 KONŠTRUKCIA	17
1.2 RIADENIE	18
1.3 REGULÁCIA	21
1.3.1 MATEMATICKÝ MODEL MOTORA	21
1.3.2 PODRIADENÁ PRÚDOVÁ REGULÁCIA	23
1.3.3 NADRIADENÁ OTÁČKOVÁ REGULÁCIA	25
1.3.4 OTÁČKOVÁ REGULÁCIA S PARALELNÝM PRÚDOVÝM OBMEDZENÍM	27
1.4 POROVNANIE S OSTATNÝMI MOTORMI	28
2 SCHÉMA ZAPOJENIA	30
2.1 BLDC MOTOR	31
2.2 TROJFÁZOVÝ TRANZISTOROVÝ MENIČ	32
2.3 BUDIČE	34
2.4 DIGITÁLNY SIGNÁLOVÝ PROCESOR	36
2.5 NAPÁJANIE	40
3 DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV	44
4 PROGRAM	46
4.1 INICIALIZÁCIA	47
4.2 SNÍMANIE HALLOVÝCH SNÍMAČOV	48
4.3 PWM MODULÁTORY SIGNÁLU	49
4.4 SNÍMANIE ŽIADANÝCH A MERANÝCH HODNÔT	49
4.5 REGULÁCIA	50
5 MERANIE	51
5.1 MERANIE KOMUTAČNÉHO DEJA	51
5.2 MERANIE PRIEBEHOV FÁZOVÝCH PRÚDOV A PRÚDU V MEDZIOBVODE	53
5.3 MERANIE PRECHODOVEJ CHARAKTERISTIKY REGULÁTORA OTÁČOK	55
6 ZÁVER	57
LITERATÚRA	59
ZOZNAM PRÍLOH	61

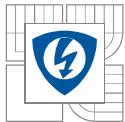


ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1.1</i>	<i>Prierez BLDC motora s vnútorným a vonkajším rotorom</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.2</i>	<i>Rôzne varianty usporiadania permanentných magnetov na rotore</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.3</i>	<i>Schéma zapojenia riadenia BLDC motora</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.4</i>	<i>Priebehy indukovaných napätí, fázových prúdov a signálov z Hallových snímačov v jednotlivých sekciách spínania tranzistorov</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 1.5</i>	<i>Náhradná schéma zapojenia jednosmerného motora.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 1.6</i>	<i>Bloková schéma matematického modelu jednosmerného motora</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 1.7</i>	<i>Bloková schéma matematického modelu jednosmerného motora s podriadenou prúdovou regulačnou slučkou</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1.8</i>	<i>Bloková schéma podriadenej prúdovej slučky po odstránení skrížených spätných väzieb</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 1.9</i>	<i>Bloková schéma nadriadenej otáčkovej slučky.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 1.10</i>	<i>Bloková schéma otáčkovej slučky bez prúdovej regulácie</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2.1</i>	<i>Bloková schéma zapojenia pohonu BLDC motora</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2.2</i>	<i>BLDC motor typu HXKJ DMW57314.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 2.3</i>	<i>Schéma zapojenia trojfázového tranzistorového meniča</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 2.4</i>	<i>Schéma zapojenia procesorovej časti budiča</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 2.5</i>	<i>Schéma zapojenia tranzistorovej časti meniča</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 2.6</i>	<i>Schéma zapojenia napájacích pinov DSP procesora</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2.7</i>	<i>Schéma zapojenia programovacích pinov DSP procesora.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 2.8</i>	<i>Schéma zapojenia digitálnych pinov DSP procesora</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 2.9</i>	<i>Schéma zapojenia analógových pinov DSP procesora.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 2.10</i>	<i>Schéma zapojenia jednokvadrantového znižujúceho meniča</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 2.11</i>	<i>Schéma zapojenia lineárneho stabilizátora napätia.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 2.12</i>	<i>Schéma zapojenia jednočinného priepustného meniča.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 3.1</i>	<i>Vrchná strana dosky plošných spojov.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 3.2</i>	<i>Spodná strana dosky plošných spojov.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4.1</i>	<i>Vývojový diagram programu pre DSP procesor</i>	<i>47</i>



<i>Obr. 5.1 Meranie komutačného deja fázy A</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.2 Meranie komutačného deja fázy B</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5.3 Meranie komutačného deja fázy C</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5.4 Meranie komutačného deja na všetkých fázach</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.5 Meranie priebehu fázového prúdu</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.6 Meranie priebehu prúdu v medziobvode</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.7 Meranie prechodovej charakteristiky regulátora otáčok bez vplyvu prúdového obmedzenia</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5.8 Meranie prechodovej charakteristiky regulátora otáčok s vplyvom prúdového obmedzenia</i>	<i>56</i>

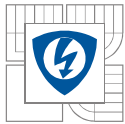


ZOZNAM TABULIEK

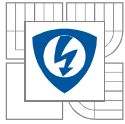
<i>Tab. 1.1 Poradie spínania tranzistorov v trojfázovom meniči pre chod BLDC motora v protismere hodinových ručičiek.....</i>	<i>19</i>
---	-----------

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

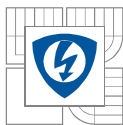
Symbol	Popis	Jednotka
B	koeficient viskózneho trenia	[N.m.s]
C	elektrická kapacita	[F]
$c\emptyset$	konštanta elektrického motora	[V.s.rad ⁻¹]
f	elektrická frekvencia	[Hz]
f_H	horná medzná elektrická frekvencia	[Hz]
f_{PWM}	spínacia elektrická frekvencia meniča	[Hz]
f_{SW}	spínacia elektrická frekvencia	[Hz]
F_1	prvá prenosová funkcia motora	[A.V ⁻¹]
F_2	druhá prenosová funkcia motora	[N.m.A ⁻¹]
F_3	tretia prenosová funkcia motora	[rad.s ⁻¹ .N ⁻¹ .m ⁻¹]
F_4	štvrtá prenosová funkcia motora	[V.s.rad ⁻¹]
F_5	piata prenosová funkcia motora	[V.A ⁻¹]
F_6	šiesta prenosová funkcia motora	[rad.s ⁻¹ .V ⁻¹]
F_i	prenosová funkcia snímača prúdu	[V.A ⁻¹]
F_M	prenosová funkcia meniča	[-]
F_O	prenosová funkcia metódy štandardných prenosov	[-]
F_{Ri}	prenosová funkcia regulátora prúdu	[-]
$F_{R\omega}$	prenosová funkcia regulátora otáčok	[-]
F_{Si}	prenosová funkcia sústavy prúdovej slučky	[-]
$F_{S\omega}$	prenosová funkcia sústavy otáčkovej slučky	[-]
F_{wi}	prenosová funkcia uzavretej prúdovej slučky	[A.V ⁻¹]
F_ω	prenosová funkcia snímača otáčok	[V.s.rad ⁻¹]
GBWP	šírka pásma pri jednotkovom zosilnení	[Hz]
I_a	elektrický prúd prechádzajúci kotvou	[A]
I_A, I_B, I_C	fázové elektrické prúdy	[A]
I_{AV}	stredná hodnota elektrického prúdu	[A]
I_d	elektrický prúd v medziobvode	[A]
I_D	trvalý elektrický prúd cez prechod Drain-Source	[A]
$I_{D-FAULT}$	poruchový elektrický prúd cez prechod Drain-Source	[A]
I_{LIMIT}	limitný elektrický prúd	[A]
I_M	meraný elektrický prúd	[A]



I_{MAX}	maximálna hodnota elektrického prúdu	[A]
I_N	menovitý elektrický prúd	[A]
I_O	stredná hodnota výstupného prúdu	[A]
I_{OUT}	maximálny výstupný elektrický prúd	[A]
I_{RMS}	efektívna hodnota elektrického prúdu	[A]
I_{SW}	maximálny elektrický prúd prechádzajúci spínačom	[A]
I_Z	žiadaný elektrický prúd	[A]
J	moment zotrvačnosti	[kg.m ²]
K_i	proporcionálne zosilnenie prenosu snímača prúdu	[V.A ⁻¹]
K_M	proporcionálne zosilnenie prenosu meniča	[-]
K_ω	proporcionálne zosilnenie prenosu snímača otáčok	[V.s.rad ⁻¹]
L	indukčnosť	[H]
L_a	indukčnosť vinutia	[H]
M	moment sily	[N.m]
M_Z	záťažný moment sily	[N.m]
n	počet prvkov	[-]
n_N	menovité mechanické otáčky	[ot./min]
n_{PI}	hraničné otáčky pre zmenu zosilnenia PI regulátora	[ot./min]
p	prevod transformátora	[-]
P_{MAX}	špičkový výkon	[W]
$P_{MAX,b}$	maximálny odpor bočníka	[W]
P_N	menovitý mechanický výkon	[W]
P_{STR}	stratový elektrický výkon	[W]
$P_{STR,d0}$	celkový stratový výkon diódy	[W]
$P_{STR,t}$	celkový stratový výkon tranzistora	[W]
$P_{STR,t(on)}$	stratový výkon tranzistora v priepustnom smere	[W]
$P_{STR,t(pr)}$	prepínací stratový výkon tranzistora	[W]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_a	elektrický odpor vinutia	[Ω]
R_b	elektrický odpor bočníka	[Ω]
$R_{DS(on)}$	statický odpor zopnutého prechodu Drain-Source	[Ω]
s	strieda	[-]
$t_{d(off)}$	doba oneskorenia vypnutia	[s]



$t_{d(on)}$	doba oneskorenia zapnutia	[s]
t_f	dobežná doba	[s]
t_r	nábežná doba	[s]
T_a	elektrická časová konštanta motora	[s]
T_{MECH}	mechanická časová konštanta motora	[s]
T_{PWM}	spínacia perióda meniča	[s]
U	elektrické napätie	[V]
U_a	elektrické napätie kotvy	[V]
$U_{(BR)DDS}$	prierazné elektrické napätie prechodu Drain-Source	[V]
U_{CC1}	rozsah vstupného napájacieho elektrického napätia	[V]
$U_{DS-FAULT(th)}$	saturačné napätie MOS-FET tranzistora	[V]
U_{DSTH}	prahové napätie saturačnej ochrany	[V]
U_F	úbytok napätia na dióde v priepustnom smere	[V]
U_{FB}	referenčné elektrické napätie spätnej väzby	[V]
$U_{GS(th)}$	prahové elektrické napätie prechodu Gate-Source	[V]
U_i	indukované elektrické napätie	[V]
U_{iA}, U_{iB}, U_{iC}	indukované elektrické napätia BLDC motora	[V]
U_{IN}	rozsah vstupného napájacieho elektrického napätia	[V]
$U_{IT+(UVLO)}$	prahové napätie podpäťovej ochrany pri náraste napätia	[V]
$U_{IT-(UVLO)}$	prahové napätie podpäťovej ochrany pri poklese napätia	[V]
U_N	menovité napájacie elektrické napätie	[V]
U_{OUT}	rozsah výstupného elektrického napätia	[V]
U_0	výstupné elektrické napätie na operačnom zosilňovači	[V]
U_R	riadiace elektrické napätie	[V]
U_{RRM}	maximálna hodnota opakovateľného záverného napätia	[V]
U_Z	Zenerovo elektrické napätie	[V]
δ	opakovateľná presnosť	[m]
ΔI	zvlnenie výstupného elektrického prúdu	[A]
ΔU	úbytok elektrického napätia	[V]
θ	uhlová dráha	[rad]
τ_1, τ_2	časové konštanty	[s]
τ_i	časová konštanta snímača prúdu	[s]
τ_M	časová konštanta meniča	[s]



τ_{Σ}	súčtová časová konštanta	[s]
τ_{ω}	časová konštanta snímača otáčok	[s]
$\emptyset$	priemer upínacej klieštiny	[m]
ω	uhlová rýchlosť	[rad.s ⁻¹]
ω_M	meraná uhlová rýchlosť	[rad.s ⁻¹]
ω_Z	žiadaná uhlová rýchlosť	[rad.s ⁻¹]

Skratka**Popis**

A, B, C	výstupy z troch Hallových snímačov
ADC	z angl. Analog-to-Digital Converter, t.j. analógovo-digitálny prevodník
BLDC	z angl. BrushLess Direct Current motor, t.j. bezkartáčový jednosmerný motor
CNC	z angl. Computerized Numerical Control, t.j. počítačovo-číslkové riadenie
DAC	z angl. Digital-to-Analog Converter, t.j. digitálne-analógový prevodník
DPS	Doska Plošných Spojov
DSP	Digitálny Signálový Procesor
EC	z angl. Electronically Commutated motor, t.j. elektronicky komutovaný motor
GND	z angl. Ground, t.j. z angl. Ground, t.j. zem
Hall	Hallove snímače
Hall A	Hallov snímač A
Hall B	Hallov snímač B
Hall C	Hallov snímač C
IGBT	z angl. Insulated-Gate Bipolar Transistor, t.j. bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
JTAG	z angl. Joint Test Action Group, t.j. spoločná testovacia a akčná skupina
MOS-FET	z angl. Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor, t.j. poľom riadený tranzistor so štruktúrou kov-oxid-polovodič
N	z angl. North pole, t.j. severný pól
PGND	z angl. Power Ground, t.j. výkonová zem
PI	Proporcionálne – Integračný
PWM	z angl. Pulse-Width Modulation, t.j. pulzná šírková modulácia
S	z angl. South pole, t.j. južný pól
S1 – S6	sekcie spínania tranzistorov v trojfázovom meniči
SMD	z angl. Surface Mount Devices, t.j. súčiastky pre povrchovú montáž



SGND	z angl. Signal Ground, t.j. signálová zem
T1 – T6	tranzistory v trojfázovom meniči
THD	z angl. Through-Hold Devices, t.j. súčiastky s drôtovými vývodmi
U, V, W	označenie fáz motora
U1, U2	začiatok a koniec vinutia fázy U
uP	mikroprocesor
V1, V2	začiatok a koniec vinutia fázy V
W1, W2	začiatok a koniec vinutia fázy W

ÚVOD

Diplomová práca na tému Riadiaci modul BLDC motora sa zaoberá návrhom a realizáciou hardvéru a softvéru, ktorý bude slúžiť na riadenie a reguláciu vysokootáčkového BLDC motora. Vysokootáčkový BLDC motor s reguláciou otáčok bude použitý ako vreteno CNC (z angl. Computerized Numerical Control, t.j. počítačovo-číslicové riadenie) frézovačky, ktorá bude obrábať dosky plošných spojov. Diplomová práca sa zameriava na potreby regulácie otáčok a regulácie prúdu BLDC motorov pre potreby vretena obrábacieho stroja.

V prvej kapitole sa teoreticky popisuje BLDC motor. Opisuje sa jeho konštrukcia a základné zhody a rozdiely medzi BLDC motorom a ostatnými motormi. Taktiež sa popisuje jeho základné riadenie a komutácia pomocou elektroniky. Vypočítava sa kaskádna regulácia s nadriadenou otáčkovou slučkou a s podriadenou prúdovou slučkou, ale aj samotná regulácia otáčok s paralelnou prúdovou ochranou. Nakoniec sa vyhodnocujú výhody a nevýhody BLDC motora oproti ostatným motorom.

Druhá kapitola sa zameriava na celkový popis schémy zapojenia elektroniky pre vysokootáčkový pohon s BLDC motorom. Na začiatku sa popisuje vybraný vysokootáčkový BLDC motor a jeho menovité parametre. Pokračuje sa s popisom trojfázového tranzistorového meniča vrátane jednotlivých budičov potrebných pre vhodné spínanie tranzistorov. Popisuje sa schéma zapojenia DSP procesora, ktorý zabezpečuje riadenie a reguláciu BLDC motora. Ako regulátor spracováva vstupné merané a žiadané signály a vytvára vhodné výstupné signály. Nakoniec sa popisujú napájacie zdroje, ktoré zo vstupného napätia vytvárajú vhodné napájacie napätia pre všetku spomínanú elektroniku v zapojení. Medzi dôležité úlohy napájacích zdrojov patrí aj galvanické oddelenie napájacieho napätia pre jednotlivé budiče tranzistorov.

V tretej kapitole diplomovej práce sa popisuje návrh a realizácia dosky plošných spojov. V kapitole sú vybrané vhodné púzdra súčiastok a navrhnuté vhodné geometrické usporiadanie súčiastok tak, aby boli dodržané základné požiadavky navrhovania dosiek plošných spojov pre potreby výkonovej elektroniky a elektrických pohonov. Každá časť popisovanej schémy zapojenia vysokootáčkového pohonu s BLDC motorom je označená na doske plošných spojov. Podrobne sa popisuje aj potreba konkrétneho zapojenia jednotlivých súčiastok a jednotlivých sekcií na doske plošných spojov.

Štvrtá kapitola sa zaoberá popisom programu DSP procesora. Program je podrobne popísaný pomocou vývojového diagramu, ktorý zobrazuje presný sled funkcií v hlavnom programe, ale aj v podprogramoch. Po podrobne popísanej inicializácii programu nasleduje popis hlavného programu, kde sa vykonáva načítavanie signálov z Hallových snímačov a generovanie PWM signálov, tak aby bola zabezpečená správna komutácia BLDC motora pre chod v protismere hodinových ručičiek. V podprograme prerušenia od ADC prevodníka sa vykonáva meranie a spracovanie signálov potrebných pre reguláciu a zároveň sa vykonáva aj samotná regulácia pomocou PI regulátora otáčok s paralelným prúdovým obmedzením.

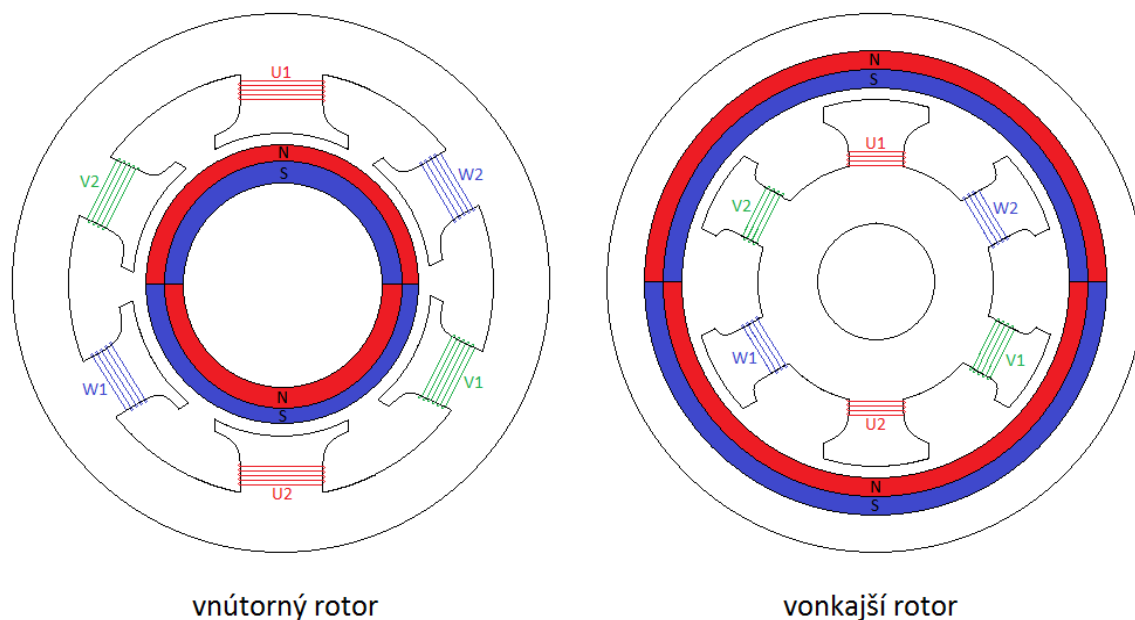
Posledná kapitola popisuje finálne merania na funkčnom vysokootáčkovom pohone s BLDC motorom. Na priložených oscilogramoch sa overuje návrh hardvéru a softvéru pre správne komutovanie vysokootáčkového BLDC motora v protismere hodinových ručičiek a taktiež správny priebeh regulácie otáčok BLDC motora s paralelným prúdovým obmedzením.

1 BLDC MOTOR

Ako je spomínané v literatúre [2], BLDC motor (z angl. BrushLess Direct Current motor, t.j. bezkartáčový jednosmerný motor) alebo nazývaný aj EC motor (z angl. Electronically Commutated motor, t.j. elektronicky komutovaný motor) je vhodnou náhradou jednosmerných motorov používaných v servomechanizmoch. Konštrukčne sa podobá na jednosmerný motor, ale principiálne sa zaraďuje medzi striedavé synchronné motory.

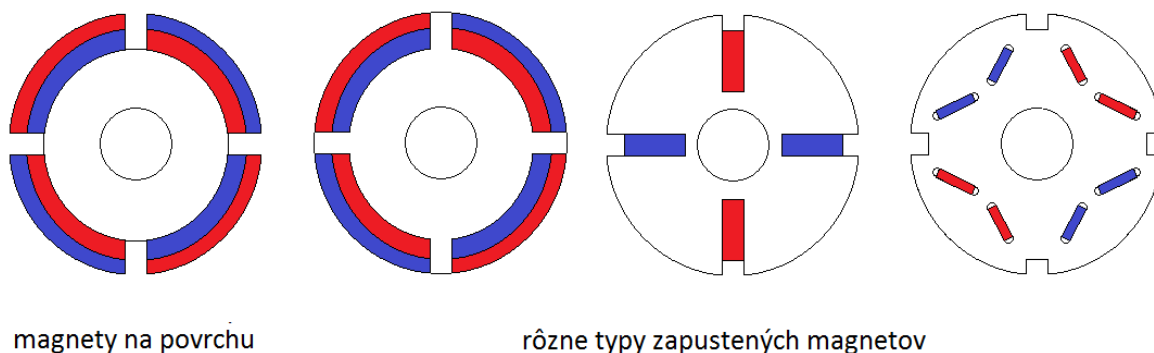
1.1 Konštrukcia

Na rozdiel od jednosmerného motora s permanentnými magnetmi má BLDC motor permanentné magnety uložené na rotore a trojfázové vinutie má uložené v statore. Pre jednoduchšiu výrobu sa častejšie používa sústredené vinutie. Motor neobsahuje komutátor s klznými kontaktmi. Funkciu komutátora zabezpečuje elektronický menič. Rotor môže byť vnútorný alebo vonkajší (Obr. 1.1).



Obr. 1.1 Prierez BLDC motora s vnútorným a vonkajším rotorom, prevzaté z literatúry [1], upravené autorom

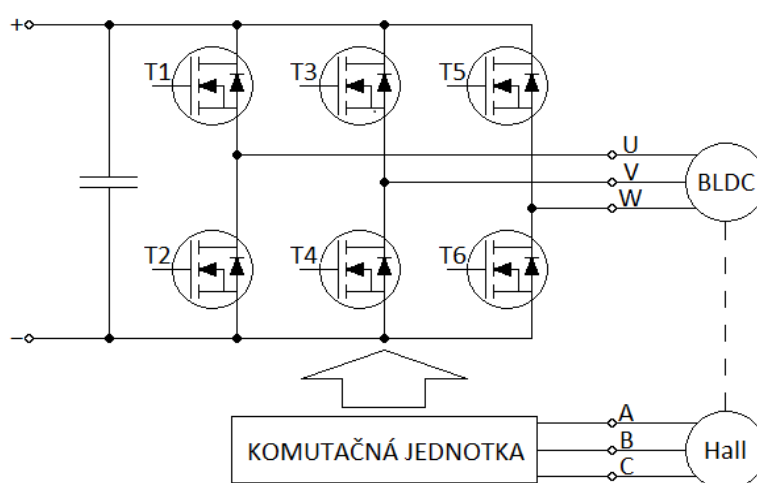
Permanentné magnety sa vyrábajú zo zliatiny neodým-železo-bór. Permanentné magnety môžu byť uložené na rotore alebo zapustené v rotore v rôznom geometrickom usporiadaní (Obr. 1.2). Vysokootáčkové BLDC motory určené pre potreby vretena obrábacích strojov majú špeciálne uložený hriadeľ, aby nevznikali vyosenia nástroja počas obrábania.



Obr. 1.2 Rôzne varianty usporiadania permanentných magnetov na rotore, prevzaté z literatúry [1], upravené autorom

1.2 Riadenie

Absenciu komutátora nahrádza trojfázový menič, ktorý je riadený pomocou komutačnej jednotky (Obr. 1.3). Komutačná jednotka dostáva spätnú väzbu zo snímača polohy a po 60° elektrických prepne novú polohu rotora. Tým vzniká šesť možných zopnutí tranzistorov v trojfázovom moste na jednu otáčku elektrického poľa. Prúd preteká vždy len dvoma fázami BLDC motora, tretia fáza je vypnutá. Toto riadenie zabezpečí, že momentotvorná a tokotvorná os motora budú od seba vzdialené $90^\circ \pm 30^\circ$ elektrických. Komutačná jednotka zabezpečuje aj reverzáciu otáčok a to tak, že sa zmení sled spínania tranzistorov. Pre potreby určovania polohy rotora po 60° elektrických sa najčastejšie používajú Hallové sondy. Tie sú rozmiestnené na rotore po 120° mechanických.



Obr. 1.3 Schéma zapojenia riadenia BLDC motora, prevzaté z literatúry [11], upravené autorom

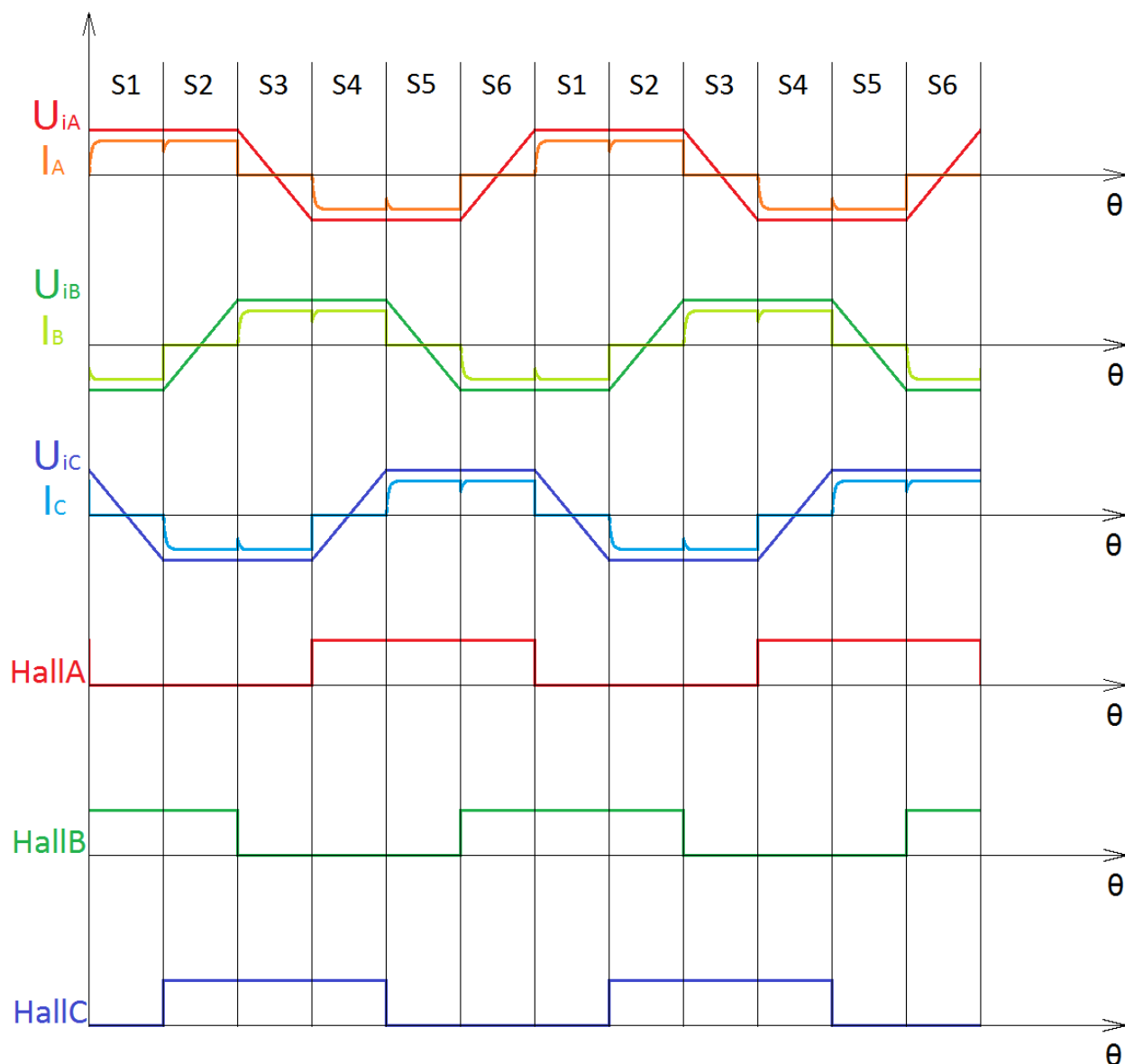
Pre potreby BLDC motora pre vreteno stačí zabezpečiť spínanie tranzistorov v trojfázovom moste tak, aby sa motor točil v protismere hodinových ručičiek. Tým je zaručené, že nástroj bude obrábať materiál. Pri zapojení podľa schémy (Obr. 1.3) vzniká spínacia tabuľka pre komutačnú jednotku (Tab. 1.1). Tranzistory vo vetve sú označené $T1 - T6$ a poradie sekcií spínania tranzistorov je označené $S1 - S6$. Z tabuľky je vidieť, že v jednej sekcii sú zopnuté vždy len dva tranzistory, a preto prechádza prúd len dvoma fázami BLDC motora. V tabuľke sú vyznačené vrchné tranzistory v zopnutom stave skratkou PWM (z angl. Pulse-Width Modulation, t.j. pulzná šírková modulácia), pretože sú pripravené na PWM moduláciu napätia BLDC motora. Tým sa zabezpečí možná regulácia otáčok BLDC motora. Spodné tranzistory nevyžadujú PWM moduláciu. Pri tomto spínaní je automaticky zabezpečená dostatočná doba medzi spínaním oboch tranzistorov v jednej vetve na hodnotu 60° elektrických. V tabuľke je vidieť aj sled jednotlivých signálov, ktoré sú generované Hallovými snímačmi na rotore a smery fázových prúdov v BLDC motore.

Tab. 1.1 Poradie spínania tranzistorov v trojfázovom meniči pre chod BLDC motora v protismere hodinových ručičiek, prevzaté z literatúry [11], upravené autorom

Sekcia	T1	T2	T3	T4	T5	T6	HallA	HallB	HallC	I _A	I _B	I _C
S1	PWM	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	0	1	0	+	-	0
S2	PWM	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0	1	1	+	0	-
S3	OFF	OFF	PWM	OFF	OFF	ON	0	0	1	0	+	-
S4	OFF	ON	PWM	OFF	OFF	OFF	1	0	1	-	+	0
S5	OFF	ON	OFF	OFF	PWM	OFF	1	0	0	-	0	+
S6	OFF	OFF	OFF	ON	PWM	OFF	1	1	0	0	-	+

Priebehy indukovaných napätí, fázových prúdov a signálov generovaných Hallovými snímačmi v jednotlivých sekciách sú zobrazené v grafe (Obr. 1.4). Na grafe je vidieť, že fázy sa spínajú po 120° elektrických. Indukované napätia majú tvar lichobežníka a pri nábežných a dobežných rampách sa dá priamo merať indukované napätie na motore. Fázové prúdy sú zopnuté $2/3$ periódy. Na priebehoch je vidieť oneskorený nárast prúdu spôsobený indukčnosťami vinutí. Z grafu je vidieť, že pre vyhodnotenie polohy rotora je potrebné mať signály zo všetkých troch Hallových snímačov zároveň a vyhodnocovať ich pomocou váhovej logiky. Tvary signálov z Hallových snímačov sa podobajú na invertovaný priebeh indukovaných napätí. Je to spôsobené uložením Hallových snímačov medzi jednotlivé fázy BLDC motora.

Riadiť BLDC motor sa dá aj pomocou bezsenzorových metód. Najznámejšia bezsenzorová metóda je metóda snímania prechodu indukovaného napätia nulou. Z obrázku (Obr. 1.4) je už zrejmé, že signál z Hallových snímačov a priebeh indukovaných napätí sú podobné. Z tejto podobnosti sa vychádza pri metóde snímania prechodu indukovaných napätí nulou. Tým sa zabezpečí rovnaké rozdelenie sekcií spínania tranzistorov v trojfázovom meniči. Snímanie prechodu indukovaného napätia nulou sa deje vždy pre tú fázu, cez ktorú neprechádza prúd. K tomu treba zabezpečiť aj logiku meracích obvodov. Nevýhodou tejto metódy je meranie malých indukovaných napätí pri malých otáčkach rotora. Ďalšou nevýhodou je absencia signálov pri zabrzdennom rotore. Pre tieto nedostatky sa v praxi preferuje snímačová metóda riadenia BLDC motorov.

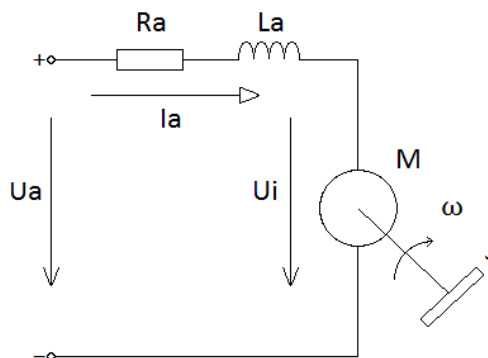


Obr. 1.4 Priebehy indukovaných napätí, fázových prúdov a signálov z Halloých snímačov v jednotlivých sekciách spínania tranzistorov, prevzaté z literatúry [11], upravené autorom

1.3 Regulácia

1.3.1 Matematický model motora

Pri regulácii je vhodné vychádzať z matematického modelu jednosmerného motora. Matematický model vychádza z náhradnej schémy zapojenia jednosmerného motora (Obr. 1.5).



Obr. 1.5 Náhradná schéma zapojenia jednosmerného motora, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

Prvá rovnica vychádza z druhého Kirchhoffového zákona (1.1):

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + u_i$$

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + c\Phi\omega$$

(1.1)

Druhá rovnica vychádza z rovnováhy momentov na hriadeli (1.2):

$$M = M_z + B \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$c\Phi i_a = M_z + B \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

(1.2)

Prenosové funkcie jednosmerného motora sa dostanú odvodením z rovníc (1.1) a (1.2) pomocou Laplaceovej transformácie. Prenos $F_1(p)$ udáva zmenu prúdu prechádzajúceho kotvou I_a pri zmene rozdielu napätia na kotve U_a a indukovaného napätia U_i (1.3).

$$F_1(p) = \frac{I_a}{U_a - U_i} = \frac{1}{R_a + p \cdot L_a} = \frac{1/R_a}{1 + p \frac{L_a}{R_a}} = \frac{1/R_a}{1 + pT_a} \quad (1.3)$$

Prenos $F_2(p)$ udáva zmenu krútiaceho momentu motora M pri zmene prúdu prechádzajúceho kotvou I_a (1.4):

$$F_2(p) = \frac{M}{I_a} = c\Phi \quad (1.4)$$

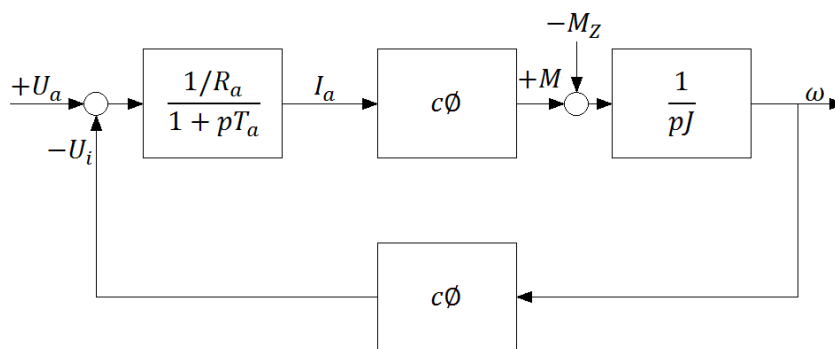
Prenos $F_3(p)$ udáva zmenu otáčok motora ω pri zmene rozdielu krútiaceho momentu motora M a záťažného krútiaceho momentu M_Z pri zanedbaní viskózneho trenia (1.5):

$$F_3(p) = \frac{\omega}{M - M_Z} = \frac{1}{pJ} \quad (1.5)$$

Prenos $F_4(p)$ udáva zmenu indukovaného napätia U_i pri zmene otáčok motora ω (1.6):

$$F_4(p) = \frac{U_i}{\omega} = c\Phi \quad (1.6)$$

Po spojení všetkých štyroch prenosových funkcií motora vznikne bloková schéma matematického modelu jednosmerného motora (Obr. 1.6). Matematický model BLDC motora je zhodný s matematickým modelom jednosmerného motora, ale treba počítať s tým, že pri BLDC motore sú zopnuté vždy dve fázy. To znamená, že odpor R_a , indukčnosť L_a a konštanta motora $c\Phi$ sú počítané vždy pre obe fázy motora.



Obr. 1.6 Bloková schéma matematického modelu jednosmerného motora, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

1.3.2 Podriadená prúdová regulácia

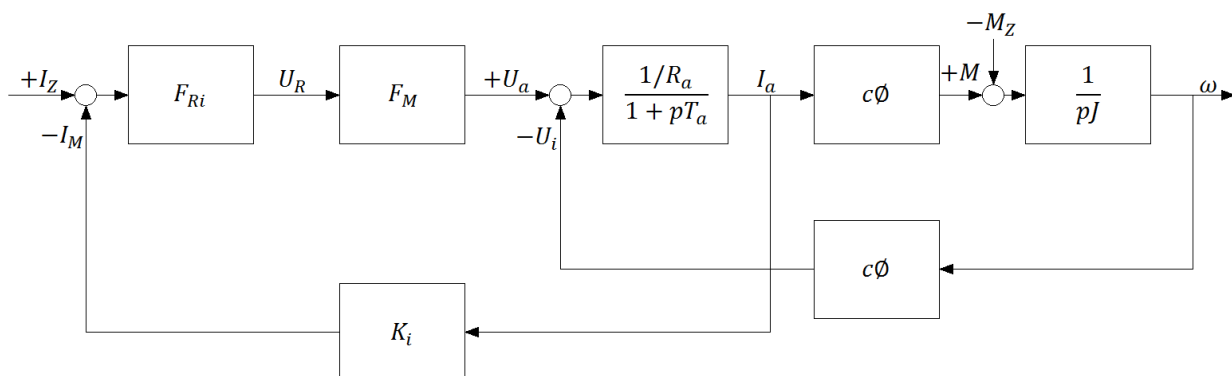
Najoptimálnejšia regulácia je kaskádna regulácia s nadriadenou otáčkovou slučkou a s podriadenou prúdovou slučkou. Na začiatku riešenia podriadenej prúdovej slučky treba doplniť do blokovej schémy bloky reprezentujúce prenos regulátora prúdu F_{Ri} , prenos meniča F_M a prenos snímača prúdu F_i (Obr. 1.7). Prenos meniča F_M udáva zmenu napätia kotvy motora U_a pri zmene riadiaceho napätia U_R (1.7). Prenos je reprezentovaný proporciálnym zosilnením K_M a dopravným oneskorením, ktoré je reprezentované exponenciálnou funkciou s časovou konštantou meniča τ_M . Exponenciálna funkcia môže byť nahradená mocninovým rádom, a pri zanedbaných všetkých členov, okrem prvých dvoch, vzniká prenosová funkcia prvého rádu s časovou konštantou meniča τ_M . Časová konštanta meniča τ_M predstavuje strednú hodnotu spínacej periódy meniča (1.8).

$$F_M(p) = \frac{U_a}{U_R} = K_M \cdot e^{-p\tau_M} \cong \frac{K_M}{1 + p\tau_M} \quad (1.7)$$

$$\tau_M = \frac{T_{PWM}}{2} = \frac{1}{2f_{PWM}} \quad (1.8)$$

Prenos snímača prúdu F_i je reprezentovaný prenosovou funkciou prvého rádu s proporciálnym zosilnením K_i a s časovou konštantou τ_i (1.9). Pri veľmi rýchlych snímačoch prúdu, kde je časová konštanta snímača prúdu τ_i omnoho väčšia ako časová konštanta meniča τ_M je možné zanedbať časovú konštantu snímača prúdu τ_i .

$$F_i(p) = \frac{K_i}{1 + p\tau_i} \quad (1.9)$$

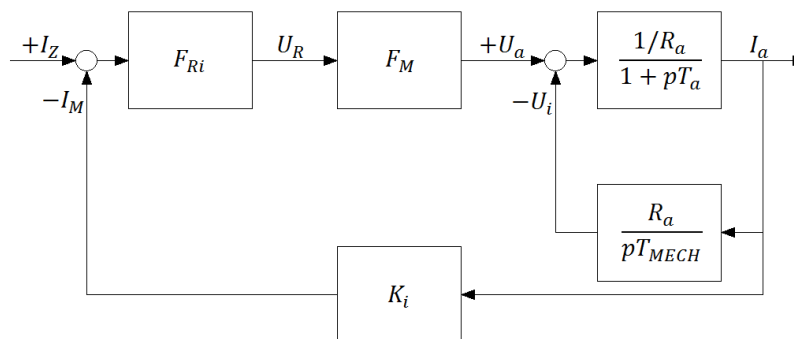


Obr. 1.7 Bloková schéma matematického modelu jednosmerného motora s podriadenou prúdovou regulačnou slučkou, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

Aby sa mohlo pokračovať vo výpočtoch je treba odstrániť skríženie spätných väzieb. Po odstránení vznikne bloková schéma (Obr. 1.8). V blokovej schéme vznikne vnorená spätná väzba, ktorá predstavuje zmenu indukovaného napätia U_i pri zmene prúdu v kotve motora I_a (1.10). Prenos F_5 je reprezentovaný integračným členom so zosilnením R_a a s mechanickou časovou konštantou T_{MECH} . Mechanická časová konštanta T_{MECH} sa vypočíta podľa vzorca (1.11). Pri predpoklade, že mechanická časová konštanta T_{MECH} je omnoho väčšia ako elektrická časová konštanta motora T_a , je možné zanedbať prenos F_5 a zjednodušiť tak podriadenú prúdovú slučku na prenos s jednou spätnou väzbou.

$$F_5(p) = \frac{U_i}{I_a} = \frac{R_a}{pT_{MECH}} \quad (1.10)$$

$$T_{MECH} = \frac{J \cdot R_a}{(c\Phi)^2} \quad (1.11)$$



Obr. 1.8 Bloková schéma podriadenej prúdovej slučky po odstránení skrížených spätných väzieb, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

Výpočet prenosu regulátora prúdu sa robí pomocou vzorca (1.12). Prenos sústavy podriadenej prúdovej slučky F_{Si} sa vypočíta ako súčin prenosu meniča F_M , prenosu motora F_I a prenosu snímača prúdu reprezentovaného proporcionálnym zosilnením K_i (1.13). Prenos metódy štandardného prenosu F_O sa volí podľa toho, či je sústava statická (neintegračná) alebo astatická (integračná). Sústava podriadenej prúdovej slučky je statická, a preto sa zvolila metóda optimálneho modulu s prenosom podľa vzorca (1.14). Súčtová časová konštanta τ_Σ sa volí ako najmenšia časová konštanta v sústave. V prípade podriadenej prúdovej slučky je súčtová časová konštanta rovná časovej konstante meniča $\tau_\Sigma = \tau_M$. Výsledný prenos regulátora prúdu sa rovná (1.15).

$$F_{Ri}(p) = F_o(p) \cdot \frac{1}{F_{Si}(p)} \quad (1.12)$$

$$F_{Si}(p) = F_M(p) \cdot F_1(p) \cdot K_i = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} \cdot \frac{1/R_a}{1 + pT_a} \cdot K_i \quad (1.13)$$

$$F_o(p) = \frac{1}{2\tau_\Sigma p(1 + \tau_\Sigma p)} \quad (1.14)$$

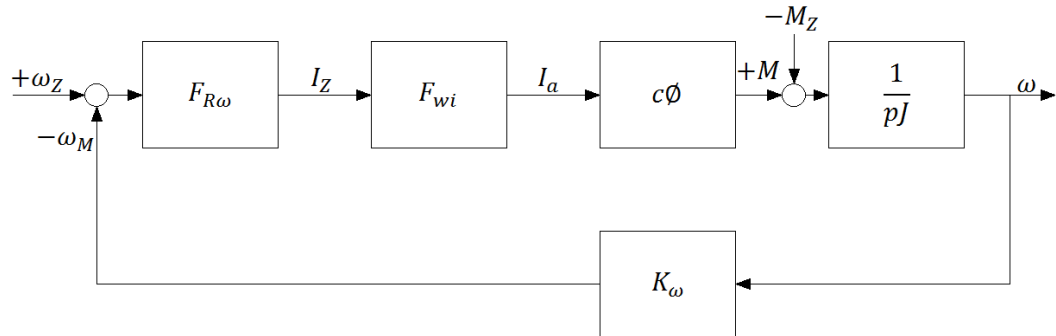
$$F_{Ri}(p) = \frac{1}{2\tau_M p(1 + p\tau_M)} \cdot \frac{(1 + p\tau_M) \cdot (1 + pT_a)}{K_M \cdot \frac{1}{R_a} \cdot K_i} = \frac{(1 + pT_a)}{2\tau_M p \cdot K_M \cdot \frac{1}{R_a} \cdot K_i} \quad (1.15)$$

1.3.3 Nadriadená otáčková regulácia

Pri tvorbe blokovej schémy nadriadenej otáčkovej slučky je potrebné k prenosu uzavretej podriadenej prúdovej slučky F_{wi} pridať prenos regulátora otáčok $F_{R\omega}$, druhú prenosovú funkciu motora F_2 , tretiu prenosovú funkciu motora F_3 a prenos snímača otáčok F_ω (Obr. 1.9). Prenos uzavretej podriadenej prúdovej slučky F_{wi} je rovný prenosovej funkcii druhého rádu. Pri zanedbaní posledného člena, vznikne prenosová funkcia prvého rádu so zosilnením $1/K_i$ a s časovou konštantou $2\tau_M$ (1.16). Prenos snímača otáčok F_ω je reprezentovaný prenosovou funkciou prvého rádu s proporcionálnym zosilnením K_ω a s časovou konštantou τ_ω . Pri veľmi rýchlych snímačoch otáčok, kde je časová konštanta snímača otáčok τ_ω omnoho väčšia ako časová konštanta meniča τ_M , je možné zanedbať časovú konštantu snímača otáčok τ_ω (1.17).

$$F_{wi}(p) = \frac{1/K_i}{1 + 2p\tau_M + 2p^2\tau_M^2} \cong \frac{1/K_i}{1 + 2p\tau_M} \quad (1.16)$$

$$F_\omega(p) = \frac{K_\omega}{1 + p\tau_\omega} \quad (1.17)$$



Obr. 1.9 Bloková schéma nadriadenej otáčkovej slučky, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

Výpočet prenosu regulátora otáčok sa robí pomocou vzorca (1.18). Prenos sústavy nadriadenej otáčkovej slučky $F_{S\omega}$ sa vypočíta ako súčin prenosu uzavretej podriadenej prúdovej slučky F_{wi} , druhej prenosovej funkcie motora F_2 , tretej prenosovej funkcie motora F_3 a prenosu snímača otáčok reprezentovaného proporcionálnym zosilnením K_ω (1.19). Sústava nadriadenej otáčkovej slučky je astatická, a preto sa zvolila metóda symetrického optima s prenosom podľa vzorca (1.20). Súčtová časová konštanta τ_Σ sa volí ako najmenšia časová konštanta v sústave. V prípade nadriadenej otáčkovej slučky je súčtová časová konštanta rovná dvojnásobku časovej konstante meniča $\tau_\Sigma = 2\tau_M$. Výsledný prenos regulátora otáčok sa rovná (1.21).

$$F_{R\omega}(p) = F_O(p) \cdot \frac{1}{F_{S\omega}(p)} \quad (1.18)$$

$$F_{S\omega}(p) = F_{wi}(p) \cdot F_2(p) \cdot F_3(p) \cdot K_\omega = \frac{1/K_i}{1 + 2p\tau_M} \cdot \frac{c\Phi}{pJ} \cdot K_\omega \quad (1.19)$$

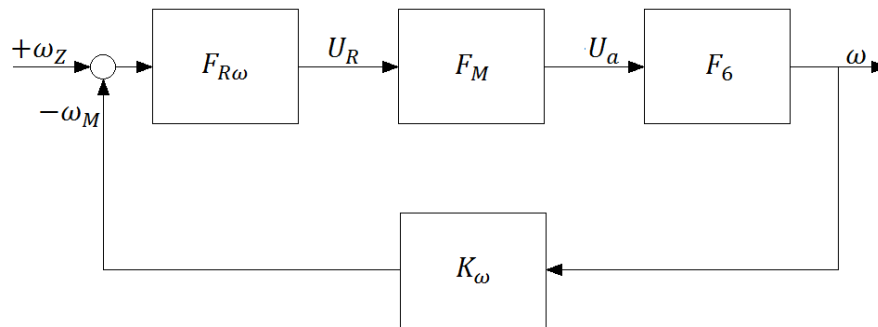
$$F_O(p) = \frac{4\tau_\Sigma p + 1}{8\tau_\Sigma^2 p^2 (1 + \tau_\Sigma p)} \quad (1.20)$$

$$F_{R\omega}(p) = \frac{4 \cdot 2\tau_M p + 1}{8 \cdot 4\tau_M^2 p^2 (1 + 2\tau_M p)} \cdot \frac{(1 + 2\tau_M p) \cdot K_i \cdot pJ}{c\Phi \cdot K_\omega} = \frac{(8\tau_M p + 1)}{32\tau_M^2 p \cdot \frac{c\Phi}{J} \cdot \frac{K_\omega}{K_i}} \quad (1.21)$$

1.3.4 Otáčková regulácia s paralelným prúdovým obmedzením

Druhým typom regulácie môže byť otáčková regulácia bez podriadenej prúdovej slučky. V tomto prípade je potrebné zabezpečiť paralelné prúdové obmedzenie maximálneho prúdu pomocou regulátora prúdu, ktorý bude reagovať iba na nadprúdy. Pri normálnej prevádzke je prúdový regulátor nečinný. Bloková schéma takejto regulačnej slučky sa skladá z prenosu regulátora otáčok $F_{R\omega}$, prenosu meniča F_M , prenosu snímača otáčok, ktorý je reprezentovaný proporcionálnym zosilnením K_ω a z prenosu motora F_6 (Obr. 1.10). Prenos motora F_6 sa vypočíta podľa vzorca (1.22). Menovateľ prenosovej funkcie motora F_6 sa ďalej dá rozložiť na súčin dvoch časových konštánt τ_1 a τ_2 .

$$F_6(p) = \frac{1/c\Phi}{1 + pT_{MECH} + p^2T_{MECH}T_a} = \frac{1/c\Phi}{(1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_2)} \quad (1.22)$$



Obr. 1.10 Bloková schéma otáčkovej slučky bez prúdovej regulácie, prevzaté z literatúry [2], upravené autorom

Výpočet prenosu regulátora otáčok sa robí pomocou vzorca (1.18). Prenos sústavy otáčkovej slučky $F_{S\omega}$ sa vypočíta ako súčin prenosu meniča F_M , šiestej prenosovej funkcie motora F_6 a prenosu snímača otáčok reprezentovaného proporcionálnym zosilnením K_ω (1.23). Sústava otáčkovej slučky je statická, a preto sa zvolila metóda optimálneho modulu s prenosom podľa vzorca (1.14). V prípade otáčkovej slučky je súčtová časová konštanta rovná časovej konstante meniča $\tau_\Sigma = \tau_M$. Výsledný prenos regulátora otáčok sa rovná (1.24).

$$F_{S\omega}(p) = F_M(p) \cdot F_6(p) \cdot K_\omega = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} \cdot \frac{1/c\Phi}{(1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_2)} \cdot K_\omega \quad (1.23)$$

$$F_{R\omega}(p) = \frac{1}{2\tau_M p(1 + p\tau_M)} \cdot \frac{(1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_1)}{K_M \cdot \frac{1}{c\Phi} \cdot K_\omega} = \frac{(1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_2)}{2\tau_M p \cdot K_M \cdot \frac{1}{c\Phi} \cdot K_\omega} \quad (1.24)$$

1.4 Porovnanie s ostatnými motormi

Pri porovnaní BLDC motora a jednosmerného motora má podľa literatúry [8] BLDC motor tieto výhody:

- Bezkartáčová komutácia
- Menej potrebná údržba
- Dlhšia životnosť
- Menšie trenie pri vysokých otáčkach
- Vyššia účinnosť
- Lepší odvod tepla z vinutia
- Väčší pomer výkon/ objem
- Menšia zotrvačnosť rotora
- Lepšie dynamické vlastnosti
- Väčší rozsah otáčok
- Menšie elektrické rušenie

BLDC motor má oproti jednosmernému motoru tieto nevýhody:

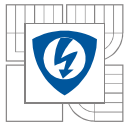
- Nutnosť elektrického komutátora s Hallovými snímačmi
- Zložitejšie riadenie
- Vyššia cena

Pri porovnaní BLDC motora a asynchrónneho motora má podľa literatúry [8] BLDC motor tieto výhody:

- Lineárna momentová charakteristika
- Väčší pomer výkon/ objem
- Menšia zotrvačnosť rotora
- Lepšie dynamické vlastnosti
- Rozbehový prúd sa rovná menovitému
- Neexistuje sklz medzi rotorom a statorom

BLDC motor má oproti asynchrónnemu motoru tieto nevýhody:

- Nutnosť elektrického komutátora s Hallovými snímačmi



Pri porovnaní BLDC motora a synchronného motora má podľa literatúry [8] BLDC motor tieto výhody:

- Jednoduchšie riadenie
- Nižšia cena
- Menšie spínacie straty v meniči

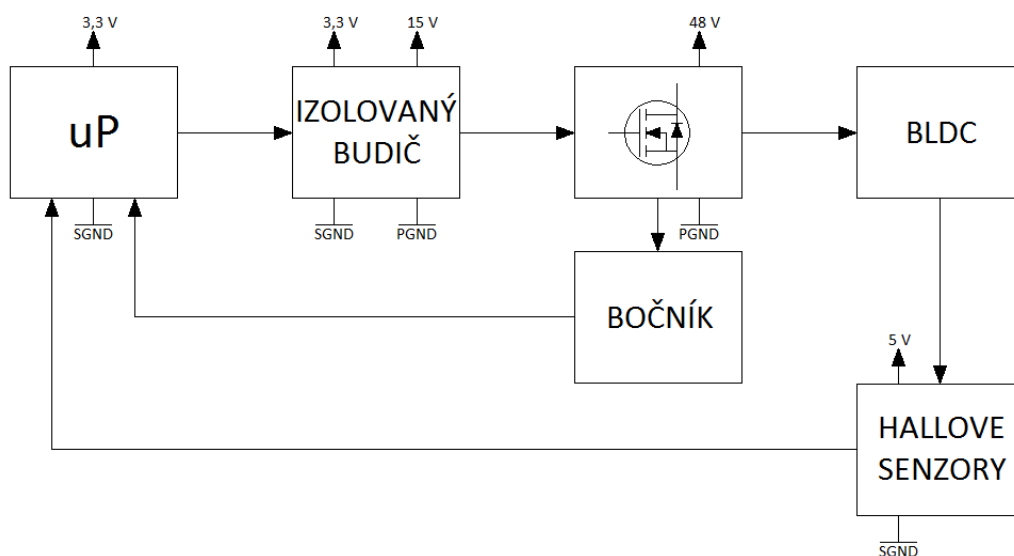
BLDC motor má oproti synchronnému motoru tieto nevýhody:

- Momentové pulzácie
- Horšia rovnomernosť otáčania
- Viac harmonických zložiek
- Väčšie straty v železe

2 SCHÉMA ZAPOJENIA

Popis schémy zapojenia sa začne popisom blokovej schémy pohonu BLDC motora (Obr. 2.1). BLDC motor je napájaný trojfázovým tranzistorovým meničom s napäťovým medziobvodom. Každý tranzistor v meniči má svoj vlastný izolovaný budič, ktorý zabezpečuje bezporuchové spínanie. Digitálny signálový procesor (skr. DSP) je základným riadiacim a regulačným členom pohonu. Dostáva spätnoväzobné signály z prúdového bočníka a z Hallových snímačov a na základe vopred naprogramovaného algoritmu vytvára správny sled impulzov pre budiče tranzistorov.

Každý blok z blokovej schémy potrebuje svoje napájanie. Napäťový medziobvod je napájaný napätím, ktoré sa rovná napájaciemu napätiu BLDC motora $U_N = 48 \text{ V}$. Digitálny signálový procesor pre svoj chod potrebuje napájacie napätie $U = 3,3 \text{ V}$. Izolované budiče pomyselne rozdeľujú signálovú zem SGND (z angl. Signal Ground) od výkonovej zeme PGND (z angl. Power Ground). Z procesorovej strany sú napájané rovnakým napájacím napätím ako procesor $U = 3,3 \text{ V}$, aby sa zachovala logická úroveň signálov. Z tranzistorovej časti sú napájané napätím $U = 15 \text{ V}$, aby optimálne spínali MOS-FET tranzistory (z angl. Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor, t.j. pol'om riadený tranzistor so štruktúrou kov-oxid-polovodič). Hallové snímače, ktoré slúžia na snímanie polohy rotora BLDC motora, potrebujú pre svoju činnosť napájacie napätie $U = 5 \text{ V}$. Všetky spomínané napájacie napätia musia byť dodávané z optimálne navrhnutých zdrojov napätia.

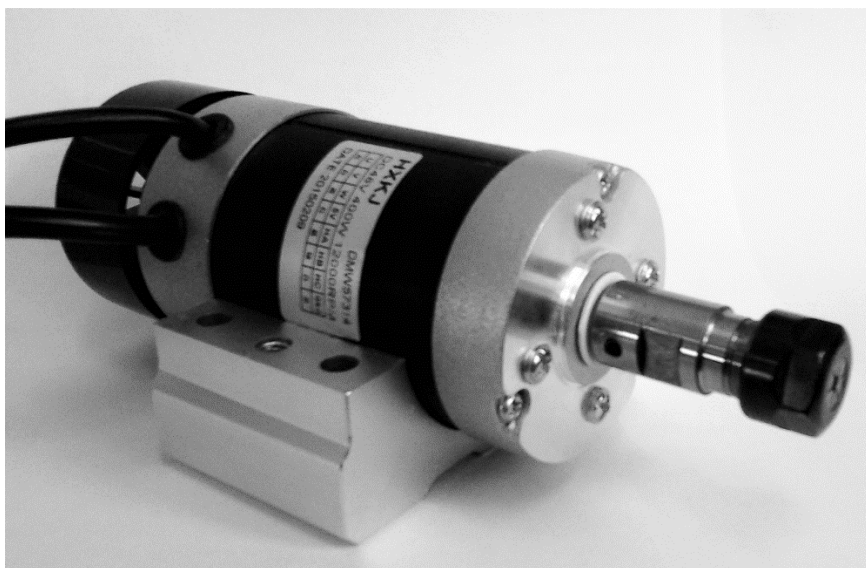


Obr. 2.1 Bloková schéma zapojenia pohonu BLDC motora

2.1 BLDC motor

Pre vysokootáčkový pohon sa zvolil BLDC motor typu HXKJ DMW57314 (Obr. 2.2). Motor je usposobený pre vretená obrábacích strojov. Na hriadeli má upínacie klieštiny ER11, ktoré môžu upínať obrábacie nástroje. Pri vhodne zvolenom obrábacom nástroji je možné obrábať kovové aj nekovové materiály. Motor aj pri vysokých otáčkach dosahuje veľmi malú odchýľku vyosenia hriadeľa, čo zabezpečuje veľmi presné obrábanie materiálu. Motor má na hriadeli upevnený ventilátor, ktorý zabezpečuje nepretržitú prevádzku vretena bez rizika prehriatia. Hallové snímače, ktoré slúžia na meranie polohy rotora BLDC motora, sú aj s potrebnou elektronikou umiestnené na hriadeli motora. Pre svoj chod potrebujú napájacie napätie $U = 5\text{ V}$. Výstup elektroniky tvoria tranzistory s otvorenými kolektormi, preto je pre získanie informácie o polohe nutné zapojiť rezistory medzi každý výstup a napájacie napätie. Parametre motora sú:

- menovité napájacie napätie $U_N = 48\text{ V}$
- menovitý prúd $I_N = 10\text{ A}$
- menovitý výkon $P_N = 400\text{ W}$
- špičkový výkon $P_{MAX} = 500\text{ W}$
- menovité otáčky $n_N = 12000\text{ ot./min}$
- opakovateľná presnosť $\delta = 0,01 - 0,03\text{ mm}$
- priemer upínacej klieštiny $\varnothing = 3,175\text{ mm}$



Obr. 2.2 BLDC motor typu HXKJ DMW57314

2.2 Trojfázový tranzistorový menič

BLDC motor je napájaný pomocou trojfázového tranzistorového meniča (Obr. 2.3). Ako tranzistory v moste sa použili MOS-FET tranzistory typu IRF540N. Z katalóga výrobcu [6] sa zistili údaje tranzistora:

- prieražné napätie prechodu Drain-Source $U_{(BR)DDS} = 100 \text{ V}$
- statický odpor zopnutého prechodu Drain-Source $R_{DS(on)} = 44 \text{ m}\Omega$
- trvalý prúd cez prechod Drain-Source $I_D = 33 \text{ A}$
- prahové napätie prechodu Gate-Source $U_{GS(th)} = 2 - 4 \text{ V}$
- doba oneskorenia zapnutia $t_{d(on)} = 11 \text{ ns}$
- nábežná doba $t_r = 35 \text{ ns}$
- doba oneskorenia vypnutia $t_{d(off)} = 39 \text{ ns}$
- dobežná doba $t_f = 35 \text{ ns}$

Pre zníženie strát v meniči sa na miesto parazitnej diódy MOS-FET tranzistorov využíva paralelne zapojená Schottkyho dióda MBR20150. Z katalóga výrobcu [4] sa zistili údaje diódy:

- maximálna hodnota opakovateľného záverného napätia $U_{RRM} = 150 \text{ V}$
- stredná hodnota výstupného prúdu cez púzdro $I_O = 20 \text{ A}$
- úbytok napätia na dióde v priepustnom smere $U_F = 0,9 \text{ V}$

Pri zisťovaní strát trojfázového tranzistorového meniča sa vychádza z výpočtov jednotlivých strát na tranzistore a dióde. Výpočet strát v tranzistore spôsobených prechodom prúdu sa uskutočňuje pomocou vzorca (2.1) Efektívnu hodnotu prúdu prechádzajúceho jedným tranzistorom získame zo znalosti prepínania tranzistorov počas jednej elektrickej otáčky. Z tabuľky prepínania tranzistorov (Tab. 1.1) vyplýva, že jedným tranzistorom prechádza prúd len tretinu periódy, preto sa vo výpočtoch zvolila strieda $s = 1/3$. Maximálny prúd, ktorý bude prechádzať tranzistorom je menovitým prúdom motora pri maximálnej záťaži. Prepínacie straty tranzistora sa vypočítajú pomocou empiricky získaného vzorca, keď sú známe priebehy zapínania a vypínania tranzistora (2.2). Celkové straty jedného tranzistora sa získajú súčtom strát spôsobených prechodom prúdu a strát prepínacích (2.3). Stratový výkon Schottkyho diódy je tvorený len prechádzajúcim prúdom. Z fyzikálnych vlastností prechodu kov-polovodič je známe, že Schottkyho diódy majú zanedbateľný zotavovací čas, a tým aj zotavovací náboj. Straty v jednej dióde sa vypočítajú podľa vzorca (2.4). Z tabuľky prepínania tranzistorov (Tab. 1.1) vyplýva, že jednou diódou prechádza prúd len šestinou periódy, preto sa vo výpočtoch zvolila strieda $s = 1/6$. Pri výpočte celkových strát trojfázového meniča sa vychádza z tabuľky prepínania tranzistorov (Tab. 1.1), kde je zrejmé, že naraz pracujú dva tranzistory a jedna dióda (2.5).

$$P_{STR,t(on)} = R_{DS(on)} \cdot I_{RMS}^2 = R_{DS(on)} \cdot (I_N \cdot \sqrt{s})^2 = 0,044 \cdot \left(10 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}}\right)^2 = 1,466 \text{ W} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} P_{STR,t(pr)} &\cong \frac{1}{3} \cdot f_{PWM} \cdot U_N \cdot I_N \cdot (t_{d(on)} + t_r + t_{d(off)} + t_f) \\ &= \frac{1}{3} \cdot 22500 \cdot 48 \cdot 10 \cdot (11 + 35 + 39 + 35) \cdot 10^{-9} = 0,432 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$P_{STR,t} = P_{STR,t(on)} + P_{STR,t(pr)} = 1,466 + 0,432 = 1,898 \text{ W} \quad (2.3)$$

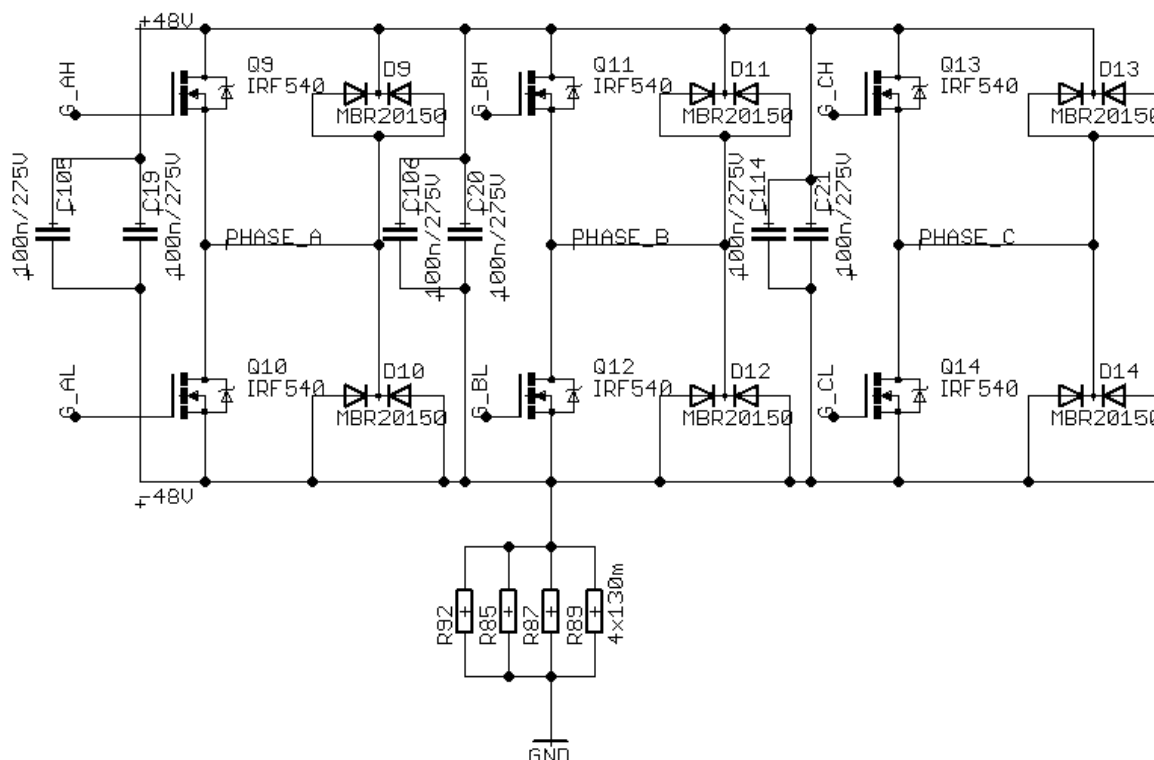
$$P_{STR,d0} = U_F \cdot I_{AV} = U_F \cdot I_N \cdot s = 0,9 \cdot 10 \cdot \frac{1}{6} = 1,5 \text{ W} \quad (2.4)$$

$$P_{STR} = 2 \cdot P_{STR,t} + P_{STR,d0} = 2 \cdot 1,898 + 1,5 = 5,296 \text{ W} \quad (2.5)$$

Trojfázový tranzistorový most je napájaný napäťovým medziobvodom tvoreným batériou elektrolytických kondenzátorov. Napäťový medziobvod je napájaný externým zdrojom jednosmerného napätia s menovitou hodnotou $U_N = 48 \text{ V}$. Pre maximálne zníženie parazitnej indukčnosti vetvy trojfázového meniča, tvorenej dvojicami tranzistor-dióda, sa geometricky čo najbližšie ku každej dvojici tranzistor-dióda paralelne pripojil impulzný bezindukčný fóliový kondenzátor.

Medzi napäťovým medziobvodom a trojfázovým tranzistorovým mostom je zapojený bočník na snímanie prúdu. Bočník je tvorený štyrmi paralelne zapojenými rezistormi s menovitou hodnotou odporu $R = 130 \text{ m}\Omega$ a s maximálnym výkonom $P_{MAX} = 1 \text{ W}$. Celkový odpor bočníka je $R_b = 32,5 \text{ m}\Omega$ a celkový maximálny výkon bočníka je $P_{MAX,b} = 4 \text{ W}$. Hodnota odporu bočníka je zvolená kompromisom medzi minimálnou hodnotou úbytku napätia na bočníku, ktorú dokáže snímať operačný zosilňovač a medzi maximálnym stratovým výkonom spôsobeným prechodom menovitého prúdu motora. Maximálny stratový výkon na bočníku spôsobený prechodom prúdu sa vypočíta podľa vzorca (2.6) Z výpočtu vyplýva, že odpory v bočníku vydržia prúdové zaťaženie.

$$P_{STR} = R_b \cdot I_N^2 = 0,0325 \cdot 10^2 = 3,25 \text{ W} \quad (2.6)$$



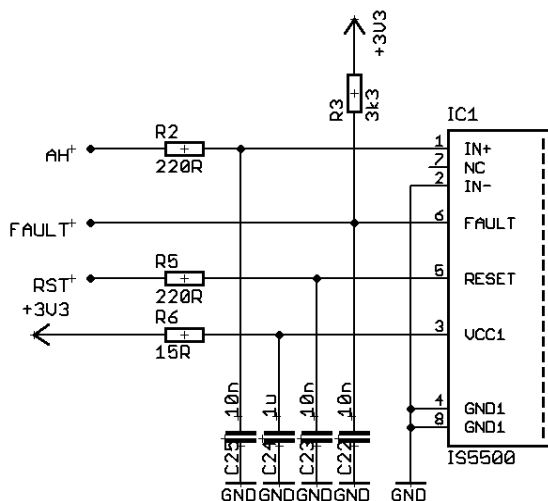
Obr. 2.3 Schéma zapojenia trojfázového tranzistorového meniča

2.3 Budiče

Ako budiče tranzistorov sa použilo šesť integrovaných obvodov typu ISO5500. Integrovaný obvod je určený pre galvanicky oddelené budenie MOS-FET tranzistorov a IGBT tranzistorov (z angl. Insulated-Gate Bipolar Transistor, t.j. bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom). Z katalóga výrobcu [12] sa zistili údaje integrovaného obvodu:

- rozsah vstupného napájacieho napätia $U_{CC1} = 3 - 5,5 \text{ V}$
- rozsah výstupného napájacieho napätia $U_{OUT} = 15 - 30 \text{ V}$
- maximálny výstupný prúd $I_{OUT} = 2,5 \text{ A}$
- prahové napätie podpäťovej ochrany pri náraste napätia $U_{IT+(UVLO)} = 12,3 \text{ V}$
- prahové napätie podpäťovej ochrany pri poklese napätia $U_{IT-(UVLO)} = 11,1 \text{ V}$
- prahové napätie saturačnej ochrany $U_{DSTH} = 7,2 \text{ V}$

Zapojenie procesorovej časti jedného budiča je vidieť na obrázku (Obr. 2.4). Vstupná časť budiča je napájaná rovnakým napätím ako je napájaný DSP procesor $U_N = 3,3 \text{ V}$. Tým je zachovaná rovnaká úroveň logických signálov na vstupe. Napájanie je k budiču privádzané cez RC člen s hornou medznou frekvenciou $f_H = 10600 \text{ Hz}$. Vstupný logický signál IN+ a resetovací signál RESET je do budiča privádzaný cez RC člen s hornou medznou frekvenciou $f_H = 72343 \text{ Hz}$. Na procesorovej strane budiča sa nachádza aj výstupný pin FAULT, ktorý indikuje zareagovanie saturačnej ochrany. Pin má výstup tvorený tranzistorom s otvoreným kolektorom a je aktívny v nule, preto je možné zapojiť všetkých šesť pinov FAULT zo všetkých budičov paralelne k jednému rezistoru, ktorý bude zapojený medzi výstupy a napájacie napätie. Tým sa zabezpečí logická operácia AND.

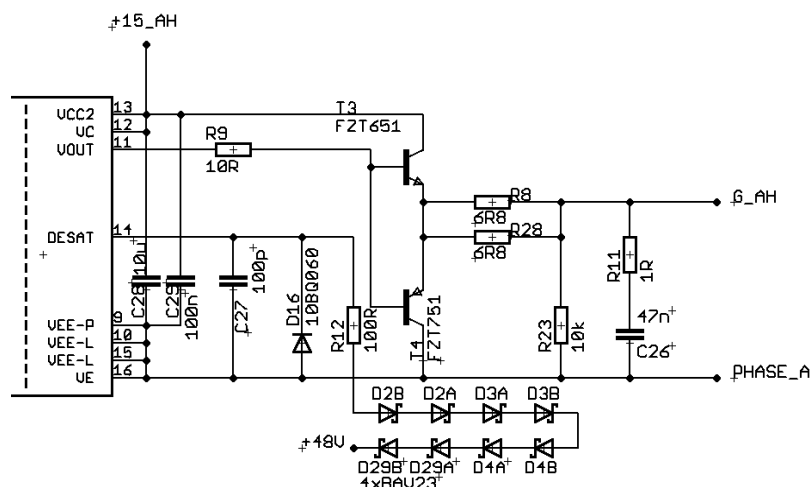


Obr. 2.4 Schéma zapojenia procesorovej časti budiča

Zapojenie výkonovej časti jedného budiča je vidieť na obrázku (Obr. 2.5). Výstupná časť budiča je napájaná izolovaným napätím s hodnotou $U_N = 15 \text{ V}$. Každý budič má zvlášť izolované napätie výstupnej časti, aby sa optimálne zapínali tranzistory vo vetve trojfázového meniča. Výstup budiča VOUT je prúdovo posilnený dvojčinným emitorovým sledovačom s tranzistormi FZT651 a FZT751. Ako odpor do hradla Gate MOS-FET tranzistora sa použili dva paralelne zapojené rezistory s hodnotou odporu $R = 6,8 \Omega$ a s maximálnym výkonom $P_{MAX} = 1 \text{ W}$. Pre zabezpečenie optimálneho vypnutia MOS-FET tranzistora pri nečinnosti dvojčinného emitorového sledovača sa medzi hradlo Gate a Source zapojil odpor s hodnotou $R = 10 \text{ k}\Omega$. Sériové spojenie rezistora a kondenzátora medzi hradlom Gate a Source zamedzuje kmitaniu signálu pre hradlo Gate. Saturačná ochrana budiča má prahové napätie $U_{DSTH} = 7,2 \text{ V}$. Drain MOS-FET tranzistora je zapojený cez osem sériovo zapojených diód k vstupu saturačnej ochrany budiča DESAT. Zvolili sa diódy typu BAV23, kde sú dve diódy v jednom púzde, čo ušetrí miesto na doske plošných spojov. Z katalóga výrobcu diód [9] sa zistilo prahové napätie diód $U_F = 0,7 \text{ V}$. Výpočet saturačného napätia MOS-FET tranzistora, pri ktorom zareaguje saturačná ochrana, sa robí podľa vzorca (2.7). Z katalóga výrobcu tranzistorov [6] sa zistil maximálny prúd cez prechod Drain-Source, ktorému zodpovedá maximálne saturačné napätie MOS-FET tranzistora. Hodnota maximálneho prúdu sa pohybuje vplyvom teploty v rozsahu $I_{D-FAULT} = 20 - 30 \text{ A}$. Tým je zabezpečené, že saturačná ochrana zareaguje skôr ako sa zničí MOS-FET transistor a nezareaguje pri normálnej prevádzke trojfázového meniča. Pri zareagovaní saturačnej ochrany budič mätko vypína tranzistor a informuje o tom pomocou pinu FAULT. Pre opätovné spustenie budiča po poruche je treba resetovanie pomocou pinu RESET, ktorý je aktívny v nule. Budič obsahuje aj podpäťovú ochranu s hysteréziou. Pri tejto ochrane budič tvrdo vypne MOS-FET tranzistor a pin FAULT sa nestane aktívnym. Pre opätovné zapnutie budiča stačí, aby napájacie napätie bolo väčšie ako vrchné prahové napätie podpäťovej ochrany.

$$U_{DS-FAULT(th)} = U_{DSTH} - n \cdot U_F = 7,2 - 8 \cdot 0,7 = 1,6 \text{ V}$$

(2.7)



Obr. 2.5 Schéma zapojenia tranzistorovej časti meniča

2.4 Digitálny signálový procesor

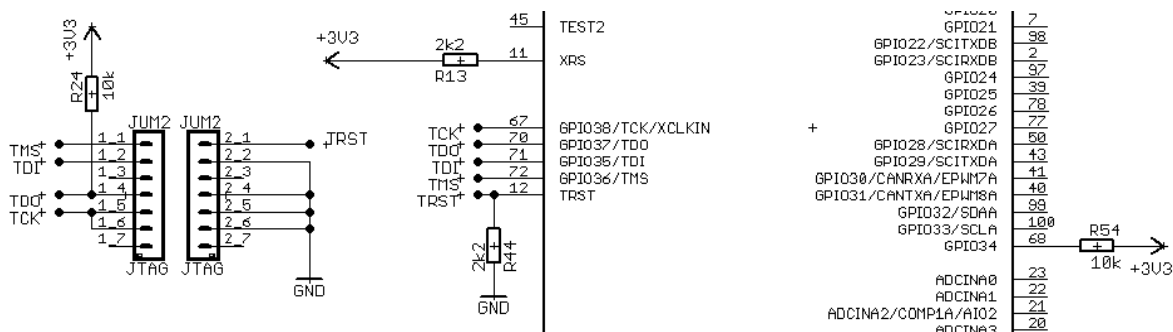
Ako hlavný riadiaci a regulačný člen je použitý 32-bitový DSP procesor typu TMS320F28069. Z katalóga výrobcu [14] sa zistili základné údaje DSP procesora:

- integrovaný oscilátor s frekvenciou $f = 90$ MHz
- jednotka výpočtov s číslami s pohyblivou desatinnou čiarkou
- PWM modulátory s vysokým rozlíšením
- čítače a časovače s vysokým rozlíšením
- 12-bitové ADC prevodníky (z angl. Analog-to-Digital Converter, t.j. analógovo-digitálny prevodník)
- JTAG (z angl. Joint Test Action Group, t.j. spoločná testovacia a akčná skupina) pre testovanie a programovanie

Medzi výhody využitia tohoto DSP procesora patrí aj veľká podpora od výrobcu vo forme aplikačných dokumentov a vopred naprogramovaných knižníc pre riadenie a reguláciu motorov. Za pomoci týchto knižníc sa bude programovať DSP procesor pre riadenie a reguláciu BLDC motora.

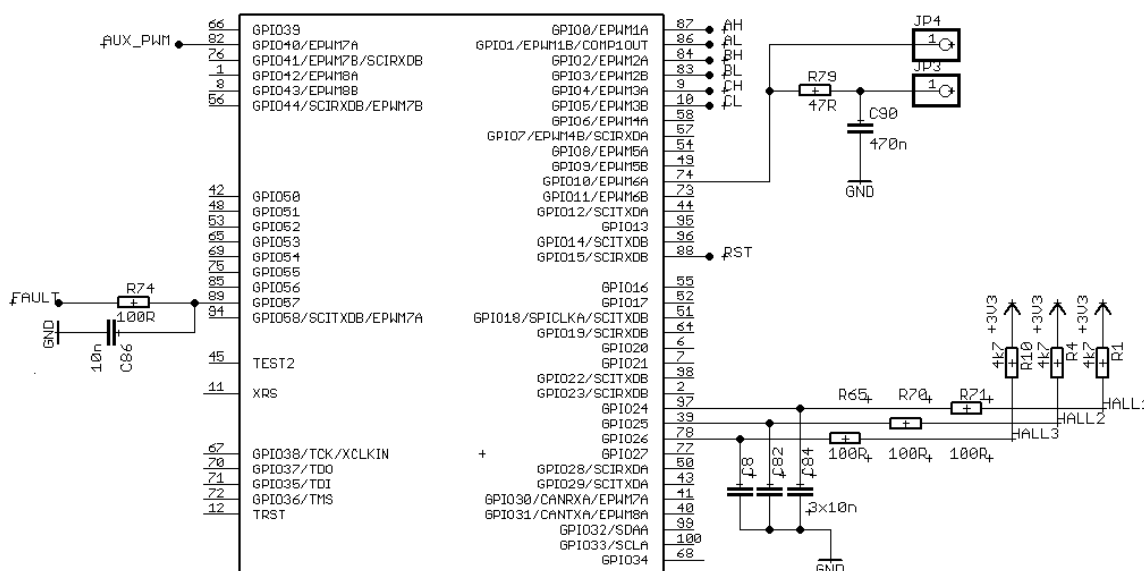
Schéma napájacích pinov DSP procesora je zobrazená na obrázku (Obr. 2.6). Piny VDDIO slúžia na napájanie digitálnych periférií a na napájanie pamäti Flash. Pin VDDA slúži na napájanie analógovej časti procesora. Všetky tieto piny sú zapojené na napájanie s hodnotou napätia $U = 3,3$ V cez LC-člen s hodnotou indukčnosti $L = 1,8$ μ H a s hodnotou kapacity $C = 1$ nF. Ako zem digitálnych periférií procesora slúžia piny VSS a ako zem analógových periférií slúži pin VSSA. Pri uzemnení pinu VREGGENZ sa aktivuje vnútorný regulátor napätia o hodnote $U = 1,8$ V, ktorý slúži pre napájanie logických jednotiek DSP procesora.

Schéma zapojenia programovacích pinov DSP procesora je zobrazená na obrázku (Obr. 2.7). Programovacie piny TCK, TDO, TDI, TMS a TRST sú priamo vyvedené na programovací konektor. Pre správnu funkciu JTAG programovania je potrebné zapojiť rezistor s hodnotou odporu $R = 10 \text{ k}\Omega$ medzi pin TDO a napájacie napätie a je potrebné zapojiť rezistor s hodnotou odporu $R = 2,2 \text{ k}\Omega$ medzi pin TRST a zem. Pre správnu funkciu resetovania DSP procesora je nutné zapojiť rezistor s hodnotou odporu $R = 2,2 - 10 \text{ k}\Omega$ medzi pin XRS a napájacie napätie a rezistor s hodnotou odporu $R = 10 \text{ k}\Omega$ medzi pin GPIO34 a napájacie napätie.



Obr. 2.7 Schéma zapojenia programovacích pinov DSP procesora

Vstupný signál, ktorý vstupuje do procesora je signál FAULT, ktorý vytvárajú všetky budiče tranzistorov. Pred vstupom do pinu GPIO57 je filtrovaný pomocou RC-člena s hornou medznou frekvenciou $f_H = 160$ kHz. Ďalšími vstupmi sú signály z Hallových snímačov z BLDC motora. Pre správnu funkciu su na výstupe snímačov zapojené rezistory medzi výstupom a napájacím napätím. Signály sa následne filtrujú pomocou RC-členov s hornou medznou frekvenciou $f_H = 160$ kHz a vstupujú do pinov GPIO24 – GPIO26. Pin GPIO24 obsahuje aj časovač, ktorý je využívaný na meranie uhlovej rýchlosti BLDC motora pomocou signálu z jedného Hallového snímača.

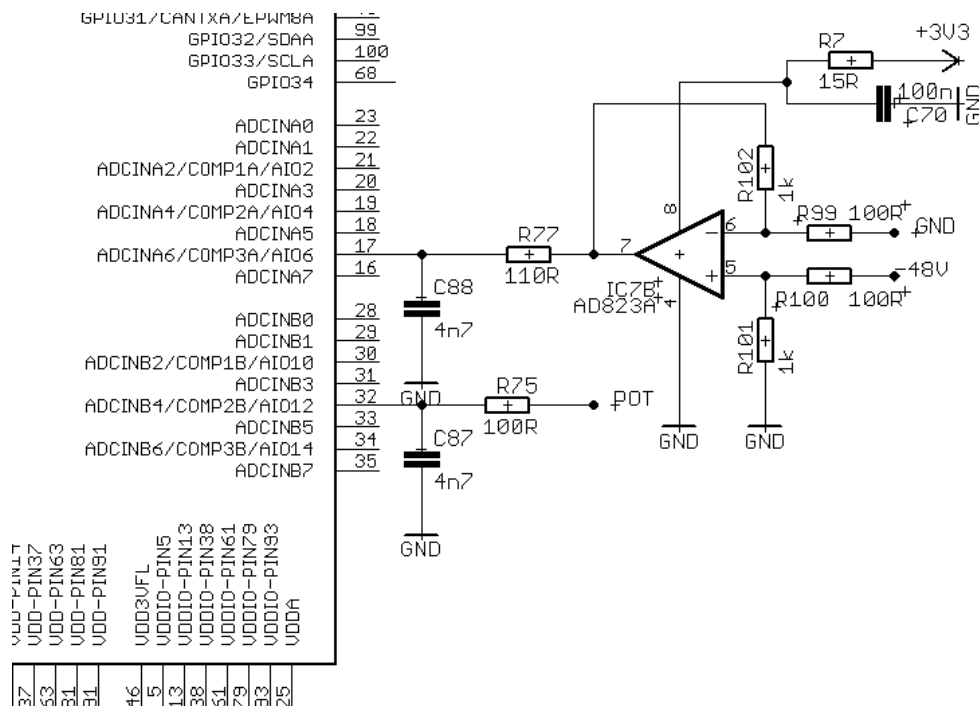


Obr. 2.8 Schéma zapojenia digitálnych pinov DSP procesora

Schéma zapojenia analógových vstupov DSP procesora je zobrazená na obrázku (Obr. 2.9). Bežec potenciometra, ktorý slúži na zadávanie žiadanej hodnoty otáčok BLDC motora, je zapojený na pin ADCINB4 cez filter tvorený RC-členom s hornou medznou frekvenciou $f_H = 340$ kHz. Úbytok napätia na bočníku, spôsobený prechodom prúdu, sa zosilňuje pomocou diferenčne zapojeného operačného zosilňovača typu AD823A. Z katalóga výrobcu [3] sa zistilo, že operačný zosilňovač je typu rail-to-rail so šírkou pásma pri jednotkovom zosilnení $GBWP = 17$ MHz. Na to, aby platila rovnica výpočtu výstupného napätia operačného zosilňovača (2.8) je potrebné, aby odpory R102 a R101 mali rovnaké hodnoty a odpory R99 a R100 mali rovnaké hodnoty. Taktiež treba zapojiť bočník tak, aby bolo kladnejšie napätie na neinvertujúcom vstupe a zápornejšie napätie na invertujúcom vstupe operačného zosilňovača. Tým je dosiahnuté, že vstup ADC prevodníka nepresiahne úroveň referenčného napätia. Výstupný signál z operačného zosilňovača sa cez filter tvorený RC-členom s hornou medznou frekvenciou $f_H = 300$ kHz privádza na pin ADCINA6.

$$U_0 = R_b \cdot I_N \cdot \frac{R_{102}}{R_{99}} = 32,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \frac{1000}{100} = 3,25 \text{ V}$$

(2.8)



Obr. 2.9 Schéma zapojenia analógových pinov DSP procesora

2.5 Napájanie

Pre zdroj napätia s hodnotou $U = 5 \text{ V}$ sa využilo zapojenie jednkvadrantového znižujúceho meniča, ktorý je ovládaný integrovaným obvodom typu ST1S14 (Obr. 2.10). Z katalóga výrobcu [10] sa zistili základné údaje integrovaného obvodu:

- rozsah vstupného napájacieho napätia $U_{IN} = 5,5 - 48 \text{ V}$
- maximálny prúd prechádzajúci spínačom $I_{SW} = 4,5 \text{ A}$
- spínacia frekvencia $f_{SW} = 850 \text{ kHz}$
- referenčné napätie spätnej väzby $U_{FB} = 1,22 \text{ V}$
- statický odpor zopnutého prechodu Drain-Source $R_{DS(on)} = 200 \text{ m}\Omega$

Integrovaný obvod je napájaný z externého zdroja napätia o hodnote $U_N = 48 \text{ V}$. Výstupné napätie je určené napäťovým deličom R66 a R68. Jeho hodnota sa dá vypočítať podľa vzorca (2.9). Nižšie napätie vyhovuje nasledujúcim napájaným obvodom. Paralelne zapojený kondenzátor C110 k odporu R66 slúži na zlepšenie fázovej charakteristiky systému.

$$U_{OUT} = U_{FB} \cdot \frac{R68 + R66}{R68} = 1,22 \cdot \frac{1000 + 3000}{1000} = 4,8 \text{ V} \quad (2.9)$$

K integrovanému obvodu je potrebné pridať externú nulovaciu diódu a cievku. Nulovacia dióda je Schottkyho dióda typu 30BQ100. Z katalóga výrobcu [15] sa zistili základné údaje Schottkyho diódy:

- maximálna hodnota opakovateľného záverného napätia $U_{RRM} = 100 \text{ V}$
- stredná hodnota výstupného prúdu cez púzdro $I_O = 3 \text{ A}$
- úbytok napätia na dióde v priepustnom smere $U_F = 0,62 \text{ V}$

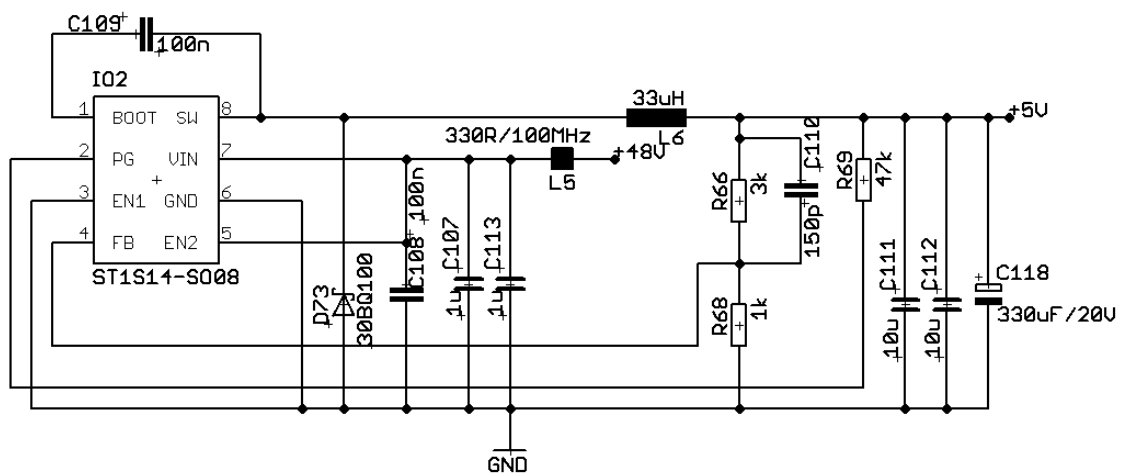
Straty v spínači integrovaného obvodu, spôsobené prechodom prúdu, sa vypočítajú podľa vzorca (2.1). Strieda spínača sa vypočíta podľa vzorca (2.10). Pri zvolení maximálneho odoberaného prúdu $I_N = 1 \text{ A}$ je výsledok strát v spínači integrovaného obvodu $P_{STR,t(on)} = 0,02 \text{ W}$. Straty v Schottkyho dióde, spôsobené prechodom prúdu, sa vypočítajú podľa vzorca (2.4). Po dosadení je výsledok $P_{STR,d0} = 0,06 \text{ W}$. Po výpočtoch je jasné, že polovodičové súčiastky vydržia menovité zaťaženie.

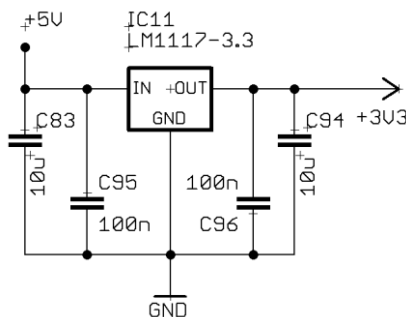
Hodnota indukčnosti cievky sa zvolila $L = 33 \mu\text{H}$. Pre výpočet zvlnenia výstupného prúdu ΔI sa vychádza zo vzorca (2.11). Výsledok udáva osem percentné zvlnenie menovitého prúdu. Pre minimálne zvlnenie výstupného napätia pri záťaži sa na výstup zapojil elektrolytický kondenzátor s hodnotou kapacity $C = 330 \mu\text{F}$.

$$s = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{4,8}{48} = 0,1 \quad (2.10)$$

$$\Delta I = \frac{U_{IN}}{2 \cdot L \cdot f_{SW}} \cdot (1 - s) \cdot s = \frac{48}{2 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot 850 \cdot 10^3} \cdot (1 - 0,1) \cdot 0,1 = 0,08 \text{ A} \quad (2.11)$$

Pre chod integrovaného obvodu je nutné zapojiť pin EN2 na vstupné napájacie napätie a pin EN1 zapojiť na zem. Pre správne spínanie spínača v integrovanom obvode je nutné zapojiť kondenzátor s hodnotou kapacity $C = 100 \text{ nF}$ medzi piny SW a BOOT. Pin PG slúži na oneskorenie snímania výstupného napätia pomocou spätnej väzby po štarte integrovaného obvodu.





Obr. 2.11 Schéma zapojenia lineárneho stabilizátora napätia

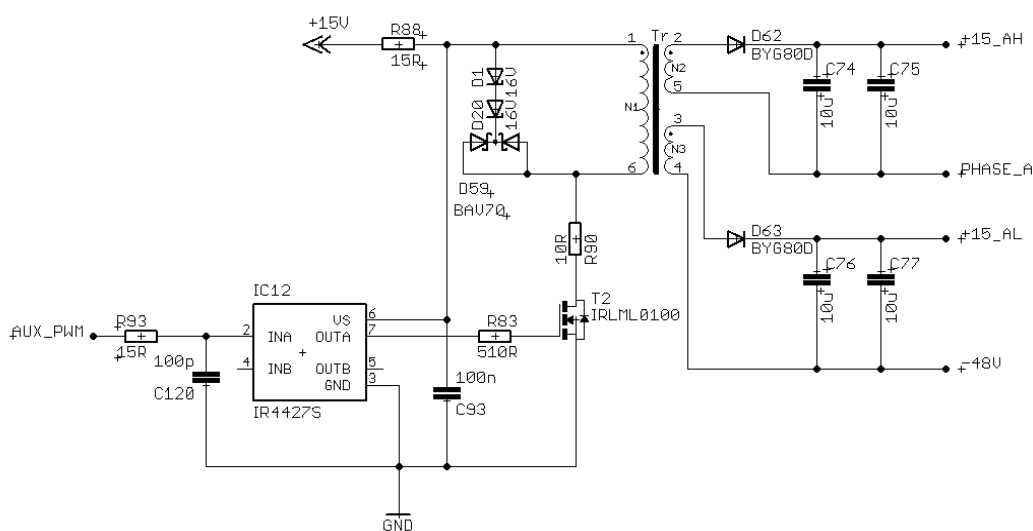
Napájacie napätie $U = 15 \text{ V}$ sa získava pomocou jednokvadrantového znižujúceho meniča z externého zdroja napätia s hodnotou $U_N = 48 \text{ V}$. Schéma zapojenia je rovnaká ako na obrázku (Obr. 2.10). Jediná zmena nastala v hodnote odporu rezistora R66, ktorá sa zmenila na hodnotu $R = 12 \text{ k}\Omega$. Podľa vzorca (2.9) vznikne výstupné napätie $U_{OUT} = 15,9 \text{ V}$. Vyššie výstupné napätie vyhovuje nasledujúcim napájaným obvodom. Po zvýšení výstupného napätia sa zvýši aj streda spínača integrovaného obvodu podľa vzorca (2.10) na hodnotu $s = 0,33$. Podľa vzorca (2.1) sa zvýšili straty na spínači integrovaného obvodu na hodnotu $P_{STR,t(on)} = 0,07 \text{ W}$. Podľa vzorca (2.4) sa zvýšili straty na nulovacej dióde na hodnotu $P_{STR,d0} = 0,2 \text{ W}$. Zvlnenie výstupného prúdu sa zmenilo podľa vzorca (2.11) na hodnotu $\Delta I = 0,19 \text{ A}$. Výsledok udáva devätnásť percentné zvlnenie menovitého prúdu.

Každý budič tranzistorov v zapojení trojfázového meniča potrebuje galvanicky oddelený zdroj napätia pre tranzistorovú časť budiča. Tým je zabezpečené optimálne spínanie tranzistorov. Schéma zapojenia galvanicky oddeleného zdroja pre hodnotu napätia $U = 15 \text{ V}$ je zobrazená na obrázku (Obr. 2.12). Použilo sa zapojenie jednočinného priepustného meniča s demagnetizáciou do Zenerovej diódy. Pri malom uvažovanom zaťažení zdroja je možné vynechať tlmivky na sekundárnej strane a prevádzkovať jednočinný menič so špičkovým detektorom na sekundárnej strane. Tým je dosiahnuté, že na sekundárnej strane meniča bude rovnaké napätie ako na primárnej strane pri akejkoľvek striede. V tomto prípade bude mať napätie hodnotu $U = 15,9 \text{ V}$.

Ako transformátor v zapojení bol využitý transformátor pre budenie hradla Gate MOS-FET tranzistorov. Má dve sekundárne vinutia, obe s prevodom $p = 1$. Výhodou je, že jeden transformátor sa dá použiť pre dva budiče zároveň. Spínacím prvkom jednočinného priepustného meniča je MOS-FET tranzistor typu IRLML0100. Z katalóga výrobcu [7] sa zistili základné údaje MOS-FET tranzistora:

- prierazné napätie prechodu Drain-Source $U_{(BR)DDS} = 100 \text{ V}$
- statický odpor zopnutého prechodu Drain-Source $R_{DS(on)} = 190 \text{ m}\Omega$
- trvalý prúd cez prechod Drain-Source $I_D = 1,6 \text{ A}$

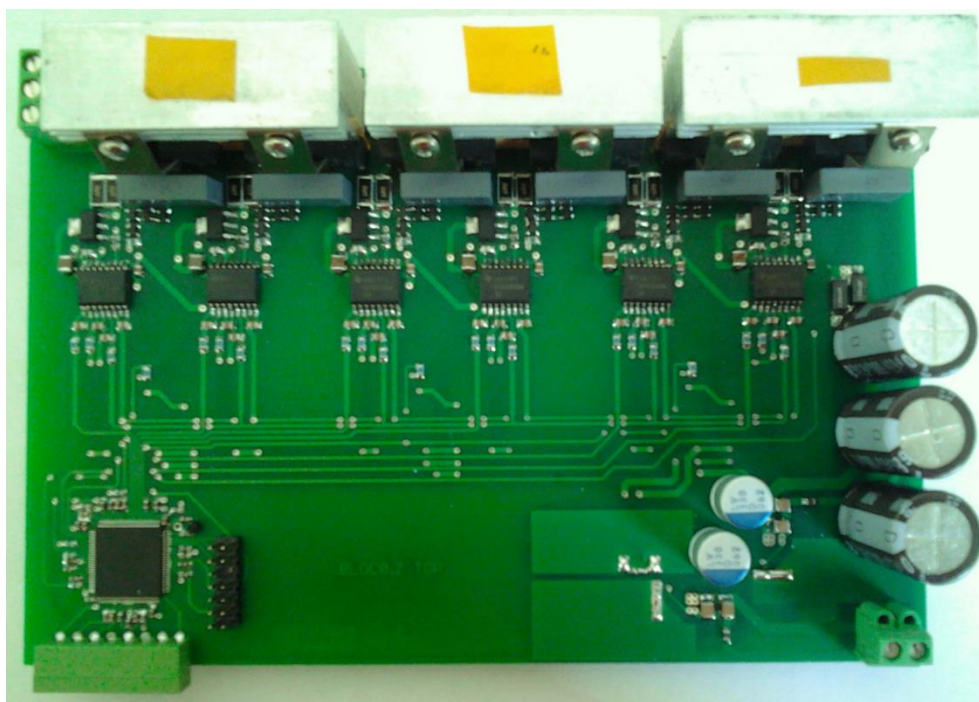
Aby sa tranzistor nezničil napäťovými prechytmi pri demagnetizácii, je potrebné zapojiť Zenerove diódy paralelne k primárnemu vinutiu transformátora. V zapojení sa zvolili dve Zenerove diódy zapojené do série, a tým sa transformátor demagnetizuje pomocou celkového Zenerovho napätia s hodnotou $U_Z = 32$ V. Rezistory R88 a R90 slúžia na omedzenie prúdových špičiek, spôsobenými nabíjaním kondenzátorov na sekundárnej strane meniča, a tým sa chráni tranzistor. Pre spomalenie spínania tranzistora, a tým aj ochrany pred prúdovými špičkami, má rezistor zapojený do hradla Gate tranzistora veľkú hodnotu. Ako budič MOS-FET tranzistora bol použitý integrovaný obvod typu IR4427S. Z katalóga výrobcu integrovaného obvodu [5] je zrejmé, že má dva výstupy s maximálnym zaťažením $I_O = 1,5$ A. Pre zapojenie jednočinného priepustného meniča stačí zapojenie jedného výstupu budiča MOS-FET tranzistora. Na vstup budiča prichádza PWM signál z mikroprocesora s frekvenciou $f = 750$ kHz a so striedou $s = 1/3$. Signál je pred vstupom filtrovaný RC-členom s hornou medznou frekvenciou $f_H = 106$ MHz. Budič MOS-FET tranzistorov je napájaný z jednokvadrantového znižujúceho meniča s hodnotou napätia $U = 15,9$ V. Pred vstupom je zapojený filter tvorený RC-členom s hornou medznou frekvenciou $f_H = 106$ kHz. Pre potreby trojfázového meniča sú potrebné tri jednočinné priepustné meniče pre napájanie tranzistorovej strany budičov.



Obr. 2.12 Schéma zapojenia jednočinného priepustného meniča

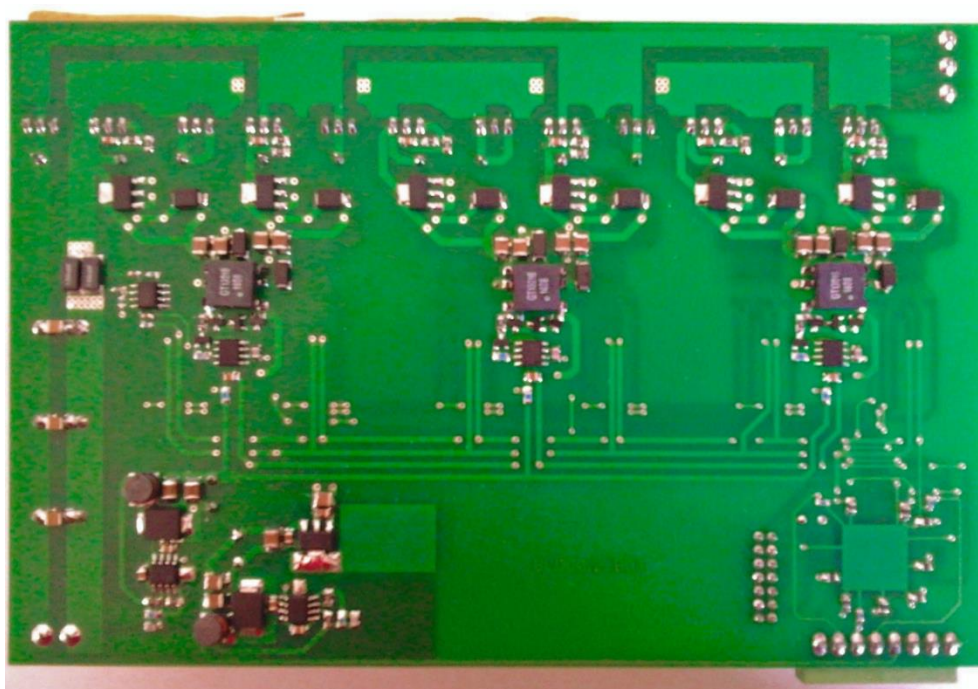
3 DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV

Vysokootáčkový pohon s BLDC motorom je navrhnutý na obojstrannej doske plošných spojov (skr. DPS) s rozmermi 184x122 mm. Na vrchnej strane DPS (Obr. 3.1) sú uložené všetky THD súčiastky (z angl. Through-Hold Devices, t.j. súčiastky s drôtovými vývodmi). Na vrchu obrázka sú uložené MOS-FET tranzistory a Schottkyho diódy z trojfázového meniča. Ku každej dvojici MOS-FET tranzistora a Schottkyho diódy je čo najbližšie pripojený impulzný bezindukčný fóliový kondenzátor. Každá vetva trojfázového meniča má svoj vlastný hliníkový chladič. Výstupná svorkovnica pre BLDC motor sa nachádza vľavo od chladičov. Na pravej spodnej časti DPS sa nachádza batéria elektrolytických kondenzátorov, ktoré slúžia ako napäťový medziobvod pre trojfázový menič. Menšie elektrolytické kondenzátory sú výstupnými kondenzátormi z jednokvadrantových znižujúcich meničov. Na vrchnej strane DPS sú viditeľné aj chladiace plôšky pre integrované obvody jednokvadrantových znižujúcich meničov. Napájacia svorkovnica sa nachádza v pravej spodnej časti. Celá doska plošných spojov je napájaná napätím $U_N = 48$ V. V ľavej spodnej časti DPS sa nachádza DSP procesor v SMD púzde (z angl. Surface Mount Devices, t.j. súčiastky pre povrchovú montáž). Po pravej strane DSP procesora sa nachádza JTAG programovací konektor, ktorý je zabezpečený proti nesprávnemu zasunutiu. Tým je zabezpečené, že sa pri programovaní nezničí DSP procesor. Na spodnej strane DSP procesora sa nachádza vstupný konektor pre potenciometer a Hallové snímače BLDC motora. Na vrchnej strane DPS sa nachádzajú izolované budiče MOS-FET tranzistorov, ktoré sú integrované v SMD púzde. Na doske plošných spojov sa nachádzajú čo najbližšie k jednotlivým MOS-FET tranzistorov v trojfázovom meniči. Aby boli zabezpečené čo najkratšie cesty medzi budičom a hradlom Gate tranzistora, sú niektoré súčiastky umiestnené aj na spodnej strane DPS.



Obr. 3.1 Vrchná strana dosky plošných spojov

Na spodnej strane DPS (Obr. 3.2) sa nachádzajú iba SMD súčiastky. V ľavej spodnej časti sú umiestnené oba jednokvadrantové znižujúce meniče. V strede dosky plošných spojov sa nachádzajú tri jednočinné priepustné meniče s SMD transformátormi pre napájanie jednotlivých budičov MOS-FET tranzistorov. Každý jeden jednočinný priepustný menič je geometricky presne umiestnený medzi dva budiče tranzistorov zapojených v jednej vetve trojfázového meniča. V ľavej časti medzi napäťovým medziobvodom, tvoreným elektrolytickými kondenzátormi, a trojfázovým meničom je umiestnený bočník pre meranie prúdu. Bočník je tvorený paralelnou kombináciou štyroch rezistorov, z ktorých je polovica umiestnená na spodnej strane DPS a polovica umiestnená na vrchnej strane DPS. Na spodnej strane DPS je pri bočníkoch zapojený operačný zosilňovač v diferenčnom zapojení, ktorý zosilňuje úbytok napätia na bočníku spôsobený prechodom menovitého prúdu.



Obr. 3.2 Spodná strana dosky plošných spojov

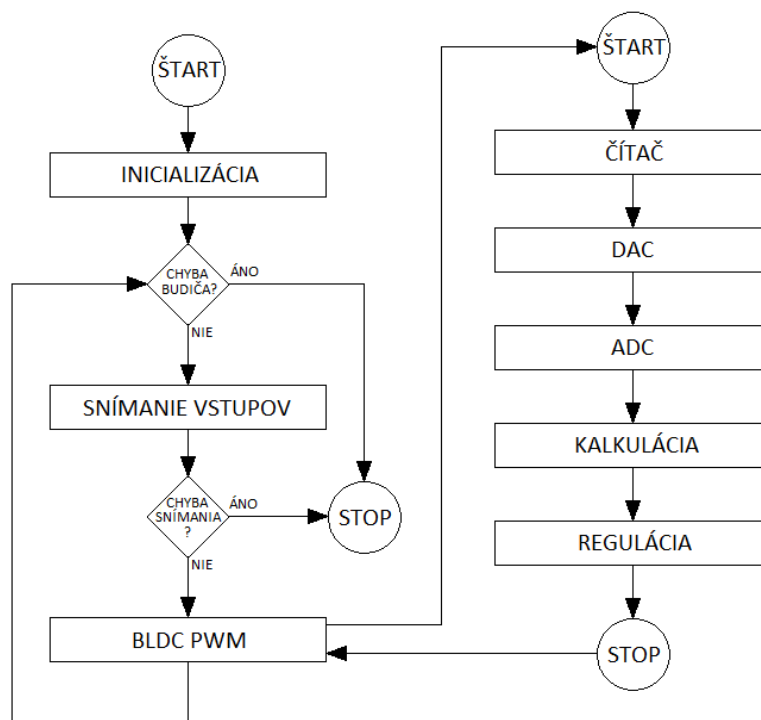
4 PROGRAM

Štruktúra programu pre DSP procesor sa najlepšie popíše pomocou vývojového diagramu (Obr. 4.1). Na začiatku programu prebieha inicializácia knižníc, vrátane vopred naprogramovaných knižníc pre riadenie a reguláciu pohonov od výrobcu DSP procesorov. Taktiež sa začne inicializácia periférií DSP procesora a inicializácia premenných v programe. Tým je program pripravený na pracovný cyklus.

Hlavný program prebieha v nekonečnom cykle. Na začiatku cyklu sa rieši podmienka funkčnosti budičov. Ak ktorýkoľvek budič vyhlási chybu, program vypne všetky tranzistory a vyhlási chybu spôsobenú budičmi. Ak budič nevyhlási chybu, program môže pokračovať v nekonečnej slučke. Na vyčítanie hodnôt prichádzajúcich od Hallových snímačov slúži knižnica vytvorená výrobcom. Výstupom z tejto knižnice je premenná udávajúca sekciu zopnutia tranzistorov v trojfázovom moste. Pri vypísaní neexistujúcej sekcie program vypne všetky tranzistory a vyhlási chybu Hallových snímačov. Premenná so správnou sekciou spínania tranzistorov a premenná so striedou impulzov pre tranzistory vstupuje do ďalšej knižnice vytvorenej výrobcom, ktorá slúži pre správne spínanie všetkých tranzistorov v trojfázovom meniči. Výstupom z knižnice sú PWM signály, ktoré vstupujú do budičov tranzistorov.

Regulácia otáčok BLDC motora sa vykonáva v podprograme prerušenia od ADC prevodníka. Pre snímanie meraných veličín regulačnej slučky sú využité ďalšie knižnice vytvorené výrobcom. Na meranie uhlovej rýchlosti BLDC motora slúži čítač, ktorý pri konštantnej perióde načítava počet impulzov, ktoré vytvára jeden Hallov snímač. Tým vznikne premenná s údajom o aktuálnej rýchlosti BLDC motora. Na meranie prúdu slúži 12-bitový ADC prevodník, do ktorého prichádza analógový signál z operačného zosilňovača a výstupom je 12-bitová premenná. Následne pokračuje výpočet maximálnej hodnoty meraného prúdu. ADC prevodníkom sa sníma aj žiadaná hodnota otáčok BLDC motora zadávaná pomocou potenciometra. Pred vstupom do proporcionálne – integračných (skr. PI) regulátorov otáčok a prúdu je potrebné, aby všetky premenné boli rovnakej dĺžky. V programe je využitá otáčková regulácia s paralelným prúdovým obmedzením. PI regulátor otáčok optimálne reguluje striedu pre tranzistory a paralelný PI regulátor prúdu obmedzuje maximálny fázový prúd pomocou maximálnej striedy pre tranzistory.

Na pozadí programu je spustený PWM modulátor signálu s konštantnou frekvenciou a striedou, ktorý slúži na spínanie jednočinných priepustných meničov. V prípade potreby je možné v prerušení od ADC prevodníka spustiť PWM modulátor, ktorý bude mať striedu impulzu úmernú premennej programu. Tým vznikne jednoduchý DAC prevodník na zobrazovanie premenných programu.



Obr. 4.1 Vývojový diagram programu pre DSP procesor

4.1 Inicializácia

Na začiatku inicializácie prebehne pripojenie všetkých potrebných knižníc pre beh programu, vrátane knižníc slúžiacich pre riadenie a reguláciu pohonov, ktoré boli vytvorené výrobcom DSP procesora. Pred začiatkom hlavného programu je potrebné zadefinovať všetky globálne premenné, ktoré sa vyskytujú v programe a zapísať do nich východiskové hodnoty.

Na začiatku hlavného programu začína inicializácia všetkých potrebných periférií DSP procesora. Hlavne sa inicializuje pamäť Flash, do ktorej sa zapisuje program a všetky časovače DSP procesora. Interný kryštál sa nastaví na maximálnu frekvenciu $f = 90$ MHz. Inicializujú sa všetky potrebné prerušenia a nastaví sa ich priorita. Nastavia sa vstupno/výstupné piny digitálnych periférií. Ako výstupný pin sa nastaví pin GPIO15, ktorý slúži na resetovanie budičov tranzistorov. Ako vstupný pin sa nastaví pin GPIO57, ktorý slúži na snímanie poruchy budičov tranzistorov. Nakonfigurujú sa základné nastavenia PWM modulátorov s vysokým rozlíšením HRPWM7 a HRPWM6. PWM modulátor HRPWM7 slúži pre generovanie spínacích impulzov pre jednočinné priepustné meniče. Jeho frekvencia sa nastaví na konštantnú hodnotu $f = 750$ kHz a strieda na konštantnú hodnotu $s = 1/3$. S konštantnou frekvenciou sa spína celý pár PWM modulátora zároveň. Impulzy PWM signálu sú zarovnané na nábežné hrany. Nastavenie PWM modulátora HRPWM7 nie je nutné počas hlavnej slučky programu meniť. PWM modulátor HRPWM6 slúži pre pomocný DAC prevodník. Jeho základným nastavením je konštantná frekvencia $f = 900$ kHz a spínanie celého páru PWM modulátora zarovnaného na nábežnú hranu. Hodnota striedy signálu sa dopočítava v prerušení od ADC prevodníka a je daná pomerom hodnoty 32-bitovej premennej k hodnote periódy signálu. Týmto jednoduchým programom sa dá pozorovať priebeh ľubovoľnej premennej v čase.

Ako ďalšie podprogramy sú naprogramované dva podprogramy slúžiace pre zachytávanie chýb spôsobených budičom tranzistorov a chýb spôsobených Hallovými snímačmi. Oba programy vykonávajú identické funkcie. Vypínajú všetky tranzistory v zapojení trojfázového meniča a zastavia program DSP procesora s vypísaním chyby.

V hlavnom programe nasleduje zápis prvkov do tabuľky HallMap, ktorá slúži na priradenie vhodnej sekcie zopnutia tranzistorov v trojfázovom meniči k ľubovoľnej kombinácii impulzov, ktorú vygenerovali Hallove snímače. Momentálna kombinácia určuje chod v protismere hodinových ručičiek BLDC motora, a tým je program pripravený pre reguláciu otáčok vretena obrábacieho stroja. Knižnica Hall_gpio, ktorá je vytvorená výrobcom, na začiatku inicializuje vstupy GPIO24 – GPIO26, ktoré slúžia pre snímanie signálov z Hallových snímačov BLDC motora. Knižnica Bldcpwm, ktorá je vytvorená výrobcom, na začiatku inicializuje PWM modulátory EPWM1 – EPWM3, ktoré slúžia pre vytvorenie spínacích signálov pre tranzistory trojfázového meniča. Frekvencia je nastavená na konštantnú hodnotu $f = 22500$ Hz. Strieda impulzov a správny sled spínania jednotlivých tranzistorov sú nastavované až v hlavnej slučke programu. Posledná knižnica Cap, ktorá je vytvorená výrobcom, na začiatku inicializuje čítač impulzov na pin GPIO24. Počítanie impulzov prebieha v prerušení od ADC prevodníka.

V hlavnom programe je potrebné nastaviť ADC prevodníky, pre snímanie analógových signálov. Potrebné je nastaviť kanál A6, ktorý sníma signál z operačného zosilňovača a kanál B4, ktorý sníma signál z bežca potenciometra. Oba kanály sú synchronizované na stred PWM signálu modulátora EPWM1A. Prevod analógových signálov sa realizuje na pozadí programu. Po realizácii prevodu sa spustí prerušenie, v ktorom sa vyčítavajú výsledky a prebieha regulácia otáčok BLDC motora. Pred spustením hlavnej slučky programu sa musia zapísať vopred určené hodnoty PI regulátorov otáčok a prúdu BLDC motora. Po týchto operáciách je program pripravený pre skok do hlavnej nekonečnej slučky.

4.2 Snímanie Hallových snímačov

Snímanie signálov z Hallových snímačov v hlavnej slučke programu sa uskutočňuje pomocou knižnice Hall_gpio. Na začiatku knižnice sa snímajú signály zo vstupných pinov GPIO24 – GPIO26 a priradí sa im váha. Pre pin GPIO24 sa zvolila váha 1, pre pin GPIO25 sa zvolila váha 2 a pre GPIO26 sa zvolila váha 4. Po sčítaní všetkých pinov vznikne osem možných kombinácií s hodnotami od 0-7. Pracovné hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 1-6. Ostané hodnoty sa považujú za chybné, pretože vzniknú len pri všetkých zapnutých Hallových snímačoch alebo pri všetkých vypnutých Hallových snímačoch. V prípade ak by nastala chybná kombinácia, program skáče do podprogramu chyby spôsobenej Hallovými snímačmi. Pri správnej kombinácii signálov z Hallových snímačov program knižnice pokračuje ďalej.

V ďalšej časti sa program rozdeľuje na dve funkcie, a to funkcia zápisu tabuľky HallMap a funkcia čítania z tabuľky HallMap. Funkcia zápisu tabuľky dokáže automaticky zapísať hodnoty sekcií spínania tranzistorov v trojfázovom meniči do tabuľky HallMap len podľa toho, ako sa bude otáčať BLDC motor. Tým sa dokáže zapísať spínací algoritmus pre neznáme BLDC motory bez nutnosti merania. Aby bol algoritmus spínania tranzistorov bezchybný, funkcia obsahuje niekoľko stupňov preverovania v podobe vnorených podmienok, ktoré zabezpečia, že spínací algoritmus sa zapíše do tabuľky HallMap až po niekoľkých opakovaníach. V prípade BLDC motora typu HXKJ DMW57314 je vopred známy algoritmus spínania tranzistorov v trojfázovom meniči pre otáčanie BLDC motora v protismere hodinových ručičiek, a preto sa táto funkcia

v knižnici nepoužíva. Tabuľka HallMap je zaplnená konštantnými hodnotami pri inicializácii programu.

Druhá funkcia knižnice periodicky vyčítava z tabuľky HallMap hodnotu sekcie zopnutia tranzistorov podľa hodnoty, ktorá sa dostala sčítaním vstupných signálov z Hallových snímačov a zapisuje ju do výstupnej premennej HallMapPointer. Tým je zabezpečená správna komutácia BLDC motora pri chode v protismere hodinových ručičiek.

4.3 PWM modulátory signálu

PWM modulátory signálu pre tranzistory trojfázového meniča zabezpečuje knižnica Bldecpwm. Vstupom do programu knižnice sú hodnoty striedy impulzov uložené v premennej DutyFunc a hodnota sekcie spínacieho algoritmu tranzistorov uložená v premennej CmtnPointer. V programe sa upraví hodnota striedy impulzov na hodnotu, ktorá sa môže zapísať do registrov PWM modulátorov. Následne sa program rozdelí na sedem možných zopnutí tranzistorov v trojfázovom meniči. Šesť možných zopnutí slúži pre správne komutovanie BLDC motora. PWM modulátory prepínajú tranzistory podľa tabuľky (Tab. 1.1), a tým sa môže BLDC motor plynulo otáčať v protismere hodinových ručičiek. Strieda impulzov pre spínanie tranzistorov sa mení len pre horné tranzistory v trojfázovom meniči. Spodné tranzistory v meniči sa spínajú s plnou striedou spínacích impulzov. Týmto spôsobom je zaručená plynulá regulácia otáčok BLDC motora zmenou striedy spínacích impulzov pre tranzistory v trojfázovom meniči. Siedma možnosť zopnutia tranzistorov slúži pri poruchových stavoch pre okamžité vypnutie všetkých tranzistorov v trojfázovom meniči.

4.4 Snímanie žiadaných a meraných hodnôt

Žiadaná hodnota otáčok BLDC motora sa zadáva pomocou potenciometra. Napätie na bežci potenciometra je priamo snímané ADC prevodníkom DSP procesora na pine ADCINB4. Načítavanie hodnoty z ADC prevodníka do premennej sa uskutočňuje v prerušení. Následne sa musí 12-bitová hodnota prekonvertovať na 32-bitovú hodnotu, ktorá je pripravená pre PI regulátor.

Meraná hodnota prúdu sa sníma pomocou ADC prevodníka na pine ADCINA6. Načítavanie hodnoty sa uskutočňuje v prerušení od ADC prevodníka, kde sa zároveň 12-bitová hodnota prekonvertuje na 32-bitovú hodnotu. V slučke prerušenia prebieha aj stály výpočet maximálnej hodnoty prúdu pomocou aktuálnej hodnoty snímanej ADC prevodníkom. Výsledná maximálna hodnota meraného prúdu je pripravená pre spracovanie v PI regulátore.

Meraná hodnota otáčok BLDC motora sa získava pomocou čítača impulzov z Hallovho snímača. Načítavanie impulzov sa uskutočňuje pomocou knižnice Cap. Čítač napočíta určitý počet impulzov za konštantnú dobu, a tým sa zistí frekvencia otáčania. Pri uskutočnení bezporuchového čítania impulzov sa premenná CapReturn vynuluje. Následne môže nasledovať prečítanie výsledku, ktorý je uložený vo výstupnej premennej EventPeriod. Výsledok sa prepočíta na 32-bitovú hodnotu, ktorá predstavuje meranú hodnotu otáčok. Paralelne sa vykonáva rovnaký výpočet pre zobrazovanie meranej rýchlosti v jednotkách otáčok za minútu. Pre zaistenie bezporuchového merania otáčok BLDC motora, obsahuje program podmienky pre správne výpočty otáčok. Výsledok výpočtov otáčok je pripravený pre spracovanie v PI regulátore.

4.5 Regulácia

Výpočet PI regulátorov sa uskutočňuje pomocou knižnice `Pid_reg3`. Vstupom do knižnice je referenčná hodnota a hodnota zo spätnej väzby. Na začiatku programu knižnice sa vypočíta regulačná odchýlka ako rozdiel referenčnej hodnoty a spätnoväzobnej hodnoty. Regulačná odchýlka sa následne zosilní pomocou proporcionálneho zosilnenia aj pomocou integračného zosilnenia. Integrál PI regulátora je nahradený súčtom aktuálnej hodnoty a predchádzajúcej hodnoty. Hodnoty proporcionálneho a integračného zosilnenia sa zadávajú pri inicializácii hlavného programu. Obe zložky regulátora sa na záver sčítajú a výsledkom je výstupná hodnota PI regulátora. Výstup regulátora sa pomocou podmienok zasaturuje na minimálnej alebo maximálnej hodnote, a tým je zabezpečené, že premenná nebude pretekať. Rovnako sa zasaturuje aj integračná zložka, aby PI regulátor neutiekol do veľkých čísiel a zostal stále pripravený na dynamickú zmenu.

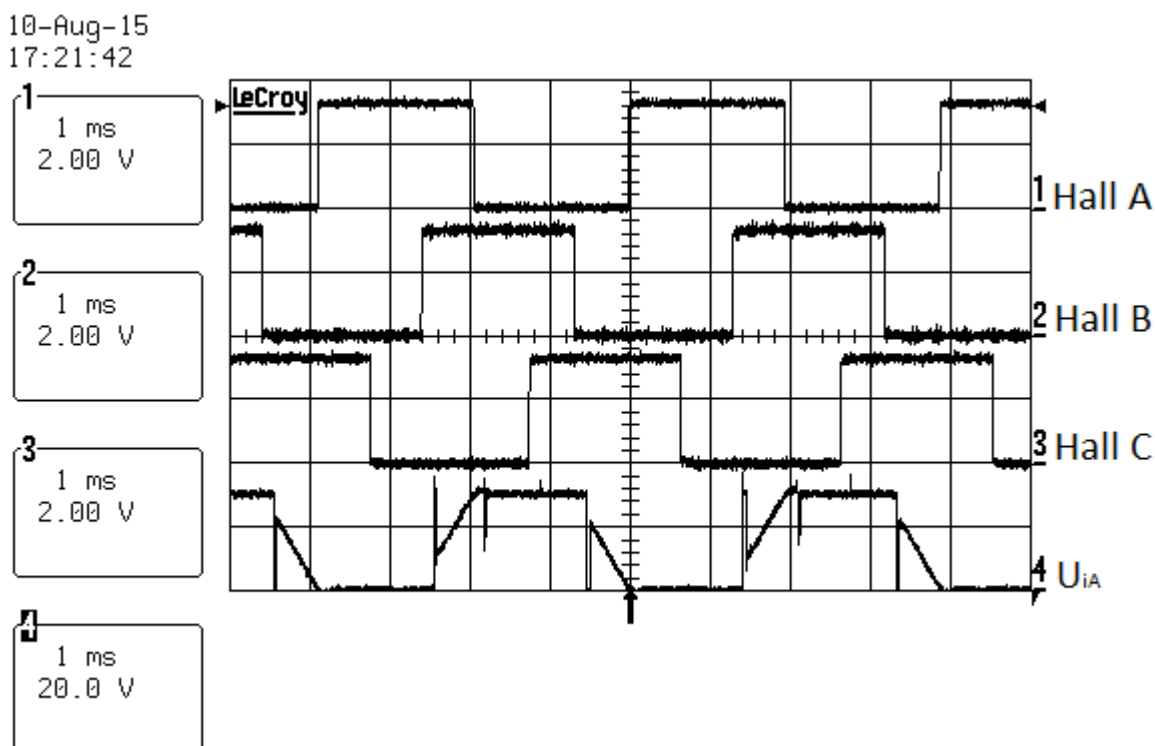
V prerušení od ADC prevodníka sú naprogramované dva PI regulátory v paralelnom zapojení. Prvý PI regulátor predstavuje regulátor otáčok. Jeho vstupom je žiadaná a meraná hodnota otáčok. Jeho výstupom je strieda impulzov pre tranzistory v trojfázovom meniči. Počas regulácie otáčok sa pri otáčkach $n_{PI} = 4000$ ot./min mení proporcionálne zosilnenie PI regulátora. Pri nízkych otáčkach sa spomaľuje PI regulátor a pri vysokých otáčkach sa zrýchľuje PI regulátor. Týmto je zabezpečená optimálna regulácia otáčok v celom rozsahu. Druhý PI regulátor predstavuje paralelný regulátor prúdu. Jeho vstupom je maximálna povolená hodnota a meraná hodnota prúdu. Jeho výstupom je maximálna strieda impulzov pre tranzistory v trojfázovom meniči. Regulátor slúži pre obmedzenie maximálneho fázového prúdu BLDC motora, tak aby sa neobmedzila dynamika PI regulátora otáčok pri normálnom chode.

5 MERANIE

Správne naprogramovanie DSP procesora sa overuje pomocou meraní na osciloskope. Medzi základné merania patrí meranie sledu impulzov generovaných Hallovými snímačmi, priebeh fázových napätí BLDC motora, priebeh fázových prúdov BLDC motora a priebeh prúdu v medziobvode trojfázového meniča. Pre overenie činnosti PI regulátorov je najvhodnejšie merať prechodovú charakteristiku regulátora.

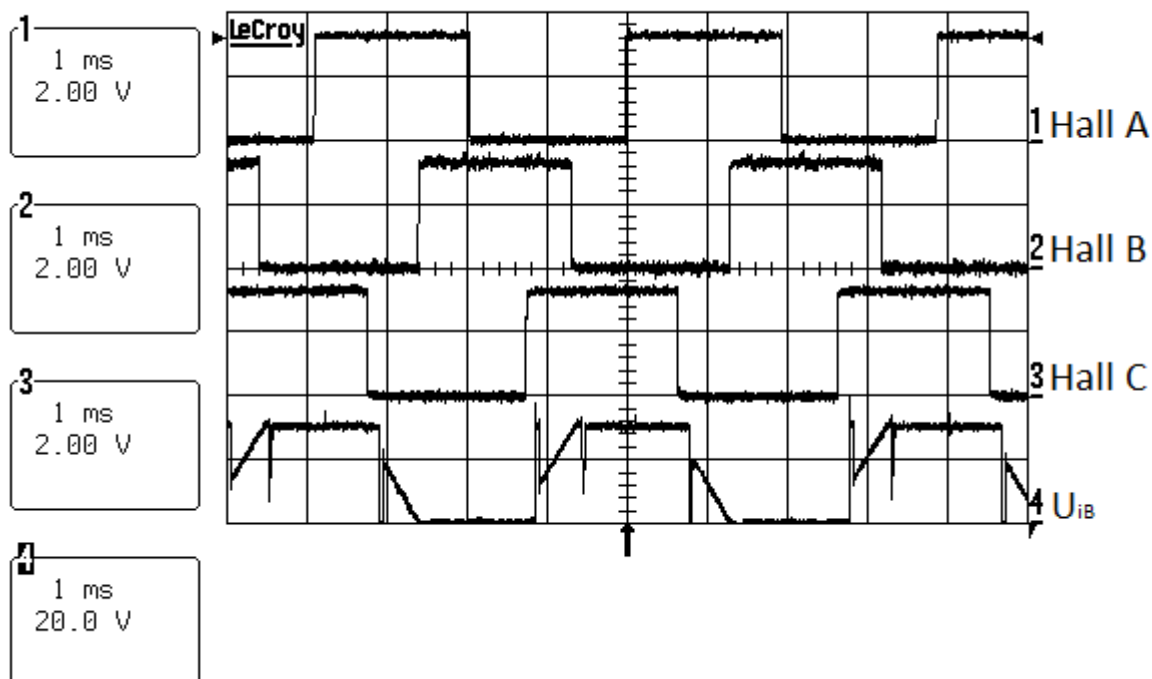
5.1 Meranie komutačného deja

Týmto meraním sa overuje vhodné prepínanie tranzistorov podľa signálov generovaných Hallovými snímačmi, čo zabezpečuje správnu komutáciu BLDC motora. Pre chod BLDC motora v protismere hodinových ručičiek je potrebné zabezpečiť priebehy fázových napätí trojfázového meniča podľa grafu (Obr. 1.4). Meranie prebiehalo pri maximálnych otáčkach a pri nezaťaženom BLDC motore. Použitý osciloskop bol štvorkanálový, a preto pre zobrazenie všetkých potrebných priebehov je potrebné vytvoriť tri oscilogramy (Obr. 5.1), (Obr. 5.2), (Obr. 5.3). Pre správne vyhodnocovanie oscilogramov boli tri kanály osciloskopu nemenné a predstavujú priebeh signálov generovaných Hallovými snímačmi. Posledný kanál osciloskopu predstavoval jedno z troch fázových napätí BLDC motora. Na oscilogramoch je vidieť správne generovanie impulzov Hallovými snímačmi, ktoré sú posunuté vždy o 120° . Po porovnaní oscilogramov a grafu (Obr. 1.4) je zrejmé, že program zabezpečujúci komutáciu BLDC motora v protismere hodinových ručičiek pracuje správne. Priebeh všetkých troch fázových napätí BLDC motora zobrazuje oscilogram (Obr. 5.4). Na oscilograme je vidieť vzájomné posunutie fáz o 120° . Pri detailnejšom rozbere je vidieť na priebehoch jednotlivých fázových napätí BLDC motora prekmity spôsobené prepínaním tranzistorov trojfázového meniča.



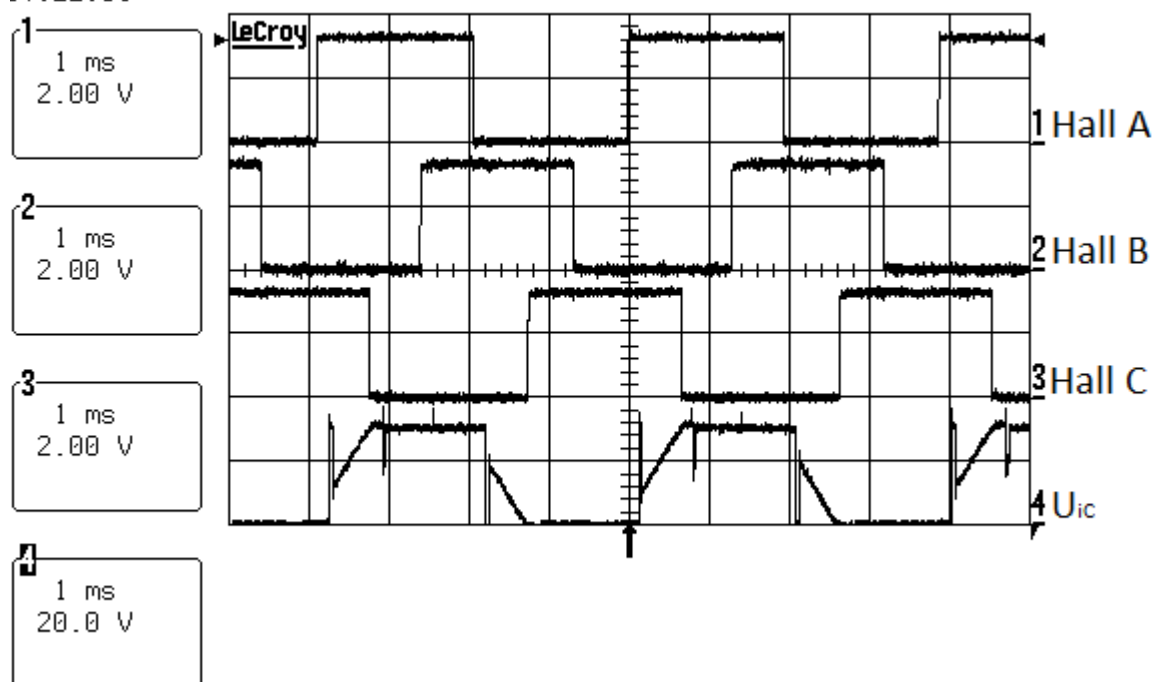
Obr. 5.1 Meranie komutačného deja fázy A

10-Aug-15
17:22:14

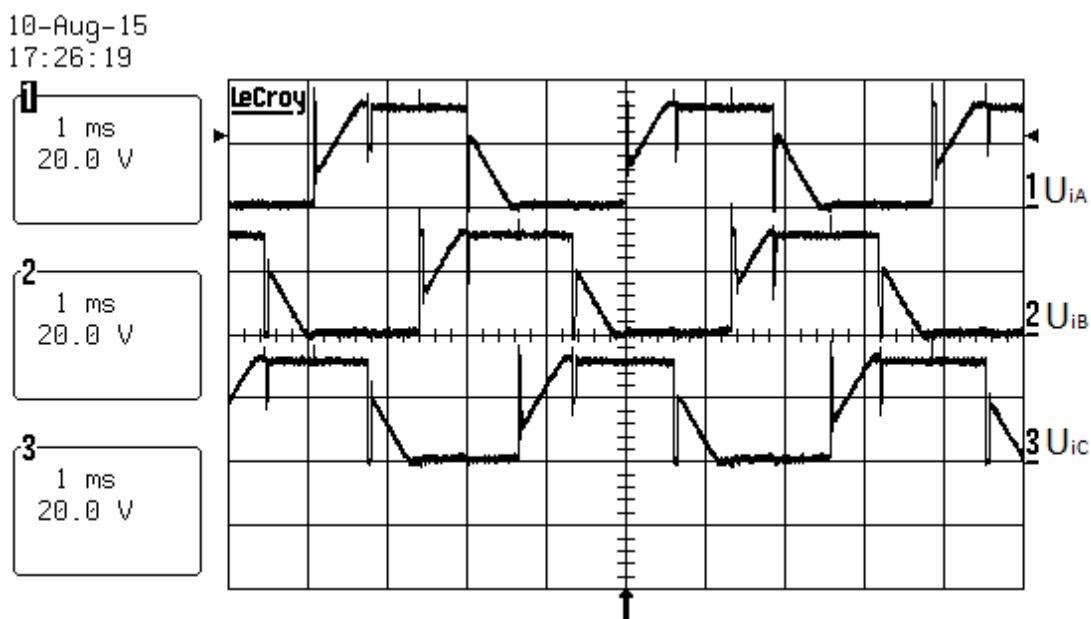


Obr. 5.2 Meranie komutačného deja fázy B

10-Aug-15
17:22:51



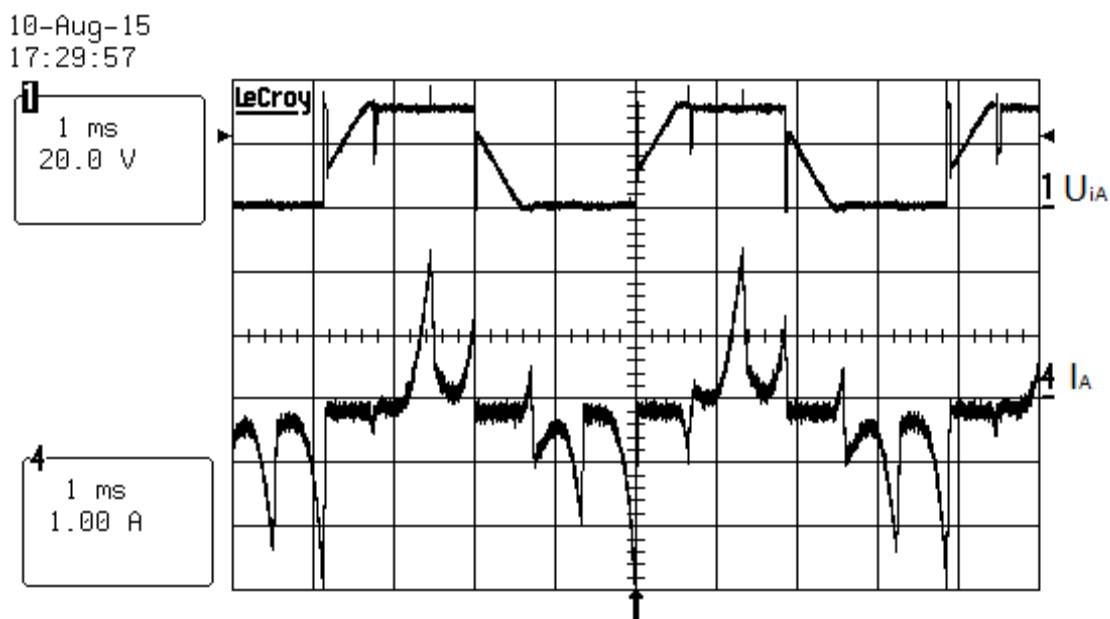
Obr. 5.3 Meranie komutačného deja fázy C



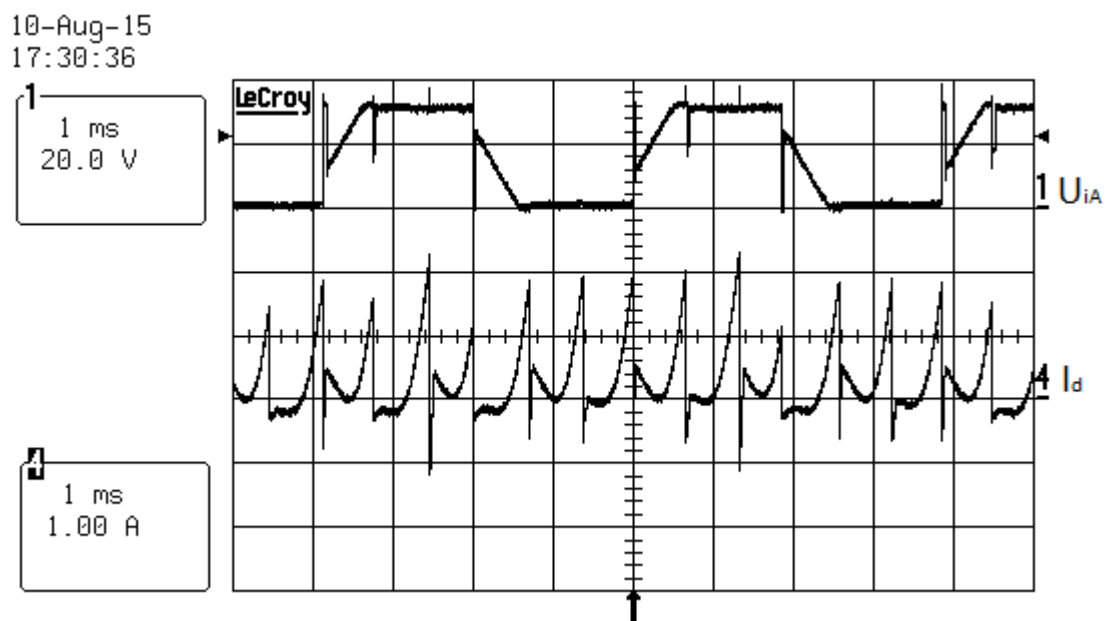
Obr. 5.4 Meranie komutačného deja na všetkých fázach

5.2 Meranie priebehov fázových prúdov a prúdu v medziobvode

Na meranie prúdov v zapojení trojfázového meniča bola využitá prúdová sonda osciloskopu. Meranie porovnáva priebeh fázových prúdov (Obr. 5.5) a priebeh prúdu v medziobvode trojfázového meniča (Obr. 5.6). Z oscilogramov vyplýva, že prúd v medziobvode dáva neustálu informáciu o odoberanom prúde BLDC motorom, na rozdiel od fázového prúdu, ktorým tretinu periódy nepreteká prúd. Preto je dostačujúce použiť jeden bočník zapojený v medziobvode trojfázového meniča. Z oscilogramov je zrejme, že pri nezaťaženom BLDC motore vznikajú veľké prúdové špičky spôsobené komutáciou prúdu v obvode s nízkou indukčnosťou vinutí BLDC motora. Preto je dôležité, aby snímanie prúdu ADC prevodníkom prebiehalo vždy mimo prepínania tranzistorov. Na to slúži synchronizácia ADC prevodníkov so stredom impulzov generovaných PWM modulátormi, čím sa zabezpečí, že sa nebudú snímať prúdové prekmity spôsobené prepínaním tranzistorov v obvode trojfázového meniča.



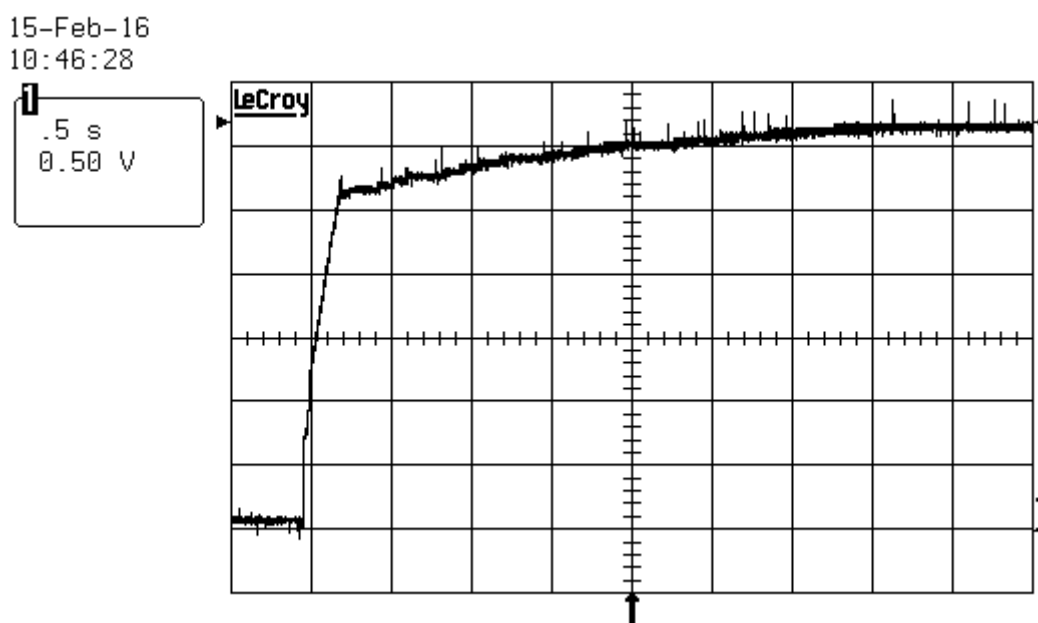
Obr. 5.5 Meranie priebehu fázového prúdu



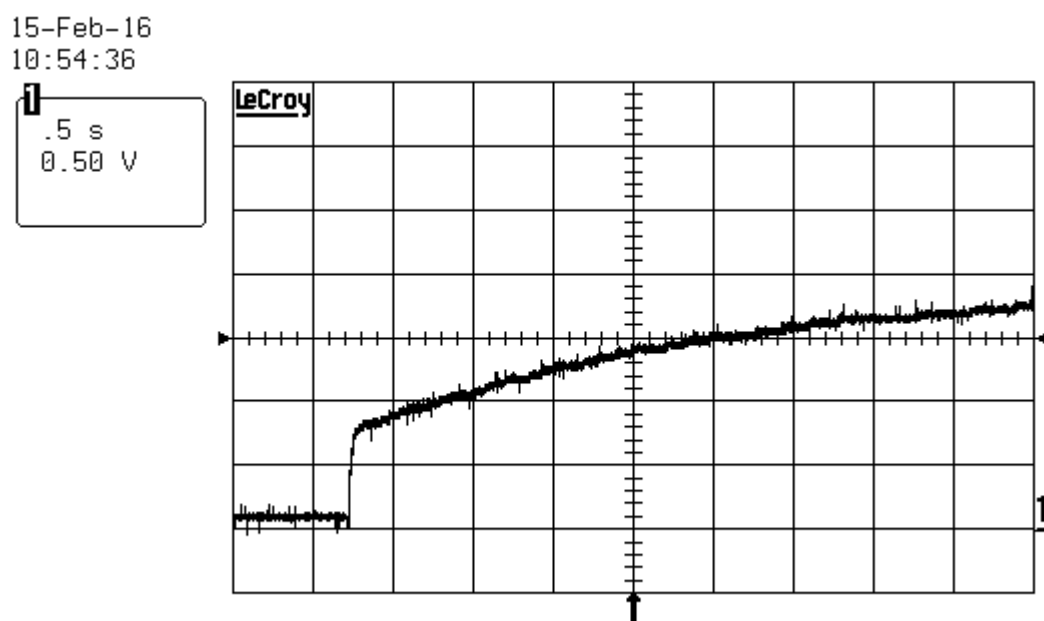
Obr. 5.6 Meranie priebehu prúdu v medziobvode

5.3 Meranie prechodovej charakteristiky regulátora otáčok

Pre optimálne doladenie proporcionálneho a integračného zosilnenia PI regulátora je vhodné využiť prechodovú charakteristiku regulátora. Pre získanie priebehu otáčok BLDC motora sa využil pomocný DAC prevodník s veľkou frekvenciou, ktorého výstup sa zobrazoval na osciloskope. Jednotkový skok prechodovej charakteristiky sa vytvoril maximálnym vytočením bežca potenciometra, tak aby sa simulovalo skutočné zapojenie vysokootáčkového pohonu. Prvý oscilogram zobrazuje prechodovú charakteristiku regulátora otáčok pri prúdovom obmedzení nastavenom na hodnotu $I_{MAX} = 3 \text{ A}$ (Obr. 5.7). Tým sa dosiahlo, že paralelný regulátor prúdu nezasahuje do otáčkovej regulácie. Na oscilograme je vidieť, že pri dosiahnutí jednej tretiny otáčok sa mení proporcionálne zosilnenie PI regulátora otáčok, a tým sa mení aj strmosť prechodovej charakteristiky. Posledná šestina otáčok sa doregulováva pomaly, aby sa otáčky nedostali nad požadovanú hodnotu. Tým sa zabezpečila regulácia otáčok bez prekmitu. Druhý oscilogram zobrazuje prechodovú charakteristiku regulátora otáčok pri prúdovom obmedzení nastavenom na hodnotu $I_{MAX} = 0,4 \text{ A}$ (Obr. 5.8). Z oscilogramu je vidieť, že PI regulátor otáčok je ovplyvnený paralelným prúdovým obmedzením. Prechodová charakteristika sa značne spomalí a dosiahnu sa len polovičné otáčky. Na tomto oscilograme je prezentovaná funkčnosť paralelného prúdového obmedzenia.



Obr. 5.7 Meranie prechodovej charakteristiky regulátora otáčok bez vplyvu prúdového obmedzenia



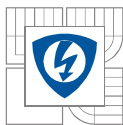
Obr. 5.8 Meranie prechodovej charakteristiky regulátora otáčok s vplyvom prúdového obmedzenia

6 ZÁVER

Výsledkom diplomovej práce na tému Riadiaci modul BLDC motora je funkčný hardvér a softvér trojfázového tranzistorového meniča, ktorý bude slúžiť na riadenie a reguláciu BLDC motora. Ako vreteno CNC frézovačky sa zvolil vysokootáčkový BLDC motor typu HXKJ DMW57314 s menovitým výkonom $P_N = 400$ W, s menovitými otáčkami $n_N = 12000$ ot./min a s menovitým napätím $U_N = 48$ V. Trojfázový menič je tvorený MOS-FET tranzistormi typu IRF540N a Schottkyho diódami typu MBR20150. Trojfázový tranzistorový menič je napájaný napäťovým medziobvodom tvoreným batériou elektrolytických kondenzátorov nabitých na napájacie napätie $U_N = 48$ V. Ako budič MOS-FET tranzistorov v zapojení trojfázového meniča je použitý izolovaný budič typu ISO5500. Vstupný signál do budiča je PWM signál vytvorený DSP procesorom. Výstupný signál je prúdovo posilnený dvojčinným emitorovým sledovačom a vedie na hradlo Gate MOS-FET tranzistora. Integrovaný budič obsahuje saturačnú a podpäťovú ochranu tranzistorov. Ako základný riadiaci a regulačný člen v zapojení vysokootáčkového pohonu s BLDC motorom je použitý DSP procesor typu TMS320F28069. DSP procesor spracováva vstupné signály žiadaných a meraných veličín a pomocou vopred naprogramovaného algoritmu vypočíta výstupnú striedu PWM signálu pre budiče MOS-FET tranzistorov. DSP procesor taktiež spracováva signály z Hallových snímačov BLDC motora a vyhodnocuje správny sled sekcií spínania tranzistorov v trojfázovom meniči. Tým je zabezpečená správna komutácia BLDC motora. Žiadanú hodnotu otáčok vyhodnocuje DSP procesor pomocou ADC prevodníka, ktorý sníma napätie na bežci potenciometra. Meranú hodnotu otáčok vyhodnocuje DSP procesor pomocou čítača impulzov Hallovho snímača BLDC motora. Meranú hodnotu prúdu vyhodnocuje DSP procesor pomocou ADC prevodníka, ktorý sníma napätie na bočníku, ktoré je následne zosilnené pomocou operačného zosilňovača. Pre vytvorenie nižších napätí ako je napájacie napätie sú v zapojení trojfázového tranzistorového meniča využívané jednokvadrantové znižujúce meniče, ktoré vytvárajú napätie s hodnotou $U = 4,8$ V a napätie s hodnotou $U = 15,9$ V. Pre vytvorenie napájacieho napätia pre DSP procesor s hodnotou $U = 3,3$ V je použitý lineárny stabilizátor napätia, ktorý je napájaný z jednokvadrantového znižujúceho meniča s výstupným napätím $U = 4,8$ V. Pre vytvorenie galvanicky oddeleného napájacieho napätia pre budiče MOS-FET tranzistorov je zapojený jednočinný priepustný menič s demagnetizáciou do Zenerovej diódy. V meniči nie je zapojená výstupná tlmivka, a preto slúži ako špičkový detektor, ktorý má na výstupe rovnaké napätie ako na vstupe, a to výstupné napätie z jednokvadrantového znižujúceho meniča s hodnotou $U = 15,9$ V.

V diplomovej práci je popísaná realizácia obvodového zapojenia trojfázového tranzistorového meniča pre vysokootáčkový BLDC motor. Na priložených obrázkoch je vidieť finálna realizácia dosky plošných spojov a jednotlivé usporiadania súčiastok.

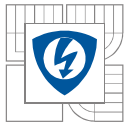
Diplomová práca sa zaoberá aj kompletným popisom softvéru, ktorý bol naprogramovaný do DSP procesora. Program je možné rozdeliť na hlavný program a podprogramy. Hlavný program sa skladá z inicializácie periférií a knižnic, ktoré vytvoril výrobca DSP procesora, a z nekonečnej slučky, v ktorej prebieha neustále snímanie signálov z Hallových senzorov a prepínanie PWM modulátorov tak, aby sa vykonávala správna komutácia vysokootáčkového BLDC motora. Regulácia prebieha v podprograme prerušenia od ADC prevodníka, ktorý sa vykoná vždy v strede impulzu generovaného PWM modulátormi. V prerušení sa načítajú a matematicky spracujú žiadané a namerané hodnoty potrebné pre regulátory a následne prebehne regulácia otáčok pomocou PI regulátora otáčok s paralelným PI regulátorom, ktorý slúži ako prúdové obmedzenie. Týmto programom je zabezpečené optimálne riadenie a regulácia BLDC motora.



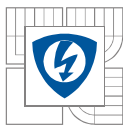
Diplomová práca končí meraniami na osciloskope, ktoré slúžia na overenie komutácie a priebehu regulácie otáčok BLDC motora s paralelným prúdovým obmedzením. Oscilogramami je ukázaná správna funkcia vysokootáčkového pohonu s BLDC motorom, ktorý bude slúžiť ako vreteno CNC frézovačky. Všetky navrhnuté schémy zapojenia a dosky plošných spojov sú aj s programom pre DSP procesor priložené ako prílohy diplomovej práce.

LITERATÚRA

- [1] HENDERSHOT, J a T MILLER. Design of brushless permanent-magnet machines. Venice, Florida: Motor Design Books, c2010, xxiv, 798 p. ISBN 09-840-6870-8.
- [2] SKALICKÝ, Jiří. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Elektrické regulované pohony [online]. Brno, 2007, 123 s. [cit. 2015-10-03]. Dostupné z: <http://www.feec.vutbr.cz>
- [3] ANALOG DEVICES. Data Sheet: AD823A Wide Supply Dual, 17 MHz, Rail-to-Rail FET Input Amplifier [online]. 2012, 20 s. [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD823A.pdf>
- [4] DIODES INCORPORATED. Data Sheet MBR20150 20A SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER [online]. 2011, 4 s. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.diodes.com/files/datasheets/ds31498.pdf>
- [5] INTERNATIONAL RECTIFIER. Data Sheet: IR4426 /IR4427 /IR4428 DUAL LOW SIDE DRIVER [online]. 2008, 12 s. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir4426.pdf>
- [6] INTERNATIONAL RECTIFIER. Data Sheet IRF540N: HEXFET® Power MOSFET [online]. 2001, 9 s. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf540n.pdf>
- [7] INTERNATIONAL RECTIFIER. Data Sheet: IRLML0100TRPbF HEXFET® Power MOSFET [online]. 2009, 10 s. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlml0100pbf.pdf>
- [8] MICROCHIP TECHNOLOGY. Application Note AN885: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. 2003, 20 s. [cit. 2015-10-03]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [9] NXP SEMICONDUCTORS. Data Sheet: BAV23 series Dual high-voltage switching diodes [online]. 2010, 13 s. [cit. 2015-10-08]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BAV23_SER.pdf
- [10] STMICROELECTRONICS. Data Sheet: ST1S14 Up to 3 A step-down switching regulator [online]. 2013, 46 s. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00285678.pdf>
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. C2000 Systems and Applications Digital Motor Control: Software Library: F2805x Drivers [online]. 2012, 39 s. [cit. 2015-10-03]. Dostupné z: <http://www.ti.com/>
- [12] TEXAS INSTRUMENTS. Data Sheet: ISO5500 2.5-A Isolated IGBT, MOSFET Gate Driver [online]. 2015, 43 s. [cit. 2015-10-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso5500.pdf>
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. Data Sheet: LM1117-N/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator [online]. 2013, 33 s. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117-n.pdf>



-
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. Data Sheet: TMS320F2806x Piccolo™ Microcontrollers [online]. 2014, 177 s. [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28069.pdf>
- [15] VISHAY SEMICONDUCTORS. Data Sheet: VS-30BQ100-M3 Schottky Rectifier, 3 A [online]. 2010, 6 s. [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/iv/Document/e3f78f6de7879b767a0fd12e1940b825/VS-30BQ100-M3-9AT.pdf>



ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Schéma zapojenia DSP procesora

Príloha 2: Schéma zapojenia trojfázového tranzistorového meniča

Príloha 3: Schéma zapojenia budičov tranzistorov

Príloha 4: Schéma zapojenia pomocných napájacích zdrojov napätia

Príloha 5: Doska plošných spojov – vrchná časť spojov

Príloha 6: Doska plošných spojov – spodná časť spojov

Príloha 7: Doska plošných spojov – vrchná časť súčiastok

Príloha 8: Doska plošných spojov – spodná časť súčiastok

Príloha 9: Zoznam súčiastok

Príloha 10: Program pre DSP procesor