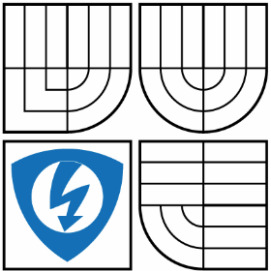


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ BLDC MOTORU

BLDC DRIVE CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

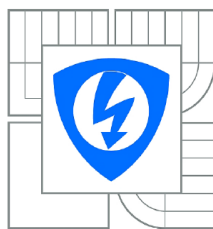
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ HAVLÍČEK

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ OTAVA

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jiří Havlíček
Ročník: 3

ID: 155511
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Řízení BLDC motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je řízení rychlosti BLDC motoru a jeho přípravku, který bude možné použít v laboratorní výuce.

1. Seznamte se s problematikou řízení BLDC (elektricky komutovaného) motoru a existujícím přípravkem s mikrokontrolérem pro jeho řízení.
2. Realizujte propojení přípravku se systémem Matlab/Simulink pomocí vstupně-výstupní karty Humusoft MF-624.
3. Realizujte otáčkovou regulaci pomocí PI regulátoru.
4. Součástí přílohy bude vzorové vypracování laboratorní úlohy se zmíněným přípravkem (zadání, teoretický úvod, vypracování, závěr).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SKALICKÝ, J. Elektrické regulované pohony. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

[2] FRGAL, Petr. FREESCALE SEMICONDUCTOR. 3-Phase BLDC/PMSM Low-Voltage Motor Control Drive: User Manual. 2009.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Otava

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou senzorového řízení BLDC motoru pomocí Halloových snímačů. BLDC motor je připojen k 3 fázové nízkonapěťové desce od firmy Freescale, která je přímo přizpůsobena k řízení těchto motorů. Tato 3 fázová nízkonapěťová deska je řízena signálovým mikrokontrolérem MC56F8006. Další částí práce je realizace propojení tohoto přípravku s programem Matlab/Simulink pomocí měřicí karty Humusoft MF 624. Pro výslednou regulaci je využito kaskádní řízení, proudová a otáčková smyčka. Proudová smyčka je realizovaná v signálovém mikrokontroléru a otáčková smyčka v programu Simulink.

Klíčová slova

BLDC motor, Senzorové řízení motorů, Hallova sonda, střída, identifikace parametrů

Abstract

The bachelor thesis is focused on problems of sensor control of Brushless DC Electric motor (BLDC) using hall-effect sensors. The BLDC motor is connected to 3-Phase low-voltage board which was produced by Freescale Semiconductor, Inc. The board is adapted to control electrical motors by MC56F8006 signal microcontroller. The next part is devoted to implementation of interconnection of the machine with the Matlab/Simulink programme using the MF 624 multifunction I/O card. Cascaded control, current and speed loops are used for the final configuration. The former loop is realized in the signal microcontroller, the latter one in the Simulink programme.

Keywords

BLDC motor, Sensor motor control, Hall probe, Duty, parameter identification

Bibliografická citace:

HAVLÍČEK, J. *Řízení BLDC motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 51s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Lukáš Otava.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízení BLDC motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **25. května 2015**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: **25. května 2015**

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	9
Úvod	10
1 Teoretický rozbor	11
1.1 Konstrukce BLDC motoru	11
1.2 Řízení BLDC motoru	11
1.2.1 Komutace	12
1.2.2 Unipolární spínání.....	12
1.2.3 Bipolární spínání.....	13
1.2.4 Komplementární spínání.....	13
1.2.5 Senzorové řízení	13
1.3 Matematický model.....	14
1.4 Kaskádní řízení.....	16
2 Popis hardware	17
2.1 Třífázová BLDC nízkonapěťová deska.....	18
2.1.1 Vlastnosti	18
2.1.2 Parametry BLDC motoru.....	18
2.2 Dceřiná deska	18
2.3 Měřicí karta Humusoft MF 624	19
2.3.1 Vlastnosti	19
3 Software.....	20
3.1 Snímání polohy	21
3.2 Komutace	22
3.3 Měření proudu.....	24
3.4 PI regulátor proudu	25
3.5 Měření otáček.....	29
3.6 Převod signálu žádané veličiny.....	30
4 Propojení přípravku	33
5 PI regulátor otáček.....	36
Závěr	40
Literatura	42
Seznam symbolů a zkratk	43
Přílohy	44
A. Obsah CD.....	44
B. Laboratorní úloha	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Vnitřní uspořádání EC motoru	11
Obrázek 2 Unipolární spínání 1. Příklad.....	12
Obrázek 3 Unipolární spínání 2. Příklad.....	12
Obrázek 4 Bipolární spínání 1. Příklad.....	13
Obrázek 5 Bipolární spínání 2. Příklad.....	13
Obrázek 6 Snímání polohy rotoru.....	14
Obrázek 7 Model DC motoru	15
Obrázek 8 Struktura kaskádní regulace	16
Obrázek 9 Koncepce zařízení	17
Obrázek 10 Vývojový diagram programu	21
Obrázek 11 Unipolární spínání měniče	22
Obrázek 12 Vývojový diagram komutace	24
Obrázek 13 Detail PWM signálu a ADC přerušení	25
Obrázek 14 Přejížděvací charakteristika motoru se zablokovaným rotorem	26
Obrázek 15 Teoretická odezva navrženého PI regulátoru na jednotkový skok žádané veličiny.....	26
Obrázek 16 Vývojový diagram přerušení od A/D převodníku.....	28
Obrázek 17 Odezva proudové smyčky	29
Obrázek 18 Vývojový diagram měření otáček	30
Obrázek 19 Vývojový diagram přerušení od časovače	31
Obrázek 20 Přehled jednotlivých přerušení.....	32
Obrázek 21 Schéma propojení přípravku	33
Obrázek 22 Subsystém k měření otáček	34
Obrázek 23 Subsystém nastavující žádaný proud.....	34
Obrázek 24 Subsystém PI regulátor otáček	35
Obrázek 25 Pracovní prostředí řízení v Simulinku.....	35
Obrázek 26 Přejížděvací charakteristika systému	36
Obrázek 27 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích otevřené smyčky	38
Obrázek 28 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině otevřené smyčky.....	39
Obrázek 29 Odezva na jednotkový skok otáčkové smyčky	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry motoru	18
Tabulka 2 Přepočítané hodnoty Hallových snímačů	22
Tabulka 3 Komutační vektory	23
Tabulka 4 Komutační tabulka vektorů v závislosti na pozici rotoru	23
Tabulka 5 Doporučené parametry zásoby stability [4]	37

ÚVOD

Laboratorní úloha, která je výsledkem této bakalářské práce, by měla sloužit jako pomůcka v předmětu Řízení a regulace 2. Jejím hlavním cílem bude pochopení problematiky analýzy systému a jeho následné regulaci.

Daným systémem je přípravek s BLDC motorem, který řídí signálový mikrokontrolér MC56F8006. Přípravek je navržený firmou Freescale. Jedná se o 3 fázovou jednoúčelovou nízkonapěťovou desku, která je přímo přizpůsobená k řízení BLDC motorů.

Úkolem bylo navrhnout algoritmus senzorového řízení BLDC motoru pomocí Hallových snímačů, které jsou součástí motoru, v programu CodeWarrior. Aby bylo možné BLDC motor řídit proudem, byl vytvořen PI regulátor proudu, jehož výstup se přepočítává na střihu PWM signálu, kterou je řízený tranzistorový můstek.

Vzhledem k zapojení přípravku, musela být vymyšlena komunikace se vstupně výstupní kartou Humusoft MF624. Výstupem z přípravku jsou otáčky, realizované pomocí virtuálního enkodéru a vstupem je PWM signál, který je úměrný žádanému proudu.

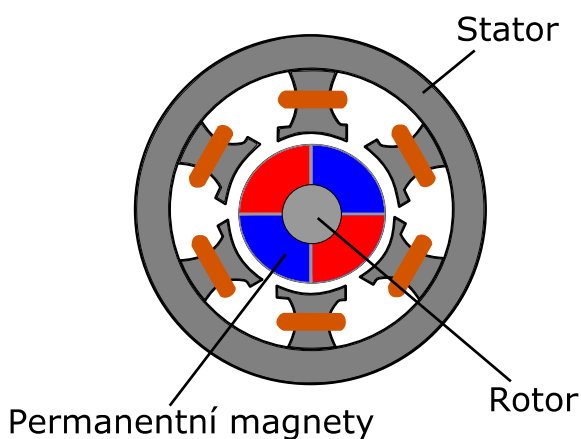
Vstupně výstupní karta Humusoft MF624 spolupracuje s programem Matlab/Simulink, ve kterém byla vytvořena otáčková smyčka regulace s PI regulátorem otáček. Jedná se tedy o kaskádní regulaci otáčkové a proudové smyčky.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

BLDC, někdy nazývaný EC motor, patří mezi synchronní bezkartáčové motory. Jedná se o bezkartáčový elektronicky komutovaný motor. Díky své spolehlivosti a minimálnímu rušení se upřednostňuje před klasickými stejnosměrnými motory. Dosahuje rychlostí až 10000 ot/min. [1]

1.1 Konstrukce BLDC motoru

Proti DC motoru je vinutí navinuto na statoru, obvykle třífázově, zapojené do hvězdy nebo do trojúhelníku. Permanentní magnety, které vytváří konstantní magnetické pole ve vzduchové mezeře, jsou umístěny na rotoru. U DC motorů komutaci obstarává mechanický komutátor, kdežto u BLDC motorů je komutaci třeba provádět elektronicky. K tomu je zapotřebí znát polohu rotoru. Poloha se snímá nejčastěji Hallovými snímači nebo pomocí resolveru, inkrementálního snímače atd., dle požadavků na přesnost. Při vyšších otáčkách se využívá bezsenzorového řízení, kde polohu určujeme z naindukovaného napětí na odpojené cívce. [1]



Obrázek 1 Vnitřní uspořádání EC motoru

1.2 Řízení BLDC motoru

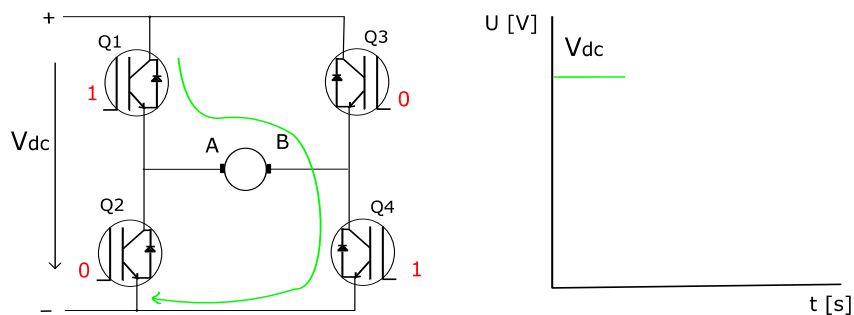
Aby měl BLDC motor plynulý chod, maximální účinnost a daný moment, je potřeba zajistit patřičnou komutaci. Díky uspořádanému rozmístění permanentních magnetů můžeme cívky napájet obdélníkovým napětím, za pomoci 3fázového měniče, kde se spínají jednotlivé tranzistory. Pro správný chod motoru postačí zajistit šest poloh. [2]

1.2.1 Komutace

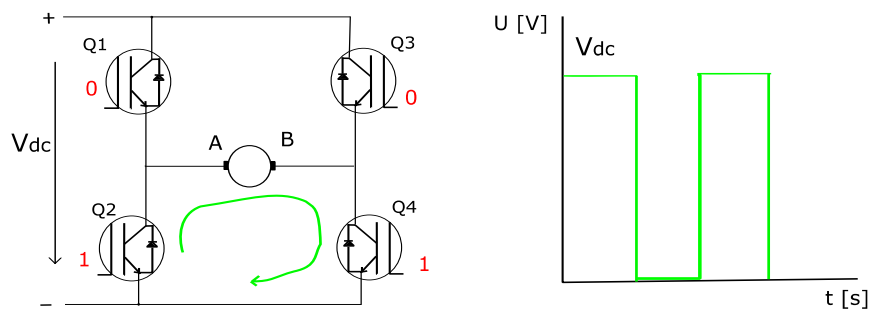
Pomocí šesti tranzistorů se přepíná proud do jednotlivých vinutí v závislosti na poloze rotoru. Střední hodnota napětí, od které se odvíjí rychlost otáček, se řídí pulsně šířkovou modulací. Moment, který působí na motor, je úměrný proudu protékající vinutími. Zapojení měniče se shoduje s frekvenčním měničem pro asynchronní motor s tím rozdílem, že u asynchronního motoru se napájí všechny 3 fáze sinusovým proudem a BLDC motor má jednu fázi vždy u obdélníkového proudu odpojenou. [3]

1.2.2 Unipolární spínání

Pro jednoduchost budeme uvažovat o H můstku pro DC motor. V prvním případě je na svorkách cívky připojené napětí V_{dc} , jak je zřejmé z obrázku č. 2, kde jsou sepnuté tranzistory Q_1 a Q_4 v druhém případě (obrázek č. 3) je na cívku připojené nulové napětí, tedy svorky zkratujeme sepnutím tranzistorů Q_2 a Q_4 . Tranzistory v jedné větvi jsou na sobě nezávislé, ale nesmí nastat případ, kdy budou oba dva sepnuté společně. [1] U problematiky pohonů je toto řešení lepší z důvodu proudového zvlnění oproti bipolárnímu spínání.



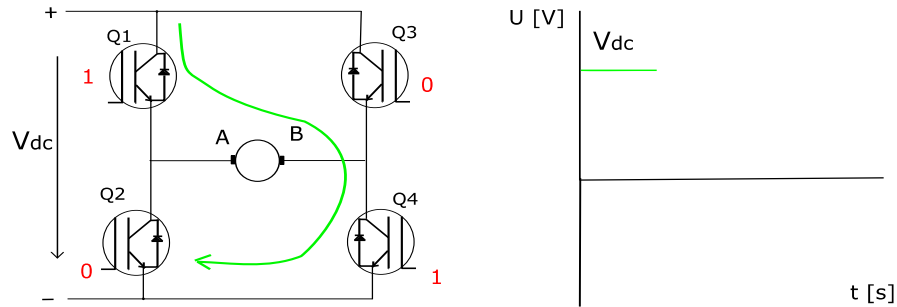
Obrázek 2 Unipolární spínání 1. Příklad



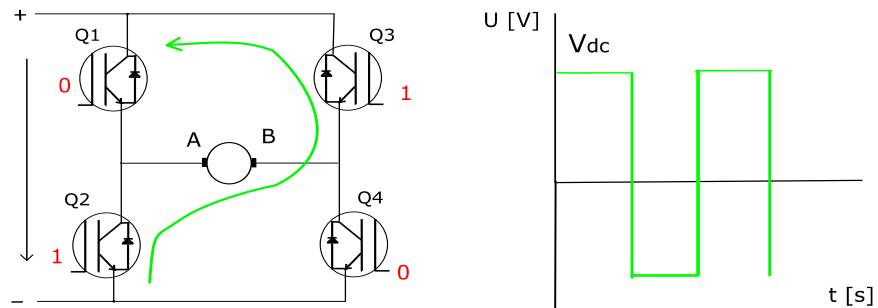
Obrázek 3 Unipolární spínání 2. Příklad

1.2.3 Bipolární spínání

V případě tohoto spínání je nejprve na svorkách cívky připojeno kladné napětí V_{dc} , kde jsou sepnuté tranzistory Q_1 a Q_4 . Poté je na cívku připojené záporné napětí V_{dc} , kde jsou sepnuté tranzistory Q_2 a Q_3 . Tranzistory v jedné větvi jsou na sobě nezávislé, ale nesmí nastat případ, kdy budou oba dva sepnuté společně. [1]



Obrázek 4 Bipolární spínání 1. Případ



Obrázek 5 Bipolární spínání 2. Případ

1.2.4 Komplementární spínání

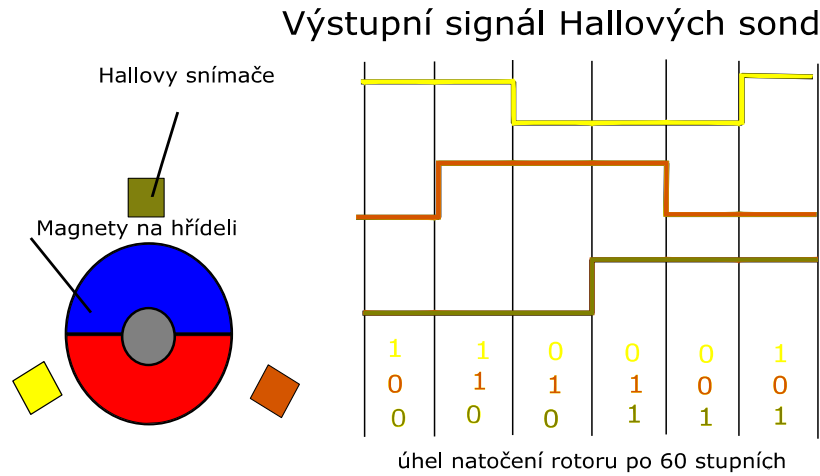
Při tomto spínání jsou tranzistory v jedné větvi na sobě závislé. Když jeden z tranzistoru je ve stavu ON, druhý je ve stavu OFF. Při přepínání do opačného stavu se musí vkládat do PWM tzv. „deadtime“ kvůli parazitní kapacitě tranzistoru, aby nedošlo ke zkratu. Deadtime je doba, po kterou jsou oba tranzistory vypnuté. Odvíjí se od použitých tranzistorů. [1]

1.2.5 Senzorové řízení

Senzorového snímání polohy se využívá u pohonů, kde je potřeba řídit motor od nízkých otáček jako jsou např. servopohony.

V naprosté většině se využívá tři Hallovy senzory, které se umisťují na stator

a jsou od sebe pootočený po 120 elektrických stupních. U jednopólového motoru dostáváme informaci o poloze po 60° u dvoupólového motoru dostáváme informaci o poloze po 30°. [2]



Obrázek 6 Snímání polohy rotoru

1.3 Matematický model

Tyto napěťové rovnice platí, jestliže odpory všech vinutí se rovnají. Ty jsou převzaté od Prof. Ing. Jiřího Skalického, CSc. [3]

$$\begin{aligned}
 u_x &= Ri_x + \frac{d\psi_x}{dt} \\
 u_y &= Ri_y + \frac{d\psi_y}{dt} \\
 u_z &= Ri_z + \frac{d\psi_z}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Za předpokladu, že všechny indukčnosti si jsou rovný, platí tyto rovnice.

$$\begin{aligned}
 \Psi_x &= Li_x + \Psi_{Bx}(\vartheta) \\
 \Psi_y &= Li_y + \Psi_{By}(\vartheta) \\
 \Psi_z &= Li_z + \Psi_{Bz}(\vartheta)
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Pro vnitřní elektromagnetický moment platí

$$m_i = i_x \frac{d\psi_{Bx}}{d\vartheta} + i_y \frac{d\psi_{By}}{d\vartheta} + i_z \frac{d\psi_{Bz}}{d\vartheta}
 \tag{1.3}$$

Z napěťových rovnic můžeme odvodit rovnici pro celkové napětí

$$U = 2Ri + 2L \frac{di}{dt} + \omega \frac{d\psi_{Bx}}{d\vartheta} - \omega \frac{d\psi_{By}}{d\vartheta}
 \tag{1.4}$$

Pro BLDC motor v dané poloze platí $i_x = -i_y = i, i_z = 0$ funkce spřažených toků x a y mají lineární průběh, ale s opačným sklonem. V absolutní hodnotě mají jejich derivace stejnou hodnotu, ale opačné znaménko. Nahradíme-li tuto derivaci v absolutní hodnotě momentovou konstantou C_e EC motoru, můžeme rovnice (1.3), (1.4) napsat ve tvaru:

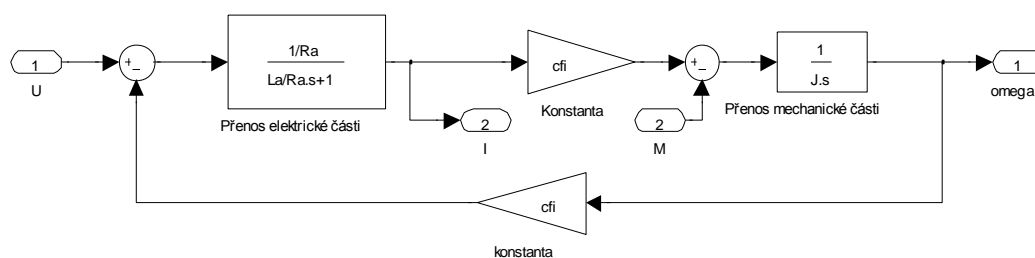
$$U = 2Ri + 2L \frac{di}{dt} + 2C_e \omega \quad (1.5)$$

$$m = 2C_e i \quad (1.6)$$

Pro rovnici mechanické rovnováhy platí

$$m = J \frac{d\omega}{dt} + M_0 \quad (1.7)$$

- U - celkové napětí
- u - napětí na vinutí
- i - elektrický proud
- Ψ - spřažený tok
- L - indukčnost
- Ψ_B - funkce spřaženého toku
- ϑ - úhel natočení rotoru od statoru
- ω - rychlost otáčení motoru
- J - moment setrvačnosti
- M_0 - statický moment odporu
- C_e - mechanická konstanta



Obrázek 7 Model DC motoru

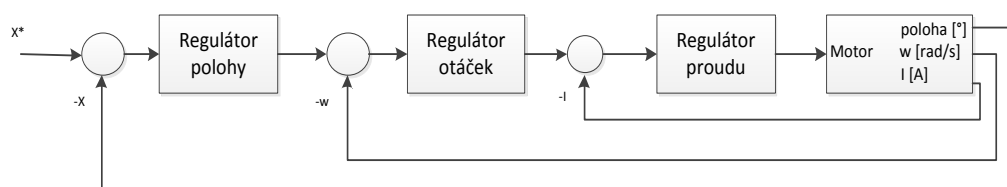
1.4 Kaskádní řízení

Kaskádní řízení v problematice motorů se nejčastěji používá u servomechanismu. Je tvořeno polohovou smyčkou s podřízenou otáčkovou smyčkou a na nejnižší úrovni je proudová smyčka. [3]

Smyčka nejnižší úrovně slouží jako ochrana před přetížením, aby omezila maximální moment. Žádanou hodnotou této smyčky je proud a na výstupu regulátoru je napětí. U tranzistorových měničů je to hodnota střídý PWM signálu.

Vstupem otáčkové smyčky jsou žádané otáčky a na výstupu otáčkového regulátoru je proud. [3]

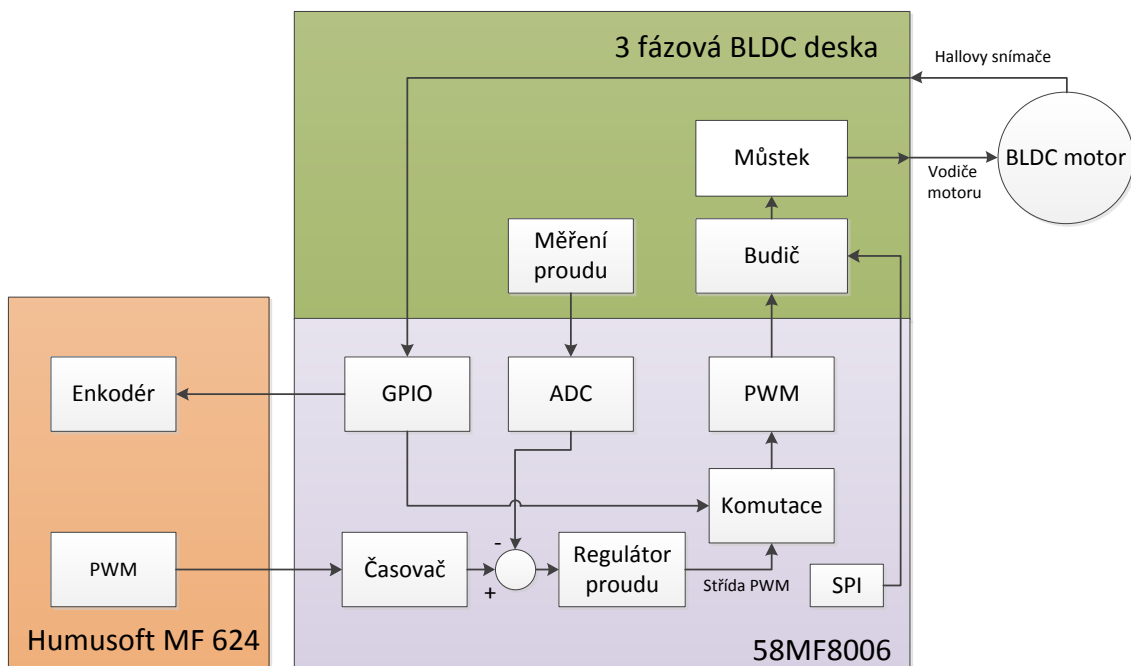
U polohové smyčky je žádanou hodnotou poloha a výstupem jsou otáčky. Strukturu této regulace můžete vidět na obrázku č. 8. [3]



Obrázek 8 Struktura kaskádní regulace

2 POPIS HARDWARE

Koncepce zařízení, která je na obrázku č. 9, byla zvolena s ohledem na zapojení desky a periferie mikrokontroléru. Deska, na které je umístěný mikrokontrolér, nazývaná „dceřiná deska“, je připojena k 3 fázové desce pomocí dvou dvacetipinových konektorů. V mikroprocesoru byly využity tři periferie ADC k měření proudu, šest PWM kanálů k řízení tranzistorového můstku, který je buzen budičem MC33927. Procesor komunikuje s tímto budičem přes SPI. GPIO využívají tři Hallovy snímače, k určování polohy rotoru. Páčkový přepínač určuje, zda se nacházíme v ladícím modu nebo zda komunikujeme s měřicí kartou Humusoft MF624 a testovací body slouží k měření jednotlivých přerušení. Kanál A, B, virtuálního enkodéru vytvořeného v mikrokontroléru, spojuje zařízení s enkodérem měřicí karty Humusoft MF624 pro měření otáček. K určení střídy PWM signálu od měřicí karty Humusoft MF624 slouží periferie časovače.



Obrázek 9 Koncepce zařízení

2.1 Třífázová BLDC nízkonapěťová deska

Jedná se o jednoúčelovou desku pro řízení třífázových synchronních motorů s permanentními magnety.

2.1.1 Vlastnosti

- Napájecí napětí 12- 24V
- Výstupní proud 4A
- Třífázová nadproudová ochrana
- Třífázová měření proudu bočnickem
- Třífázová měření napětí pro metodu back- EMF
- Snímání polohy pomocí Hallových sond
- 2 konektory pro dceřinu desku
- 6 LED diod připojené na PWM výstupy
- 2 tlačítka a kolébkový přepínač
- Reset tlačítko

2.1.2 Parametry BLDC motoru

Tabulka 1 Parametry motoru

Typ motoru	LINIX 45WN24-40 BLDC Motor
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovité otáčky	4000 ot/min
Jmenovitý proud	2,34 A
Jmenovitý moment	0,0924 Nm

2.2 Dceřiná deska

Slouží k řízení 3 fázové BLDC desky. JTAG konektor byl využit k programování signálového mikrokontroléru MC56F8006 v prostředí CodeWarrior, za pomoci USB TAP, který umožňuje komunikaci v reálném čase s programem Freemaster.

Pomocí JTAG konektoru je mikrokontrolér připojen s kartou Humusoft MF624.

2.3 Měřicí karta Humusoft MF 624

Jde o měřicí kartu připojitelnou k počítači pomocí sběrnice PCI. Hlavní uplatnění má v laboratoři, kdy je potřeba zobrazit v PC hodnoty senzorů, jak analogové, tak i digitální signály. Karta může být využita i k řízení nějakého akčního členu.

K propojení s přípravkem bylo využito časovače v PWM režimu. Vstupy inkrementálního snímače, lze zapojit jako symetrické nebo nesymetrické s maximální vstupní frekvencí 2.5MHz a rozlišením 32bit.

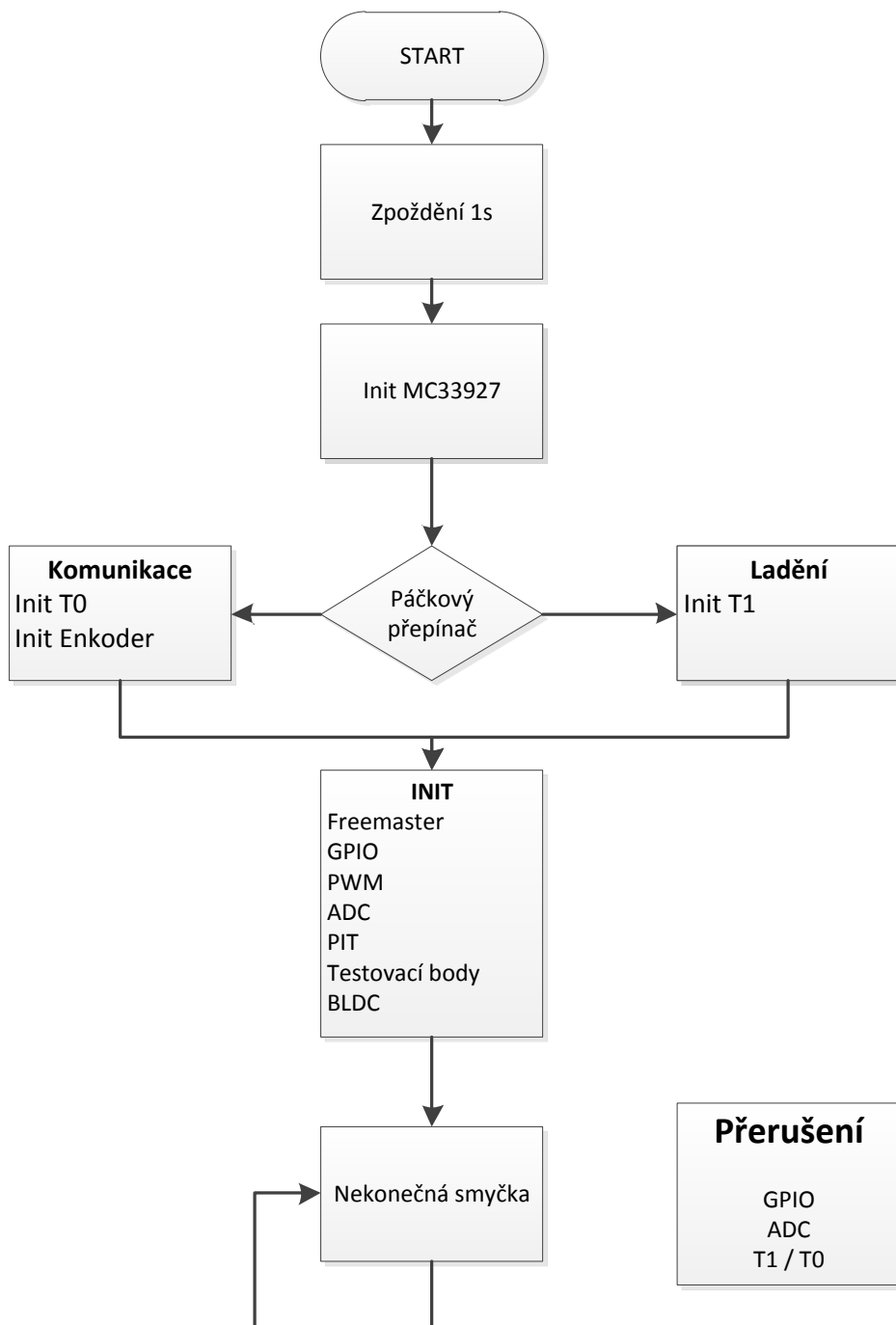
2.3.1 Vlastnosti

- 8 digitálních vstupů (TTL)
- 8 digitálních výstupů (TTL)
- 8 14bitových A/D převodníků ($\pm 10V$)
- 8 14bitových D/A převodníků ($\pm 10V$)
- 4 časovače/čítače
- 4 vstupy inkrementálních snímačů

3 SOFTWARE

Program pro signálový mikrokontrolér je psaný v jazyce C a programovaný v prostředí Codewarrior. Konektor JTAG na dceřiné desce je využit k propojení s měřicí kartou, nebo k programování pomocí USB TAB. Páčkový přepínač rozhoduje o volbě propojení. Je-li k přípravku připojený USB TAB, nacházíme se ve fázi ladění a páčkový přepínač musí být sepnutý. V tomto režimu je vstupní PWM signál od měřicí karty připojen na tlačítko UP pomocí připájeného vodiče. V režimu komunikace, kde je páčkový přepínač ve středové poloze, není možno program ladit, protože k propojení přípravku je využit konektor JTAG.

Po spuštění přípravku musí být vloženo zpoždění, aby proběhla správná inicializace tranzistorového budiče, který je nakonfigurovaný přes SPI. Jestliže je přepínač ve středové poloze, nakonfiguruje se vstup časovače T0 a výstupní dva piny enkodéru, které jsou součástí JTAG konektoru. Je-li páčkový přepínač sepnutý tak, jsou piny JTAG konektoru nastaveny ke komunikaci s USB TAB. Aby bylo možno ladit program i s připojeným signálem od měřicí karty bylo využito Up tlačítka, které lze nakonfigurovat jako vstup časovače T1. Potom konfigurace probíhá v pořadí, jak je uvedeno na obrázku č. 10 s tím, že součástí inicializace ADC je i nastavení hodnot pro PI regulátor proudu. Do nekonečné smyčky vstupují asynchronně přerušení od časovače, GPIO a ADC, jejichž popis funkcí je v podkapitolách.



Obrázek 10 Vývojový diagram programu

3.1 Snímání polohy

Poloha je snímána pomocí Hallových snímačů, které jsou součástí motoru. Snímače jsou rozmístěny po 120 °. Díky tomu, že motor je dvoupólový dosahujeme 30° přesnosti polohy rotoru. V programu byla vytvořena funkce (Hall_sond), která vrací hodnotu polohy v dekadické podobě, jak lze vidět v tabulce č. 2.

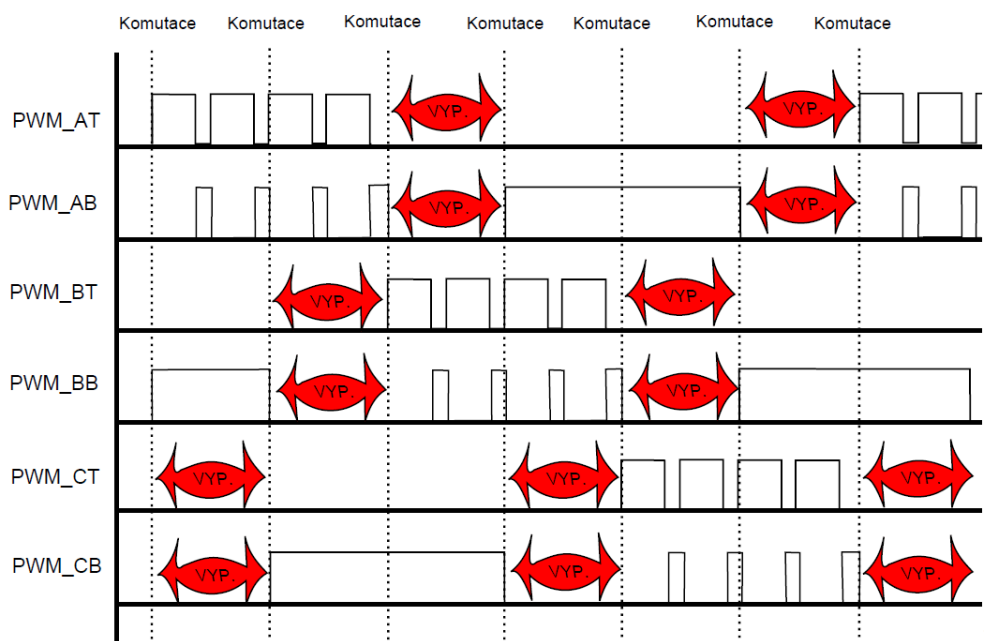
Tabulka 2 Přepočítané hodnoty Hallových snímačů

Úhel natočení [°]	hall C	hall B	hall A	dek. hodnota
0	0	0	1	1
30	1	0	1	5
60	1	0	0	4
90	1	1	0	6
120	0	1	0	2
150	0	1	1	3
180	0	0	1	1
210	1	0	1	5
240	1	0	0	4
270	1	1	0	6
300	0	1	0	2
330	0	1	1	3

3.2 Komutace

K řízení šesti tranzistorů obsahuje mikrokontrolér šest PWM výstupů, které byly nastaveny jako tři komplementární páry. Kvůli opačné logice spodních tranzistorů bylo zapotřebí signály pro tyto tranzistory invertovat.

Spínání můstku bylo zvoleno unipolární s frekvencí 20 kHz. Způsob tohoto spínání můžeme vidět na obrázku č. 11. Aby nenastal zkrat, při přepínání spodního a horního tranzistoru, tak PWM periferie vkládá tzv. deadtime 1 μ s. Deadtime je doba, po kterou jsou oba tranzistory vypnuté. Toto ošetření obsahuje i budič pro tranzistory.



Obrázek 11 Unipolární spínání měniče

Aby bylo na jednotlivých fázích přiloženo správné napětí, byla vytvořena tabulka č. 3, která kvůli přehlednosti přiřadí všem kombinacím napájení název. Tyto názvy vektorů se používají v tabulce č. 4, kde podle požadovaného směru v závislosti na poloze se zvolí daný vektor k následné komutaci motoru. Pro jeden směr odpovídá pozice přímo danému případu u struktury switch v jazyce C, který prakticky přepíná jednotlivé fáze a nastavuje A/D převodník, kterým se bude měřit proud. U druhého směru se pozice přepočítává pomocí jednořádkového pole `dekode_pozice [] = {0, 6, 4, 6, 2, 1, 3, 0}`. Na obrázku č. 12 můžeme vidět vývojový diagram komutace.

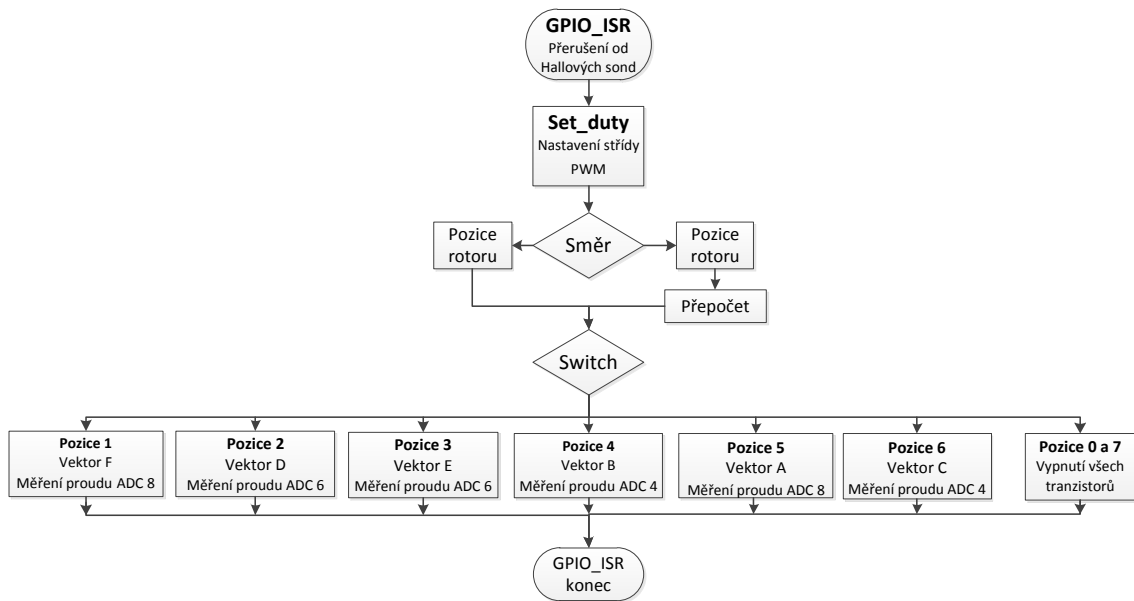
Tabulka 3 Komutační vektory

fáze A	fáze B	fáze C	vektor
NC	+Vcc	-Vcc	A
-Vcc	NC	+Vcc	B
-Vcc	+Vcc	NC	C
NC	+Vcc	-Vcc	D
+Vcc	NC	-Vcc	E
+Vcc	-Vcc	NC	F

NC nepřipojená fáze
 +Vcc fáze připojená na kladné napětí
 -Vcc fáze připojená na záporné napětí

Tabulka 4 Komutační tabulka vektorů v závislosti na pozici rotoru

	1 směr	2 směr
pozice	vektor	vektor
5	A	D
4	B	C
6	C	F
2	D	A
3	E	B
1	F	C



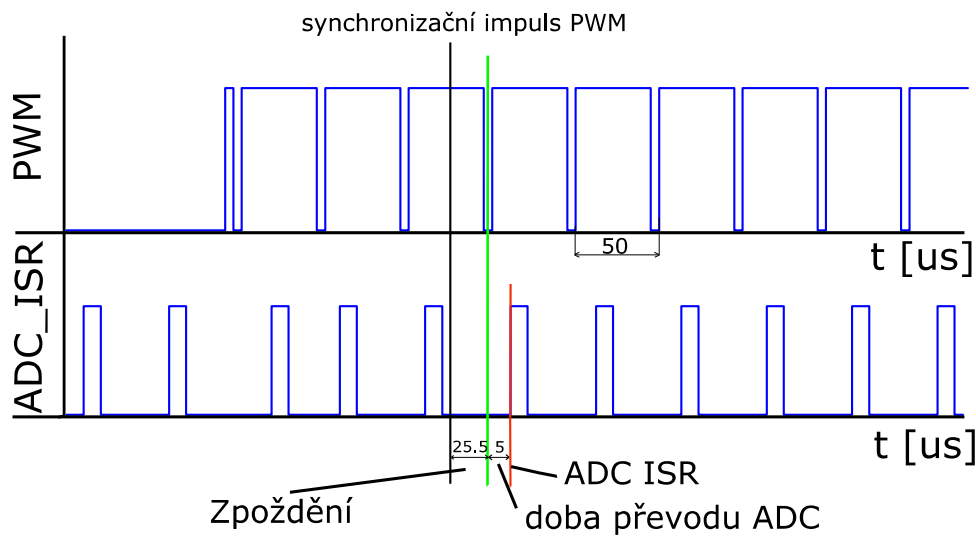
Obrázek 12 Vývojový diagram komutace

3.3 Měření proudu

Proud je měřen pomocí A/D převodníku na odporech v každé větvi měniče. Chceme-li, aby byl proud měřen ve chvíli, kdy jsou sepnuté spodní dva tranzistory, musíme vložit zpoždění od synchronizačního impulsu PWM signálu, které zajišťuje PDB. Na obrázku č. 13 lze vidět PWM signál horního tranzistoru a přerušení od A/D převodníku. Zpoždění je vloženo, aby nenastávalo měření ve chvíli, kdy nastává přechodový děj při sepnutí tranzistoru. Díky tomu, že PWM signál je středově centrován a tranzistory jsou v komplementárním režimu s periodou $50 \mu\text{s}$, je zaručeno po vložení $25,5 \mu\text{s}$ zpoždění, že se vždy bude měřit ve chvíli, když je sepnutý spodní tranzistor, který je řízený PWM signálem. To ovšem neplatí, pokud je nastavená maximální střída, kdy je horní tranzistor stále sepnutý a spodní stále vypnutý. Výpočet zpoždění je podle vzorce č. (3.1). Hodnota, která se zadá do registru PDBdelay se vypočte dle vzorce č. (3.2). A/D převodník má dvanáctibitové rozlišení. Výsledek je posunut o tři bity doleva, proto jsou poslední tři bity vždy nulové. V závislosti na směru otáčení se určuje znaménko proudu. Výsledný formát proudu $\pm 2^{14}$ se zajistil odečtením hodnoty 2^{14} od A/D převodníku, což odpovídá proudu $\pm 4 \text{ A}$. Knihovna PI regulátoru počítá s šestnáctibitovým fractional formátem, kde šestnáctý bit je znaménkový. Výsledná hodnota proudu $\pm 4 \text{ A}$ odpovídá ve fractional formátu hodnotě $\pm 0,5$.

$$\text{zpoždění} = \frac{\text{periodaPWM} + \text{deadtime}}{2} = \frac{50 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6}}{2} = 25,5 \mu\text{s} \quad (3.1)$$

$$PDBdelay = \frac{\text{zpoždění}}{\text{systémové hodiny}} = \frac{25,5 \cdot 10^{-6}}{31,25 \cdot 10^{-9}} = 816 [-] \quad (3.2)$$



Obrázek 13 Detail PWM signálu a ADC přerušení

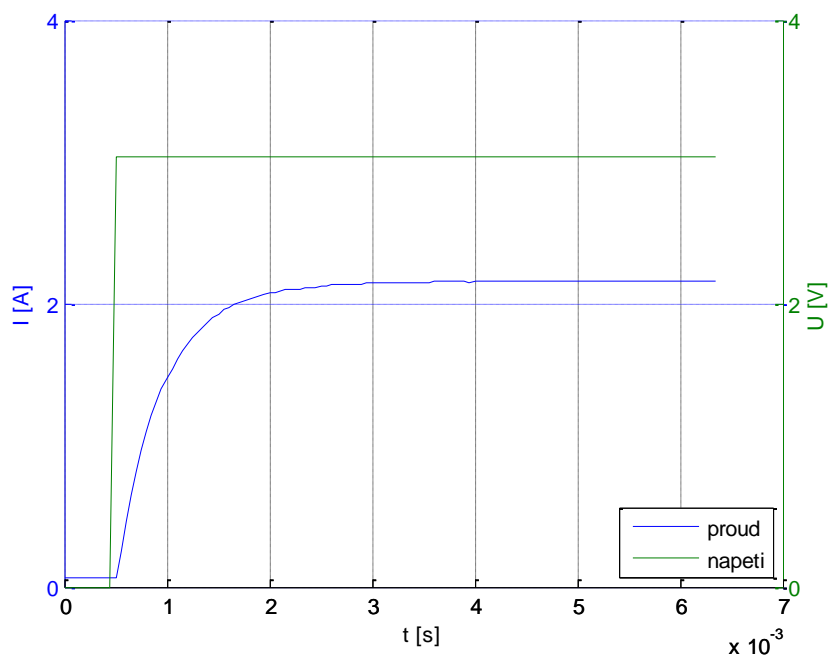
3.4 PI regulátor proudu

K analýze systému, což je BLDC motor, posloužil program Freemaster recorder, který vzorkoval hodnoty proudu a napětí každých 50 μs na konci přerušení od A/D převodníku. Naměřenou přechodovou charakteristiku při zablokovaném rotoru lze vidět na obrázku č. 14, ze kterého byl určený systém č. (3.3). Systém má zesílení 0,7068 a časovou konstantu 392 μs . Dopravní zpoždění 50 μs je viditelné po přiblížení přechodové charakteristiky.

$$F_{motoru} = \frac{0,7068}{392 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1} \cdot e^{-50 \cdot 10^{-6} \cdot p} \quad (3.3)$$

Další variantou byla možnost určit přenos systému (3.4) z naměřených hodnot motoru $R = 1,165 \Omega$, $L = 790,33 \mu\text{H}$.

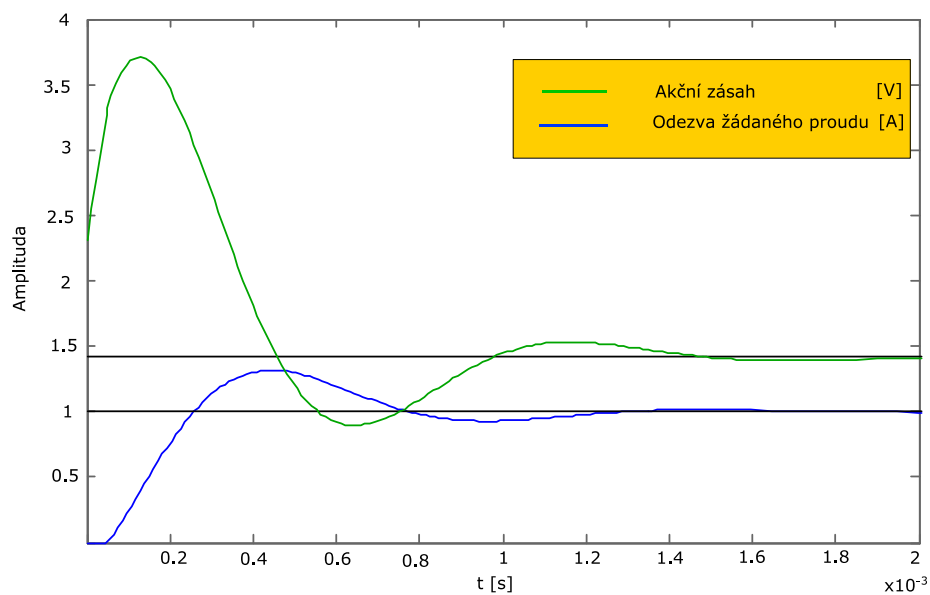
$$F_{motoru} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R}p + 1} = \frac{0,8581}{678 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1} \quad (3.4)$$



Obrázek 14 Přechodová charakteristika motoru se zablokovaným rotorem

Regulátor pro soustavu (3.3) byl vymodelovaný v Malabu nástrojem Sisotool, kde dopravní zpoždění bylo aproximováno Padeho rozvojem sedmého řádu. Teoretické předpoklady regulátoru můžeme vidět na obrázku č. 15. Modrá křivka je proud [A] a zelená křivka je napětí [V].

Spojité přenos regulátoru ve tvaru č. (3.5) je zapotřebí přepočítat na hodnoty, se kterými počítá procesor. Rovnice, se kterou počítá procesor je ve tvaru (3.9).



Obrázek 15 Teoretická odezva navrženého PI regulátoru na jednotkový skok žádané veličiny

$$F_{RI} = K_p + \frac{1}{\tau \cdot p} = 1,3498 + \frac{1}{207 \cdot 10^{-6} \cdot p} \quad (3.5)$$

$$K_i = K_p \cdot \frac{T}{\tau} = 1,3498 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{207 \cdot 10^{-6}} = 0,3256 \quad (3.6)$$

$$K_{sc} = K_p \cdot \frac{e_{max}}{x_{max}} = 1,3498 \cdot \frac{4}{24,3} = 0,2222 \quad (3.7)$$

$$K_{isc} = K_i \cdot \frac{e_{max}}{x_{max}} = 0,3256 \cdot \frac{4}{24,3} = 0,0537 \quad (3.8)$$

$$x_f(k) = K_{sc} \cdot e_f(k) + x_{if}(k-1) + K_{isc} \cdot e_f(k) \quad (3.9)$$

$$x_{if}(k) = x_{if}(k-1) + K_{isc} \cdot e_f(k) \quad (3.10)$$

$x_f(k)$	výstup regulátoru v kroku k
$e_f(k)$	chyba regulátoru v kroku k
e_{max}	maximální rozsah vstupní fyzikální veličiny
x_{max}	maximální rozsah vstupní fyzikální veličiny

Vypočtené hodnoty K_{isc} a K_{sc} jsou v rozsahu od nuly do jedné, což vyhovuje fractional formátu, který vyžaduje knihovna glib.h od firmy Freescale. Funkce PI regulátoru má argumenty:

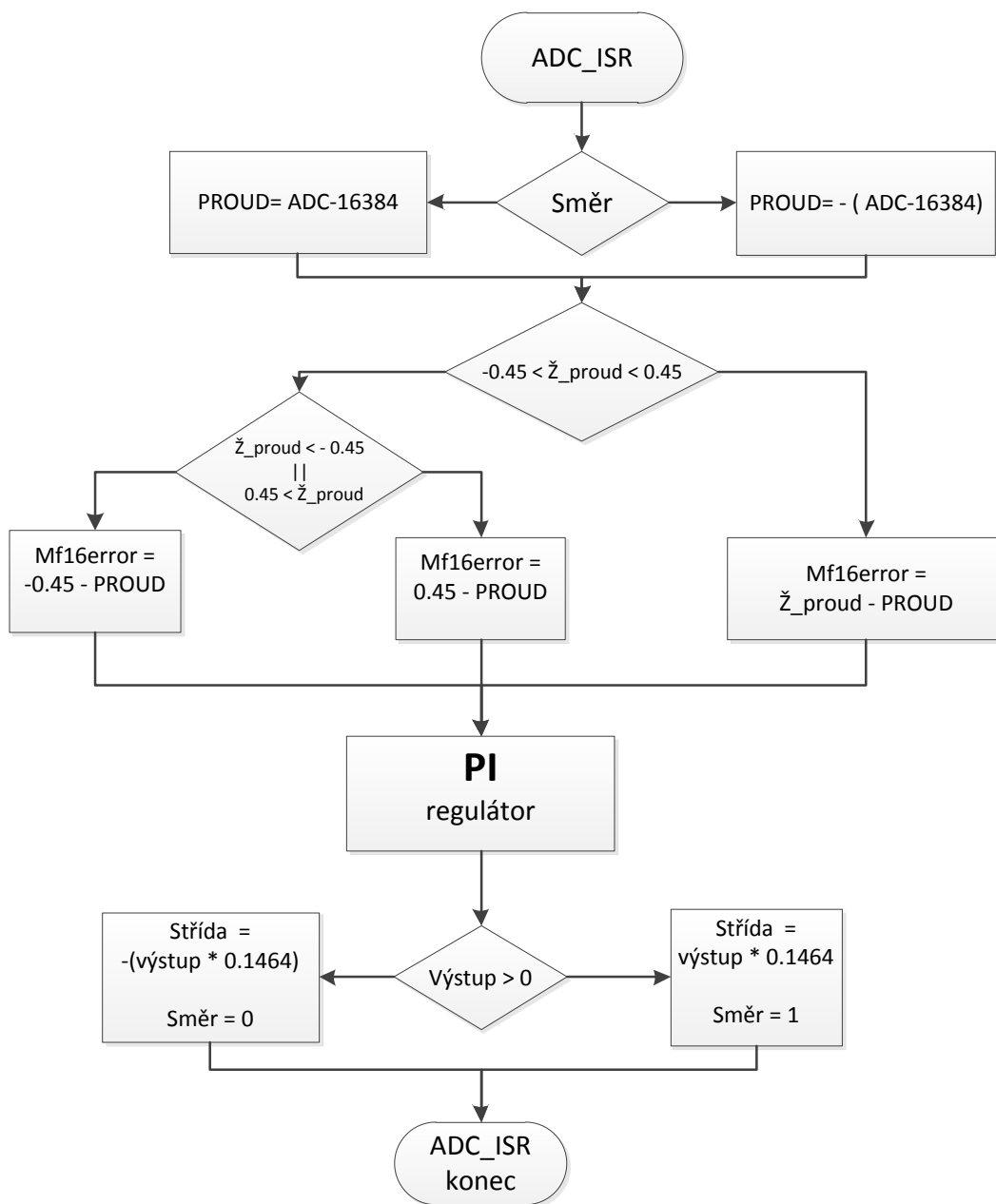
f16InputErrorK	Vstup regulátoru
puDtPiParams	Ukazatel na strukturu parametru PI regulátoru
pi16SatFlag	Hlásí, zda regulátor je na limitu

parametry PI regulátoru:

f16PropGain	Proporcionální zesílení	0,2222
f16IntegGain	Integrační zesílení	0,0536
i16PropGainShift	Shift proporcionálního zesílení	0
i16IntegGainShift	Shift integračního zesílení	0
f16UpperLimit	Horní limit regulátoru	0,48
f16LowerLimit	Dolní limit regulátoru	-0,48

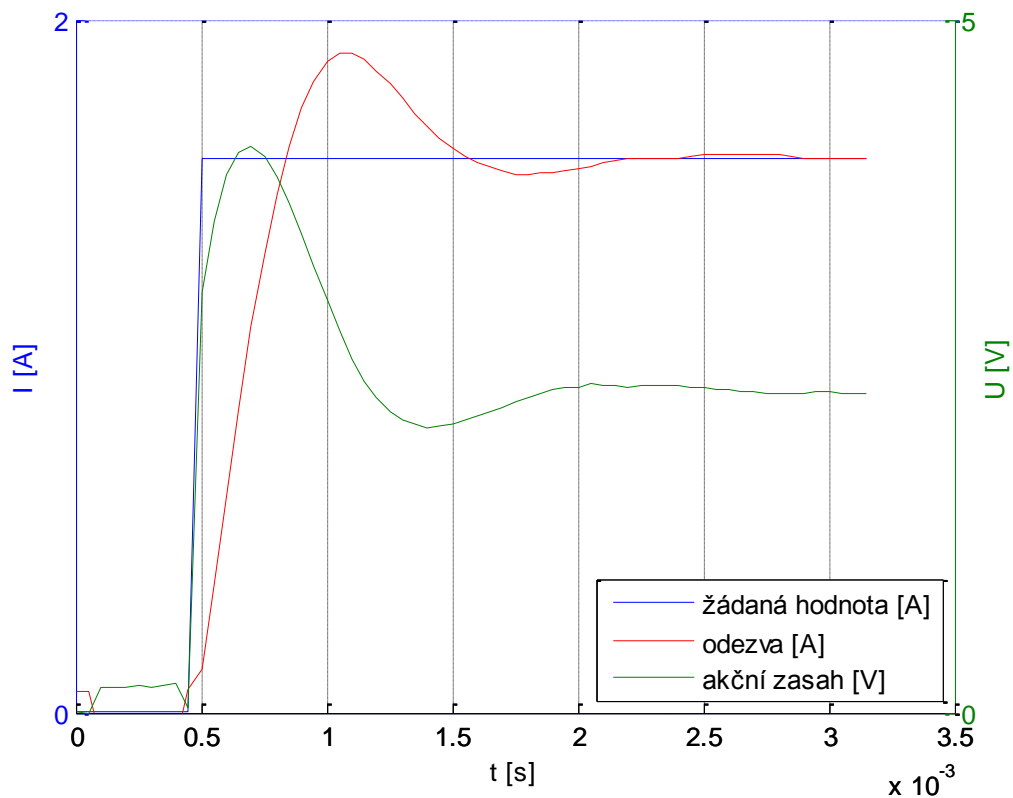
Výstup z regulátoru se musel převést do neznaménkového šestnáctibitového čísla, které určuje velikost střídy PWM signálu 0- 100 % = 0- 2400 podle vzorce č. (3.11). Znaménkový bit na výstupu regulátoru rozhoduje o směru, na základě kterého se nastaví proměnná „směr“, podle které se provede patřičná komutace, jak je naznačeno na vývojovém diagramu komutace obrázek č. 12. Vývojový diagram měření proudu a jeho následné regulaci můžeme vidět na obrázku č. 16.

$$\text{střída} = \text{výstup_regulátoru} \frac{2400}{16383} \quad (3.11)$$



Obrázek 16 Vývojový diagram přerušení od A/D převodníku

Odezva jednotkového skoku proudové smyčky při zablokovaném rotoru, která byla změřena v programu Freemaster pomocí Freemaster rekorderu je na obrázku č. 17. Freemaster rekorder je umístěn na koci přerušení od ADC, kde zaznamenával hodnoty žádaného proudu, akčního zásahu a odezvy žádané hodnoty.



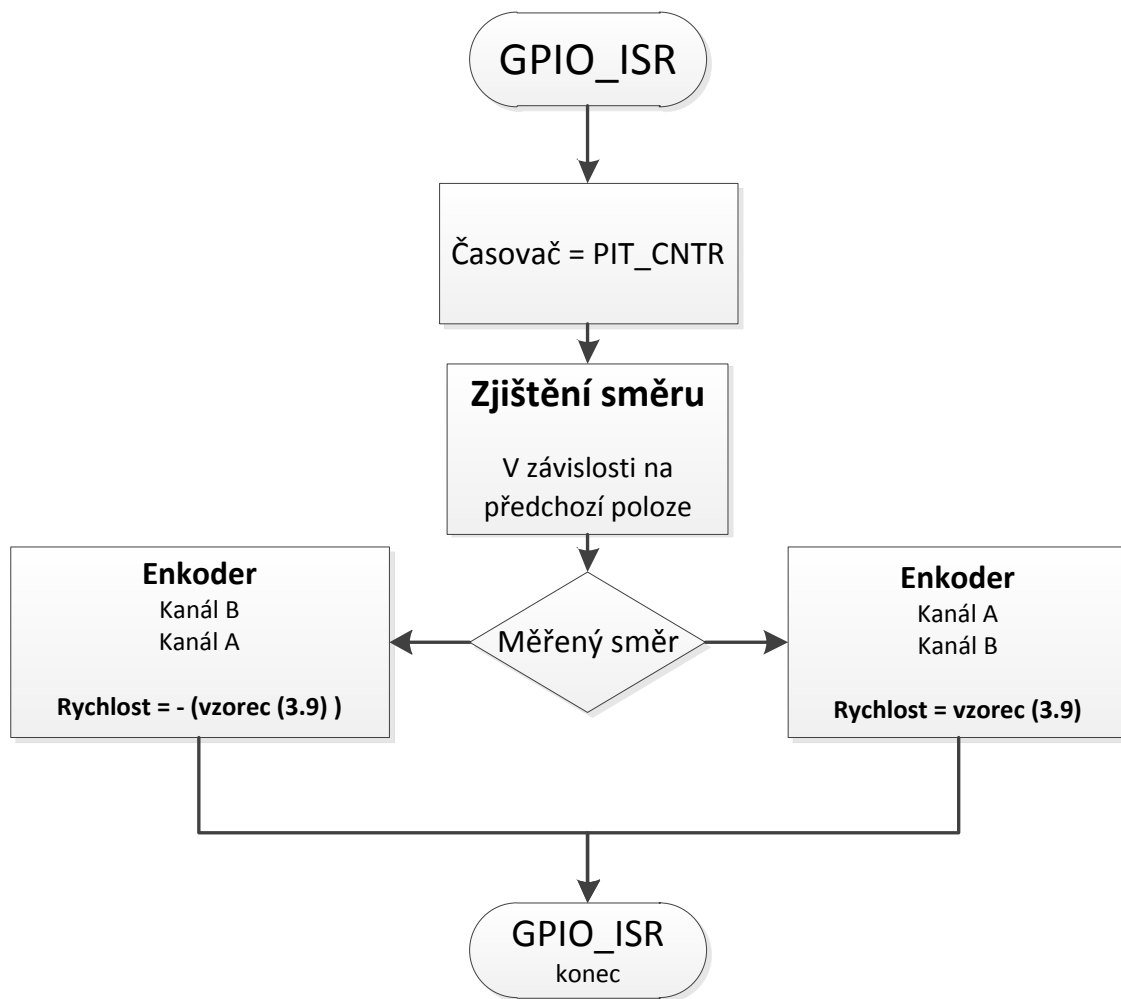
Obrázek 17 Odezva proudové smyčky

3.5 Měření otáček

Měření otáček využívá přerušení GPIO od Hallových snímačů. Vývojový diagram měření otáček je na obrázku č. 18. Virtuální enkodér je realizovaný tak, že vždy při vstupu do přerušení obrátí logickou hodnotu kanálu A nebo B v závislosti na směru otáčení a na konci tohoto přerušení obrátí logickou hodnotu druhému kanálu. Zpoždění mezi kanály je 10 μ s, což je doba přerušení GPIO. Toto zpoždění je měřicí karta Humusoft MF624 schopna rozlišit k určení směru.

Pro zobrazení rychlosti v programu freemaster je rychlost počítána ve chvíli, kdy je pozice rotoru rovna 1 podle vzorce č. (3.12) tzn., měříme čas dvakrát za jednu otáčku, který uplynul od posledního měření. Z tohoto času byla vypočtena rychlost otáček za minutu.

$$\text{rychlost} = \frac{\frac{\text{frekvence procesoru}}{\text{prescaler}} \cdot \text{převod na minuty}}{\text{počet kombinací na otáčku}} / \text{čas od posledního měření.} \quad (3.12)$$

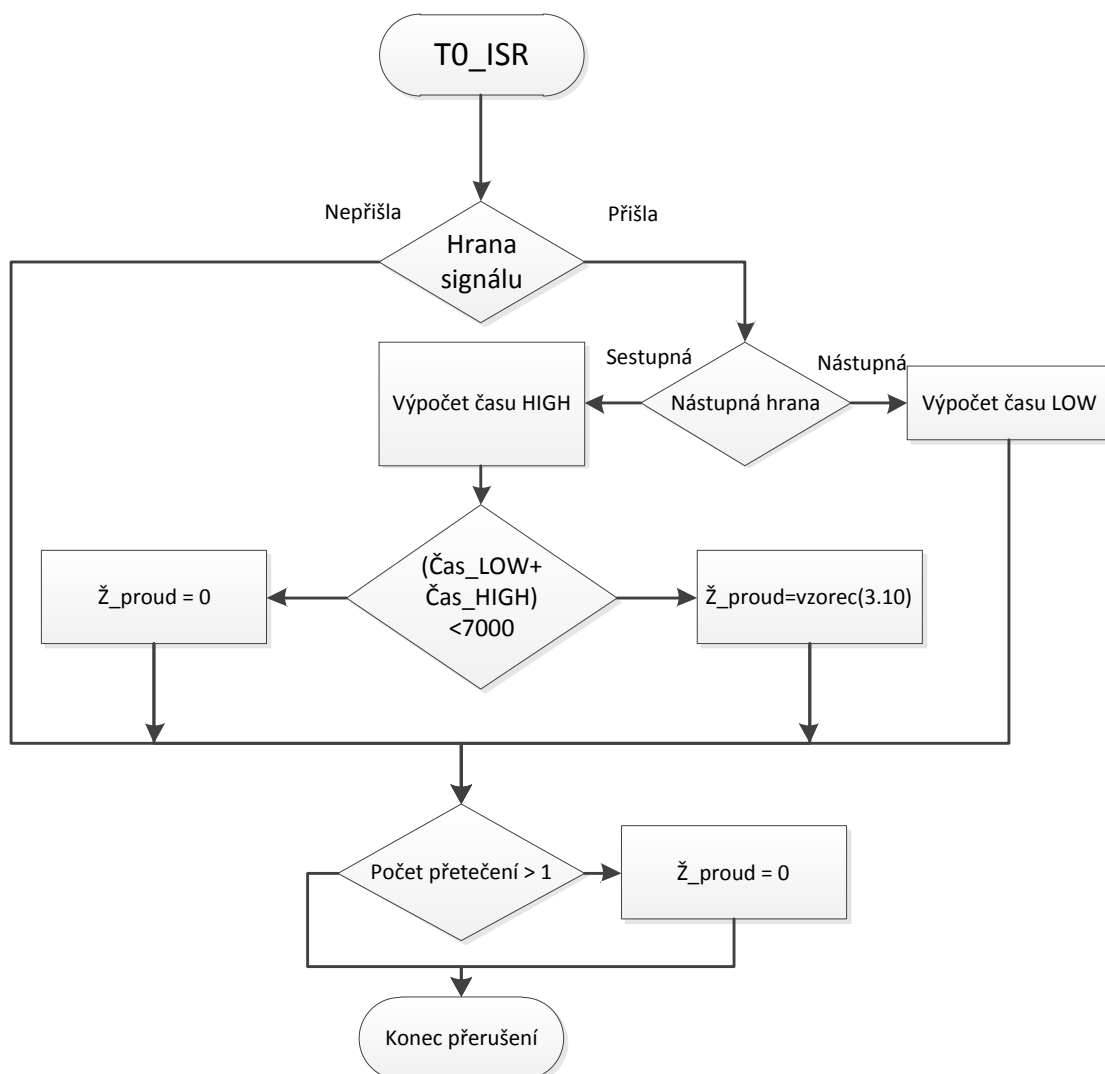


Obrázek 18 Vývojový diagram měření otáček

3.6 Převod signálu žádané veličiny

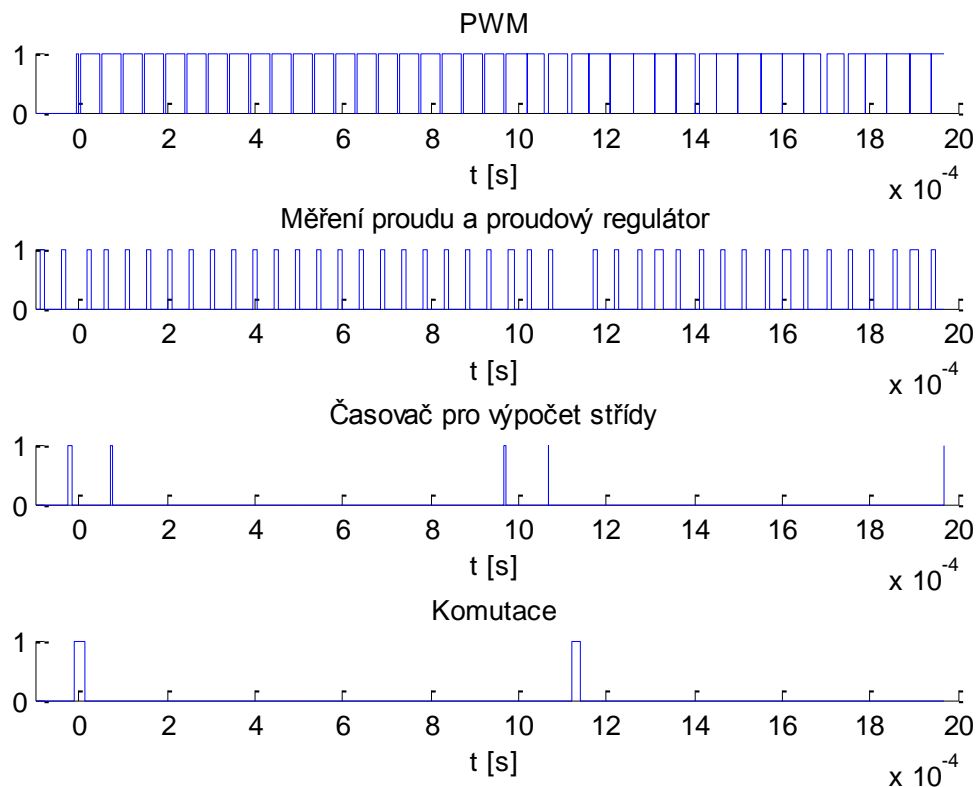
Žádanou veličinou je proud. Tento proud je úměrný velikosti střídavy PWM signálu, který vysílá měřicí karta Humusoft MF462. Tento signál je připojen k časovači, pomocí kterého lze převést střidu na žádanou hodnotu proudu. V modu komunikace je signál přiveden na časovač T0, který je součástí konektoru JTAG. Střída menší než 0,5 udává, že je vyžadován záporný proud a tím i příslušný směr otáčení. Při větší hodnotě než 0,5 je případ opačný, tedy kladný proud a druhý směr otáčení. Klidová poloha, kde protéká téměř nulový proud je definovaná hodnotou 0,5. Není-li připojen žádný signál na vstup časovače, znamená to, že žádaná hodnota proudu je nulová. Žádaný proud se vypočítá podle vzorce č. (3.13). Vývojový diagram výpočtu lze vidět na obrázku č. 19. Přejde-li nástupná nebo sestupná hrana signálu, vyvolá se přerušení od časovače, kde lze změřit doby HIGH a LOW pulsu, ze kterých se vypočte střída signálu. Není-li připojen k časovači žádný signál, časovač vyvolá přerušení, protože přetéká čítač a žádaná hodnota proudu je nastavena na 0. Celý tento algoritmus je přizpůsobený frekvenci PWM 1 kHz.

$$\dot{Z}_{proud} = \left(\frac{\text{časovač_HIGH}}{\text{časovač_HIGH} + \text{časovač_LOW}} \cdot 32768 \right) - 16383 \quad (3.13)$$



Obrázek 19 Vývojový diagram přerušeni od časovače

Aby bylo možné zjistit, jak jsou jednotlivá přerušeni na sobě závislá a jak dlouho trvají, byly vytvořeny tři testovací body. Jelikož 3 fázová jednoúčelová deska neobsahuje žádné nevyužité piny, bylo využito těchto vývodů: GPIO_A_3(user led), GPIO_B_7(txd), GPIO_C_1(ANA7). Průběhy jednotlivých testovacích signálů jsou vidět na obrázku č. 20. Pro tyto průběhy platí, že se vstupem do přerušeni se nastaví log. 1 a na konci se nastaví log. 0.



Obrázek 20 Přehled jednotlivých přerušení

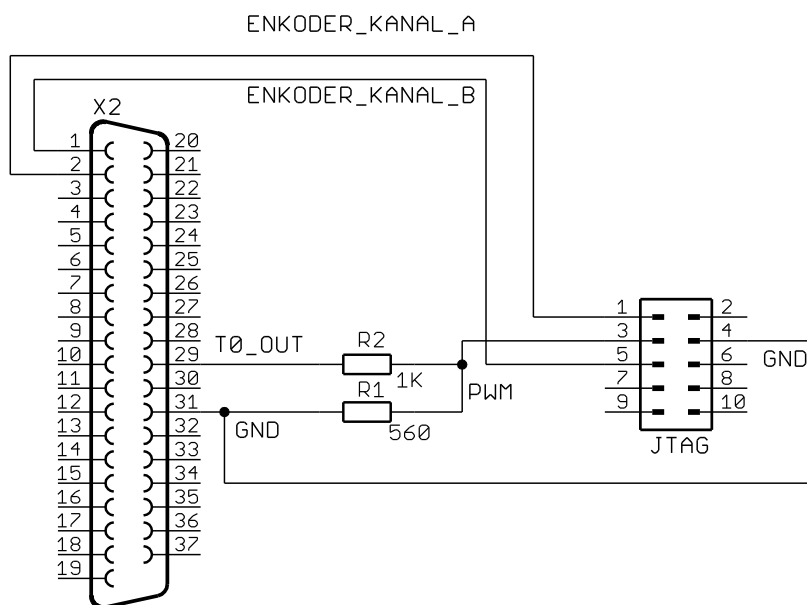
Při tomto měření se motor točil na maximální otáčky. Na obrázku lze vidět, že každý druhý impuls od časovače chodí s periodou 1ms, což odpovídá frekvenci PWM signálu žádané hodnoty proudu. Čas příchodu druhého impulsu je závislý na velikosti střídý. Čítač časovače je šestnáctibitový a čítá se čtvrtinovou frekvencí procesoru. Z toho vyplývá, že přerušení od přetečení čítače chodí každých 8,19 ms. Jestliže probíhá komutace a není změřená hodnota proudu A/D převodníkem, tak při komutaci dochází k přepnutí měřicího kanálu. Tím nedojde k přerušení od A/D převodníku a jeden cyklus měření a regulace proudu se vynechá, jak je vidět na obrázku č. 20, kde je viditelná mezera. Tento problém by bylo možné ošetřit v místě, kde probíhá komutace. V tomto místě se volí kanál A/D převodníku pomocí kterého se bude měřit, ale může dojít k přerušení tohoto převodu, což je nežádoucí. Přidáním podmínky dokončení převodu A/D převodníku lze zajistit, že A/D převod bude vždy dokončen. Tím by se tento problém vyřešil.

Mnou napsané funkce, které slouží k proudovému řízení motoru, je možné sloučit do jednoho programového modulu, který lze použít pro různé aplikace.

4 PROPOJENÍ PŘÍPRAVKU

K propojení přípravku bylo využito čtyř vodičů. Dva jsou pro enkodér, jeden pro PWM signál a čtvrtý vodič spojuje země. Schéma propojení je vidět na obrázku č. 21. Měřicí karta má na výstupu PWM signálu napětí 5 V, tudíž bylo zapotřebí toto napětí snížit na hodnotu 3,3 V, kterou je napájen procesor. Snížení výstupního napětí je realizované pomocí napěťového děliče. Napěťový dělič není procesorem téměř zatěžovaný. Stanovením odporu R2 na hodnotu 1 kΩ byl podle vzorce č. (4.1) dopočítán druhý odpor děliče. Hodnotě 515 Ω je nejbližší odpor 560 Ω z odporové dekády.

$$R_1 = \frac{R_2}{\frac{U_2}{U_1}} - R_2 = \frac{1000}{\frac{3,3}{5}} - 1000 = 515 \Omega \quad (4.1)$$

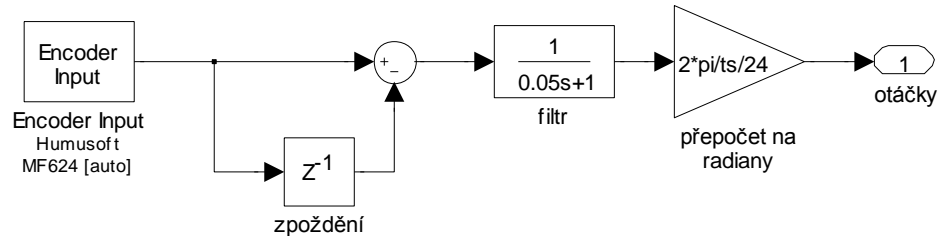


Obrázek 21 Schéma propojení přípravku

Simulink v knihovně Real- Time Windows Target obsahuje moduly frekvenční výstup a vstup enkodéru. Tyto moduly komunikují s měřicí kartou. V pracovním prostředí Simulink byly vytvořeny tři subsystemy.

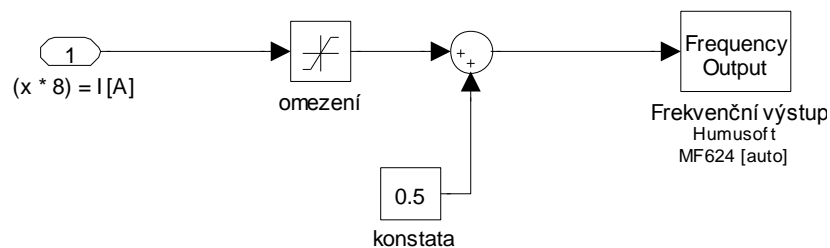
Subsystem, který měří otáčky, obsahuje enkodér, jehož výstupem je poloha. Aby byla výsledná rychlost v radiánech, byla provedena diference aktuálního a předchozího vzorku, který se pak musel vynásobit dvěma pí a podělit vzorkovací konstantou vynásobenou číslem 24, což je počet impulsů na otáčku. Z důvodu malého rozlišení enkodéru, byl mezi diferencí a násobící konstantou vložen filtr, který značně zhoršuje

dynamické vlastnosti otáčkové smyčky. Zapojení tohoto subsystému můžeme vidět na obrázku č. 22.



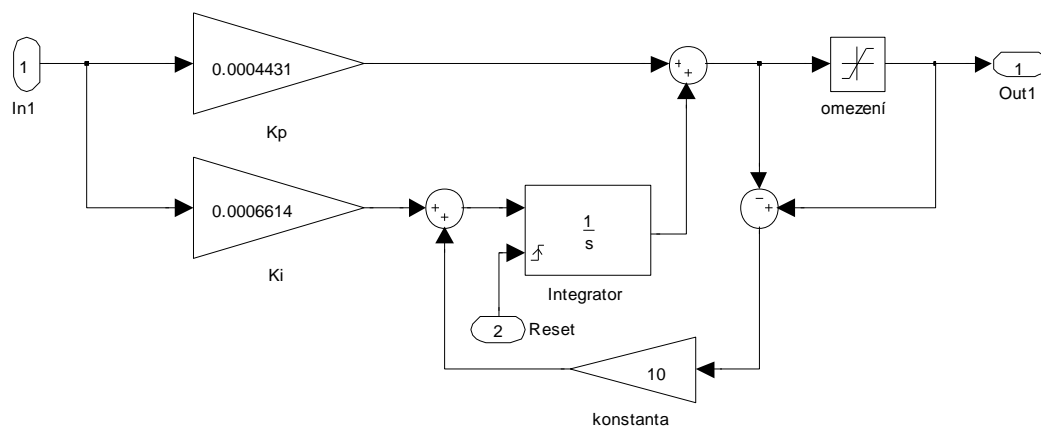
Obrázek 22 Subsystém k měření otáček

Subsystém, který nastavuje střihu žádaného proudu, můžeme vidět na obrázku č. 23. Aby byl rozlišen kladný a záporný proud, je vstupem do subsystému hodnota $\pm 0,5$. Jednoduchým přičtením hodnoty 0,5 lze dosáhnout požadované střidy s frekvencí 1 kHz, která je přizpůsobená algoritmu výpočtu žádaného proudu uvnitř procesoru. Inicializační hodnota střidy je 0,5. Třetím subsystémem je PI regulátor otáček ve tvaru (4.2) s implementovaným anti windupem - obrázek č. 24. Vzorkovací perioda byla zvolena na hodnotu 10 ms. Integrace v Simulinku probíhá podle algoritmu ode5 (Dormand-Prince).

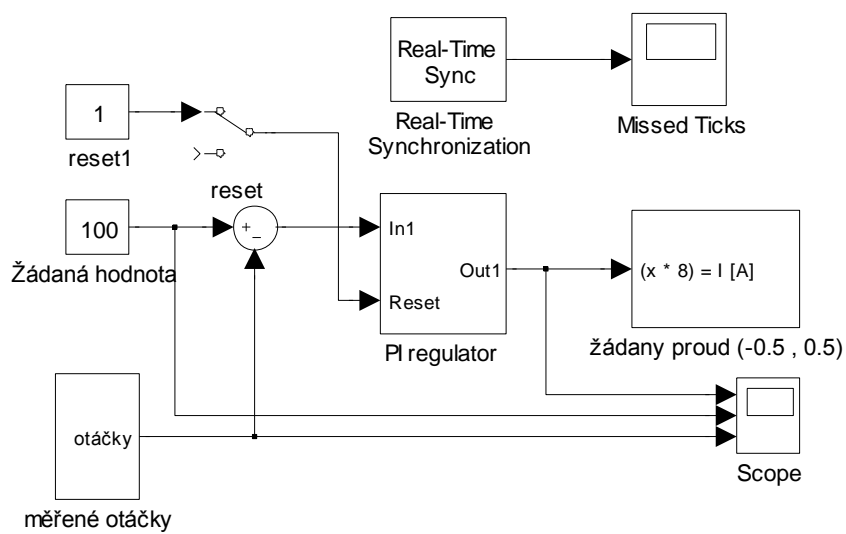


Obrázek 23 Subsystém nastavující žádaný proud

$$F_r = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (4.2)$$



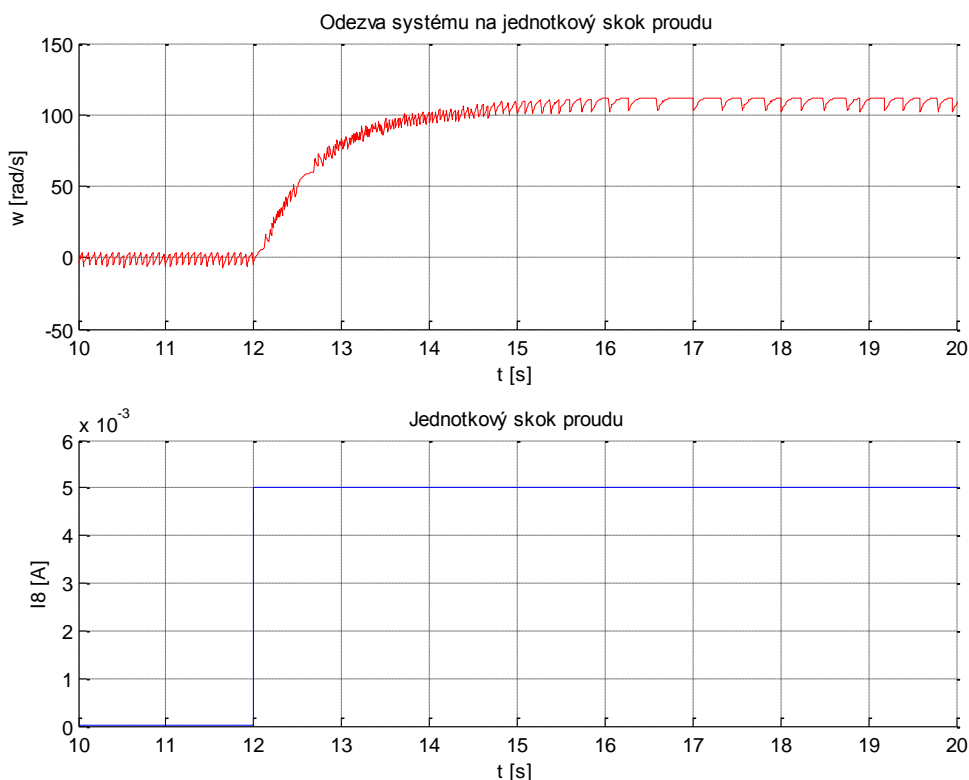
Obrázek 24 Subsystem PI regulátor otáček



Obrázek 25 Pracovní prostředí řízení v Simulinku

5 PI REGULÁTOR OTÁČEK

Přípravek s BLDC motorem jehož žádanou veličinou je proud, obsahuje pásmo necitlivosti při roztáčení z nulových otáček. V tomto případě proud, při kterém se motor roztočí, je 0,5 A, což je mimo pásmo, kde je moment úměrný otáčkám. Při analýze soustavy se tedy musel motor roztočit na maximální otáčky a najít nejmenší proud, při kterém se motor točí. Hodnota tohoto proudu je 0,15A. Naopak hodnota proudu, při kterém jsou otáčky před hranicí maxima je 0,24 A. Subsystem, který nastavuje střihu frekvenčnímu výstupu, vyžaduje hodnoty v rozsahu $\pm 0,5$, které jsou úměrné proudu ± 4 A. Hodnoty úměrné proudu, lze vidět na odezvě jednotkového skoku proudu (obrázek č. 25), ze kterého byl určen přenos soustavy (5.1). Časová konstanta byla určena v čase, když otáčky byly v hodnotě 63,3 % svého maxima. Zesílení bylo odečteno jako poměr výstupního signálu ke vstupnímu signálu. Počáteční hodnota proudu a otáček byla posunuta na nulovou hodnotu, tím byla odstraněna stejnosměrná složka. Na obrázku č. 26 je patrné, že otáčky jsou dosti zašuměné, což zhoršuje regulační vlastnosti.



Obrázek 26 Přechodová charakteristika systému

$$F_s = \frac{22000}{0,8292 \cdot p + 1} \cdot e^{-0,05 \cdot p} \quad (5.1)$$

PI regulátor otáček byl navržený pomocí frekvenční charakteristiky otevřené smyčky v komplexní rovině, aby parametry zásoby stability v amplitudě, fázi a modulu vyhovovaly tabulce č. 5, která je v praxi běžně používaná.

Tabulka 5 Doporučené parametry zásoby stability [4]

Typ parametru	Typické nastavení	Minimální hodnota
Zásoba stability v amplitudě	$Mg \geq 2$ (6dB)	$Mg = 1,6$ (4dB)
Zásoba stability ve fázi	$30^\circ \leq Mp \leq 60^\circ$	
Zásoba stability v modulu	$Mm \geq 0,5$ (-6dB)	$Mm = 0,4$ (-8dB)

Umístí-li se nula regulátoru do místa, kde se nachází pól soustavy, vytvoří se přenos otevřené smyčky ve tvaru (5.2). Při návrhu byla zvolena fázová bezpečnost 45° . Potom musí platit vztah, že argument této funkce se rovná -135° . Z tohoto vztahu se vypočte kmitočet řezu $\omega_{\check{r}}$ (5.3).

$$F_0 = \frac{K_r + K_s}{p} \cdot e^{-T_d \cdot \omega} \quad (5.2)$$

K_r Zesílení regulátoru

K_s Zesílení soustavy

T_d Dopravní zpoždění

$$\begin{aligned} \arg(F_0) &= -\frac{\pi}{2} - T_d \cdot \omega = -\pi + \frac{\pi}{4} \\ \omega_{\check{r}} &= \frac{\pi}{4 \cdot T_d} = \frac{\pi}{4 \cdot 0,05} = 15,708 \text{ rad/s} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Zesílení regulátoru bylo vypočteno podle vzorce (5.4).

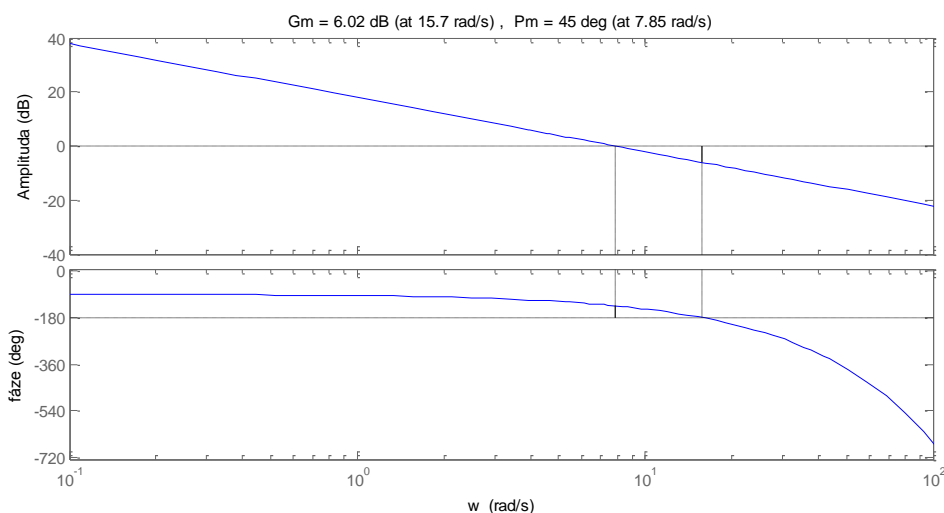
$$\begin{aligned} |F_{0(j\omega)}| &= \frac{K_r \cdot K_s}{\omega} = 1 \\ K_r &= \frac{\omega}{K_s} = \frac{15,708}{22000} = 0,000714 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Přenos ve tvaru (5.5) byl přepočítaný na tvar (5.6), ve kterém se hodnoty K_i a K_p dosazují do navrženého subsystému pro PI regulátor.

$$F_r = \frac{K_r(\tau \cdot p + 1)}{p} = \frac{0,000714 \cdot (0,8292p + 1)}{p} \quad (5.5)$$

$$F_r = K_p + \frac{K_i}{p} = 0,000592 + \frac{0,000714}{p} \quad (5.6)$$

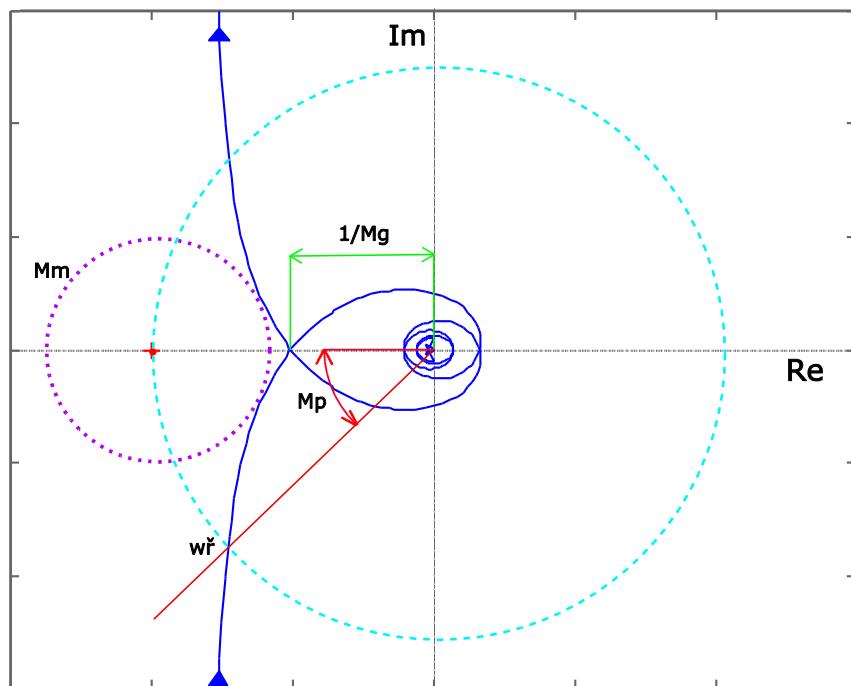
Na obrázku č. 27 je zobrazena frekvenční charakteristika otevřené otáčkové smyčky v logaritmických souřadnicích. Je na ni vidět amplitudová bezpečnost 6,02 dB a zvolená fázová bezpečnost 45 °, což vyhovuje tabulce č. 5. Frekvenční charakteristika v komplexní rovině je zobrazena na obrázku č. 28, na kterém jsou zaznačeny jednotlivé bezpečnosti.



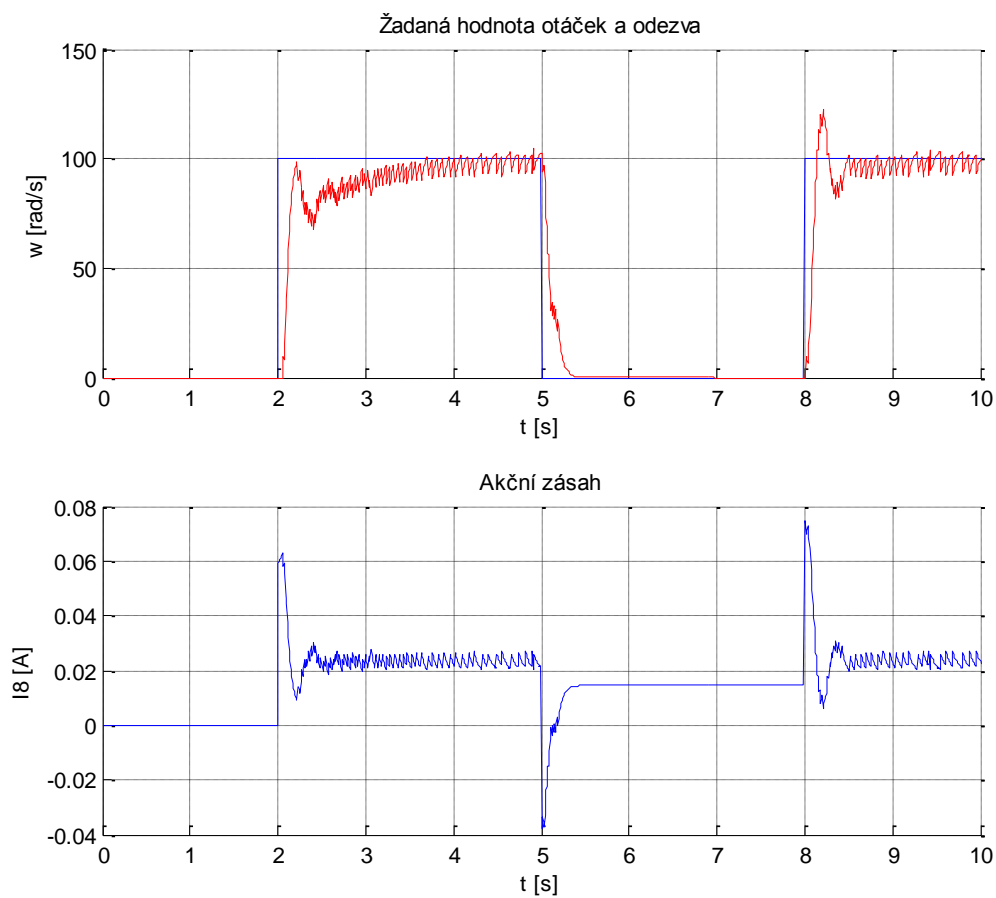
Obrázek 27 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích otevřené smyčky

M_m	Zásoba stability v modulu
M_p	Zásoba stability ve fázi
M_g	Zásoba stability v amplitudě
$\omega_{\dot{r}}$	Kmitočet řezu

Na obrázku č. 29 jsou dvě odezvy otáčkové smyčky na dva jednotkové skoky. Při roztáčení z nulových otáček, kde na výstupu regulátoru je nulová hodnota a projevuje se již zmiňované pásmo necitlivosti motoru. Lze vidět, že motor stojí, dokud na výstupu regulátoru není požadovaný proud při kterém se motor roztočí. U druhého jednotkového skoku, již výstup regulátoru zůstal na hodnotě, na které se motor zastavil a průběh odezvy žádané hodnoty otáček má předpokládaný tvar.



Obrázek 28 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině otevřené smyčky



Obrázek 29 Odezva na jednotkový skok otáčkové smyčky

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce obsahuje teoretický rozbor konstrukce, řízení BLDC motorů a návrh kaskádního řízení BLDC motoru proudovou a otáčkovou smyčkou.

Signálový mikrokontrolér MC56F8006 byl naprogramovaný v jazyce C, pomocí programu CodeWarrior. Nejprve bylo třeba naprogramovat algoritmus senzorového řízení motoru pomocí Halloových snímačů, které vyvolávají přerušení GPIO, kde probíhá komutace. Tranzistory v jednotlivých větvích měniče jsou v komplementárním režimu spínané unipolárně PWM signálem pomocí six step komutace. Frekvence PWM signálu byla zvolena na hodnotu 20 kHz, aby měl motor co nejmenší zvlnění proudu. Jednotlivé tranzistory měniče jsou spínané v závislosti na poloze rotoru a směru otáčení pomocí switch struktury v jazyce C. Proud, který je třeba znát k následné regulaci, je měřen v jednotlivých větvích měniče jako úbytek napětí na příslušném odporu. Kanál daného A/D převodníku, pomocí kterého se bude měřit proud, se volí v místě, kde se nastavuje spínání jednotlivých tranzistorů. Aby byla definovaná doba měření, bylo zapotřebí synchronizovat PWM signál s A/D převodníkem. PWM signál je středově centrováný a přesně v polovině periody dává synchronizační impuls. Tento impuls spustí časovač PDB. PDB po definovaném zpoždění dá pokyn A/D převodníku k měření. A/D převodník po zpracování vyvolá přerušení. V přerušení od A/D převodníku je realizovaný PI regulátor proudu. Proudová přechodová charakteristika byla změřena pomocí Freemaster recorder, který vzorkoval proud na konci přerušení od A/D převodníku. Z proudové přechodové charakteristiky byl určen přenos systému prvního řádu s dopravním zpožděním. Pro přenos systému byl nástrojem Sisotool vymodelovaný PI regulátor proudu. Dopravní zpoždění bylo aproximovaného Padeho rozvojem sedmého řádu. Spojitý přenos proudového regulátoru bylo třeba diskretizovat a přizpůsobit fractional formátu. S fractional formátem pracuje knihovna gflib.h. Knihovna gflib.h je napsaná firmou Freescale. Výstupem PI regulátoru proudu je napětí ve fractional formátu, tento formát byl přepočítán na hodnotu střídy PWM signálu. O směru otáčení rozhoduje znaménko výstupu proudového regulátoru.

S ohledem na zapojení přípravku byl ke komunikaci s kartou zvolen konektor JTAG. Z JTAG konektoru byly vybrány dva výstupní piny a jeden vstupní časovač. Komunikaci přípravku s počítačem zajišťuje vstupně výstupní karta Humusoft MF 624. Dva vodiče jsou připojeny k enkodéru měřící karty, k určení rychlosti a směru. Virtuální enkodér využívá přerušení od Halloových snímačů (GPIO_ISR). V přerušení GPIO_ISR se nastavují kanály A a B na začátku a na konci tohoto přerušení, v závislosti na směru motoru. Směr se určuje z aktuální a předchozí polohy. Třetím vodičem se předává informace žádaného proudu, který je úměrný velikosti střídy PWM signálu, generuje jej měřící karta.

V mikrokontroléru byl naprogramován algoritmus pro výpočet žádané hodnoty proudu. Algoritmus pro výpočet žádané hodnoty proudu využívá časovač T0. Časovač

T0 vyvolává přerušení s každou hranou PWM signálu od měřicí karty, z těchto přerušení je vypočtena délka LOW a HIGH pulsu PWM signálu. Z LOW a HIGH pulsu je počítána hodnota střídání PWM, takto vypočítaná střída se dále přepočítá na žádaný proud. Měřený proud je potom v přerušení od A/D převodníku odečítán od žádaného proudu, který je vypočten ze střídání PWM signálu měřicí karty. Odečtem žádaného a měřeného proudu vznikne odchylka, kterou zpracovává PI regulátor proudu. Směr žádaného proudu je definovaný velikostí střídání PWM signálu. Střída menší než 0,5 je úměrná proudu v jednom směru otáčení a střída větší než 0,5 je úměrná proudu v druhém směru otáčení.

Program Matlab/Simulink komunikuje s měřicí kartou přes knihovnu Real-Time Windows Target, z této knihovny byly vybrány bloky enkodér a frekvenční výstup. Enkodérem, jehož výstupem je poloha, se počítá rychlost otáček. Přepočet se provádí pomocí zpožďovače jako rozdíl aktuální a předchozí hodnoty. Výsledek rozdílu je vynásoben konstantou, aby byla rychlost otáček v radiánech. Jelikož rozlišení enkodéru je jen 24 pulsů na otáčku, musel být použit filtr otáček. Frekvenčním výstupem nastavujeme velikost střídání PWM signálu, neboli žádanou hodnotu proudu.

Pro přehlednost laboratorní úlohy byly v Simulinku vytvořeny projekty identifikace a PI regulátor otáček. V projektu identifikace změříme přechodovou charakteristiku systému. Systémem je přípravek s BLDC motorem, řízený proudem. Z přechodové charakteristiky byl určen přenos prvního řádu s dopravním zpožděním. PI Regulátor otáček byl navržený pomocí frekvenční charakteristiky otevřené smyčky v komplexní rovině. Vypočítané hodnoty proporcionálního a integračního zesílení byly zadány do navrhnutého PI regulátoru s implementovaným antiwindupem, do druhého projektu PI regulátor v Simulinku. V tomto projektu byla navržena otáčková smyčka, kde lze vidět průběhy akčního zásahu, odezvy žádané hodnoty otáček a žádané otáčky. Filtr, který je součástí měření otáček značně zhoršuje dynamiku řízení. Doporučil bych k BLDC motoru implementovat reálný enkodér a připojit na vstup enkodéru měřicí karty, což by systém mnohonásobně zrychlilo. Přípravek s BLDC motorem a jeho proudovým řízením je dost nelineární a obsahuje pásmo necitlivosti při roztáčení z nulových otáček. Proto byl PI regulátor otáček navržený pro řízení v okolí 100 rad/s.

Při vypracovávání bakalářské práce jsem poznal různé metody řízení BLDC motorů a rozšířil jsem si znalosti práce v programu Matlab. Zdokonalil jsem se v programování mikrokontroléru, kdy program vyžadoval přesné časování, aby byly včas obslouženy všechny přerušení.

LITERATURA

- [1] LEPKA, J. a GRASBLUM, P., *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC*. [Online] http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf
- [2] KRIŽÁN, J., *Bezsenzorové řízení BLDC motoru*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2012, 70 s.
- [3] SKALICKÝ, J. *Elektrické regulované pohony*. Brno : VUT Brno, 2007.
- [4] BLÁHA, P a VAVŘÍN, P.: *Řízení a regulace 1*. Vysoké učení technické v Brně, 2005, 212 s.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor
EC motor	elektronicky komutovaný motor
PWM	pulsně šířková modulace
DC motor	stejnsměrný motor
ADC	analogově číslicový převodník
GPIO	vstupy/výstupy
SPI	sériová sběrnice
JTAG	rozhraní k programování a ladění
PCI	propojení periferních zařízení
A/D	analogově číslicový převodník
D/A	číslicově analogový převodník
PDB	modul synchronizující ADC s PWM

PŘÍLOHY

A. Obsah CD

- Hlavní dokument bakalářské práce
Havlicek_Jiri_2015.pdf
- Program pro řízení přípravku proudem, psaný v programu CodeWarrior
Projekt_Codewarrior.zip
- Soubory pro laboratorní úlohu
Matlab_Simulink.zip

B. Laboratorní úloha

Zadání laboratorní úlohy

- 1) Seznamte se s přípravkem BLDC motoru, jeho propojením a řízením z PC.
- 2) Změřte přechodovou charakteristiku systému.
- 3) Zjistěte přenos systému.
- 4) Navrhněte rychlostní PI regulátor. Parametry PI regulátoru vypočítejte pro zásobu stability ve fázi 45° . Zobrazte přechodovou charakteristiku řízení otáčkové smyčky, frekvenční charakteristiku otevřené smyčky v komplexní rovině a zakreslete jednotlivé bezpečnosti.
- 5) Pohybujte s parametry integračního a proporcionálního zesílení, sledujte chování otáčkové smyčky v závislosti na těchto změnách.

Teorie

Popis zařízení

Zařízení, které je propojeno s počítačem pomocí vstupně výstupní karty Humusoft MF642 obsahuje 2pólový BLDC motor s Halovými snímači, 3 fázovou desku, která je přizpůsobená k řízení BLDC motorů. Dále signálový mikrokontrolér MC56F8006 umístěný na tzv. „dceřině desce“, který to vše řídí. Protože je v procesoru naprogramovaný PI regulátor proudu, tak žádanou hodnotou musí být také proud. Měřicí karta na vstup přípravku přivádí PWM signál o frekvenci 1 kHz, kde je rozhodující střída signálu.

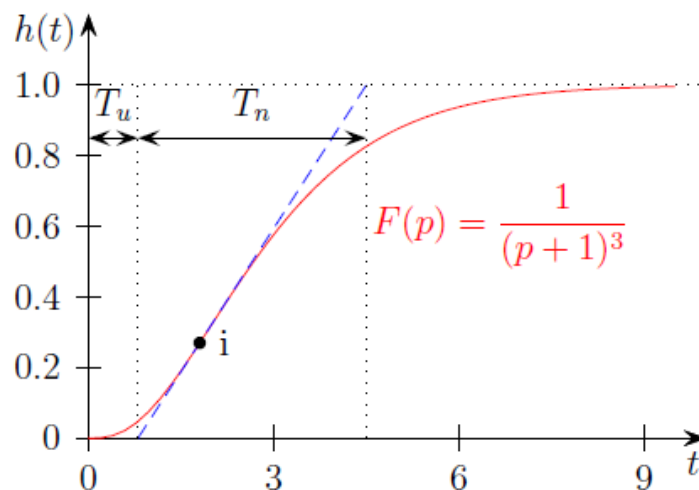
Pro kterou platí:

$$\text{střída} \cdot 8 = I \text{ [4A]}$$

Na vstup enkodéru vstupně výstupní karty Humusoft MF642 jsou připojeny dva kanály A a B, které jsou od sebe zpožděné 10 μs v závislosti na směru otáčení s rozlišením 24 pulsů na otáčku.

Rozpoznání soustavy bez kmitavých členů z naměřené přechodové charakteristiky

K rozpoznání soustavy je třeba znát polohu inflexního bodu i , dobu náběhu T_n a dobu průtahu T_u . Tyto hodnoty jsou zobrazeny na obrázku č. 1. [1]



Obrázek č. 1 Parametry přechodové charakteristiky [1]

K aproximování soustavy je využito tohoto přenosu:

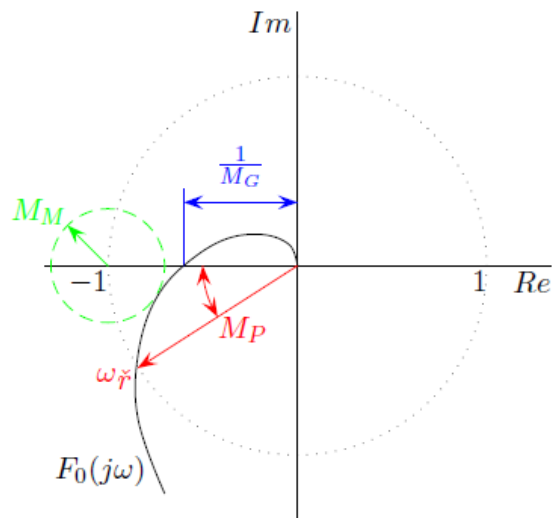
$$F_1(p) = \frac{k}{T_{p+1}} e^{-dp} \quad \text{Soustava prvního řádu s dopravním zpožděním}$$

Pro přenos F_1 platí $T = T_n$ a $d = T_u$.

Návrh PI regulátoru pomocí frekvenční charakteristiky v komplexní rovině otevřené smyčky

Důležitým místem obrázku č. 2 je bod -1 na reálné ose, od kterého se určuje fázová a modulová bezpečnost. Tyto jednotlivé bezpečnosti jsou vidět na obrázku č. 2.

M_m	Zásoba stability v modulu
M_p	Zásoba stability ve fázi
M_g	Zásoba stability v amplitudě
$\omega_{\check{r}}$	Kmitočet řezu



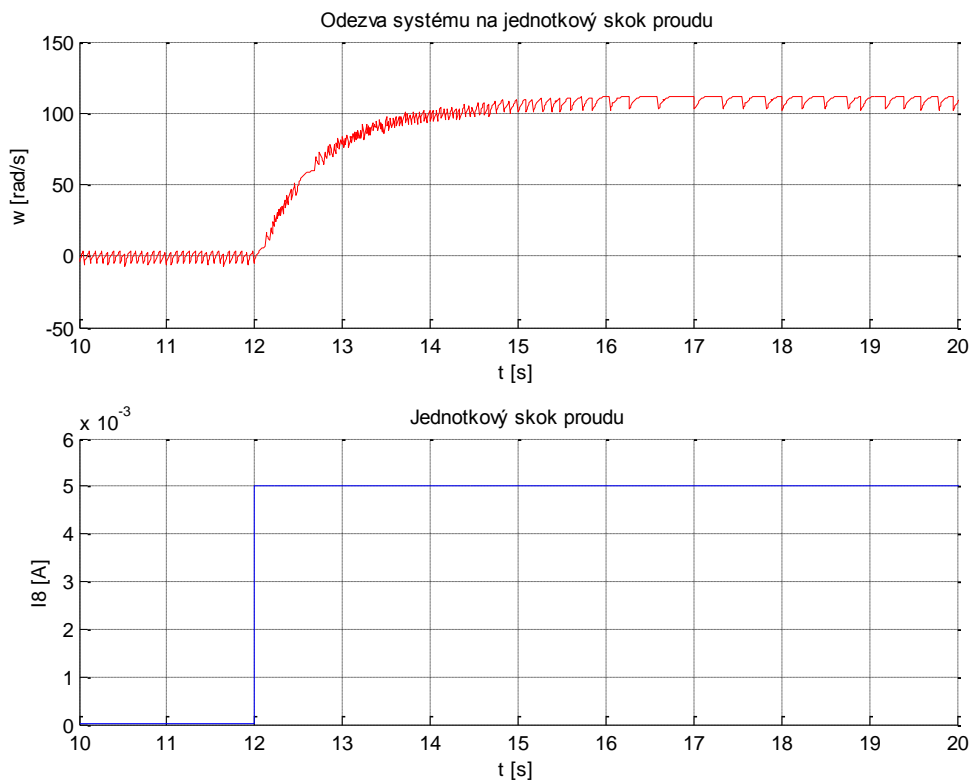
Obrázek č. 2 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině [1]

Tabulka č. 2 Doporučené hodnoty parametrů pro zásobu stability [1]

Typ parametru	Typické nastavení	Minimální hodnota
Zásoba stability v amplitudě	$M_g \geq 2$ (6dB)	$M_g = 1,6$ (4dB)
Zásoba stability ve fázi	$30^\circ \leq M_p \leq 60^\circ$	
Zásoba stability v modulu	$M_m \geq 0,5$ (-6dB)	$M_m = 0,4$ (-8dB)

Vypracování laboratorní úlohy

- 2) Změřte přechodovou charakteristiku systému.



Obrázek č. 3 Přechodová charakteristika systému

- 3) Zjistěte přenos systému

$$F_s = \frac{22000}{0,8292 \cdot p + 1} \cdot e^{-0,05 \cdot p}$$

- 4) Navrhněte rychlostní PI regulátor. Parametry PI regulátoru vypočítejte pro zásobu stability ve fázi 45° . Zobrazte přechodovou charakteristiku řízení otáčkové smyčky, frekvenční charakteristiku otevřené smyčky v komplexní rovině a zakreslete jednotlivé bezpečnosti.

$$F_0 = \frac{K_r + K_s}{p} \cdot e^{-T_d \cdot \omega}$$

K_r Zesílení regulátoru

K_s Zesílení soustavy

T_d Dopravní zpoždění

$$\arg(F_0) = -\frac{\pi}{2} - T_d \cdot \omega = -\pi + \frac{\pi}{4}$$

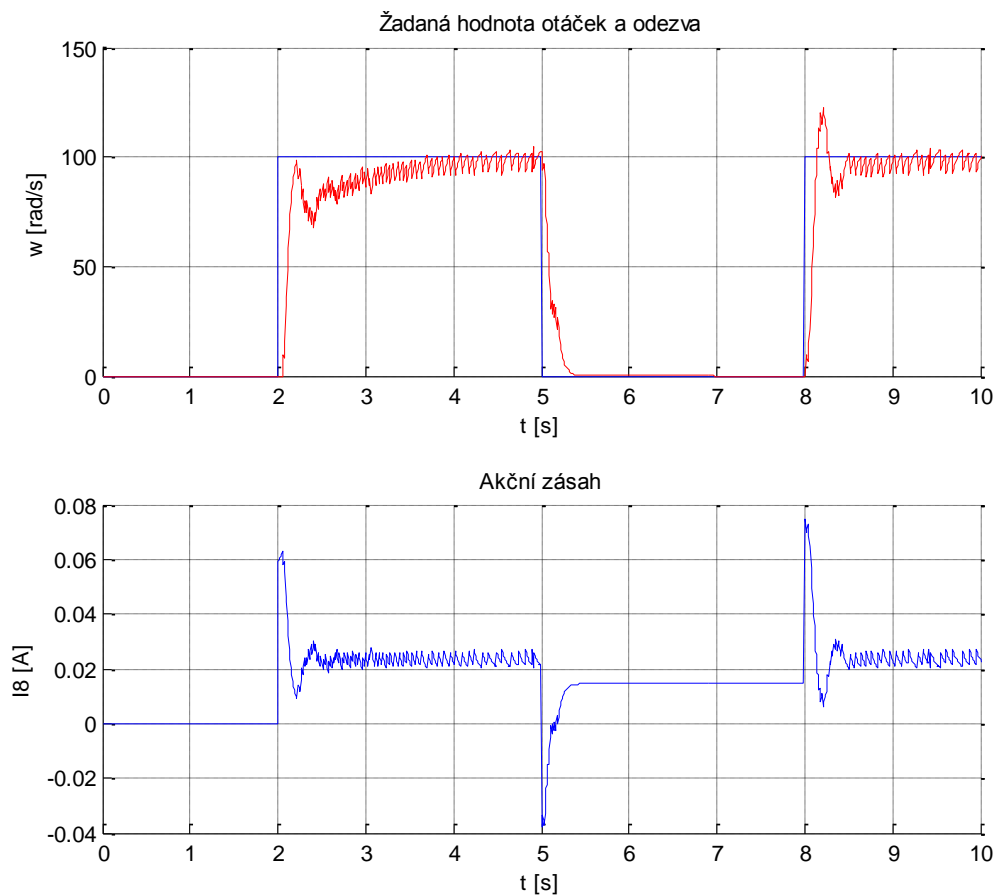
$$\omega_{\dot{r}} = \frac{\pi}{4 \cdot T_d} = \frac{\pi}{4 \cdot 0,05} = 15,708 \text{ rad/s}$$

$$|F_{0(j\omega)}| = \frac{K_r \cdot K_s}{\omega} = 1$$

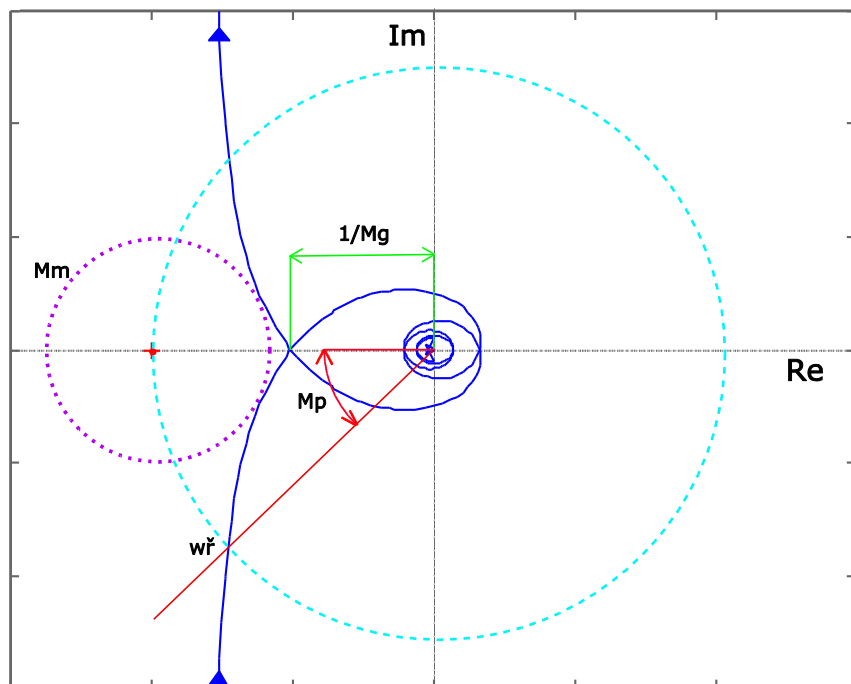
$$K_r = \frac{\omega}{K_s} = \frac{15,708}{22000} = 0,000714$$

$$F_r = \frac{K_r(\tau \cdot p + 1)}{p} = \frac{0,000714 \cdot (0,8292p + 1)}{p}$$

$$F_r = K_p + \frac{K_i}{p} = 0,000592 + \frac{0,000714}{p}$$



Obrázek č. 4 Odezva na jednotkový skok otáčkové smyčky



Obrázek č. 5 Frekvenční charakteristika otáčkové smyčky v komplexní rovině

Závěr

V této laboratorní úloze byla nejprve změřena přechodová charakteristika systému obrázek č. 3, ze kterého je patrné, že se jedná o přenos prvního řádu s dopravním zpožděním. Z této přechodové charakteristiky byl určený přenos F_s , pro který se navrhl PI regulátor s přenosem F_r . Na obrázku č. 4 je naměřená přechodová charakteristika otáčkové smyčky, na niž je vidět jak se projevuje pásmo necitlivosti na odezvu jednotkového skoku žádaných otáček. Na obrázku č. 5 je zobrazena frekvenční charakteristika otevřené otáčkové smyčky v komplexní rovině, se značenými jednotlivými bezpečnostmi.

Literatura

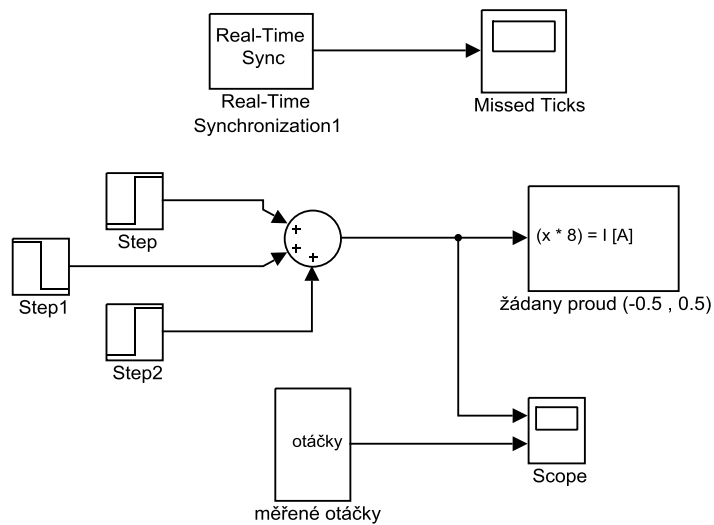
- [1] BLÁHA, P a VAVŘÍN, P.: *Řízení a regulace 1*. Vysoké učení technické v Brně, 2005, 212 s.

Tato laboratorní úloha byla vypracována v kapitole č. 5 bakalářské práce.

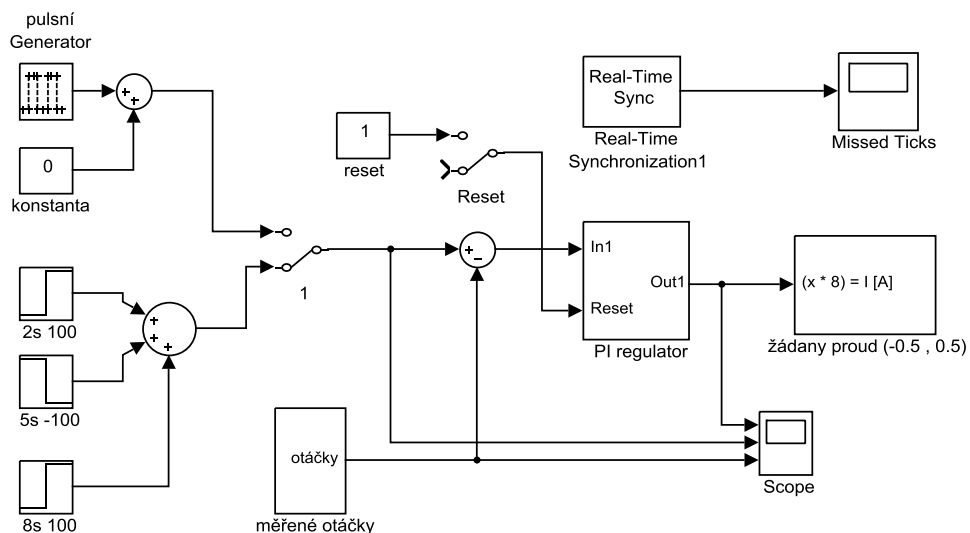
Na přiloženém CD bakalářské práce jsou dva projekty pro Simulink. Jeden slouží k identifikaci systému obrázek č. 5 a druhý k řízení otáček obrázek č. 6.

Před spuštěním obou projektů se musí v prostředí Matlab vytvořit proměnná $ts=0,01$. Proměnná ts určuje vzorkovací frekvenci.

Dále byl vytvořený mfile, který vykreslí naměřenou přechodovou charakteristiku projektu identifikace, vypočítá a vypíše navržený PI regulátor. Po spuštění druhého projektu vykreslí akční zásah, žádanou hodnotu otáček a odezvu žádané hodnoty otáček.



Obrázek č. 5 Laboratorní úloha: identifikace



Obrázek č. 5 Laboratorní úloha: Otáčková smyčka