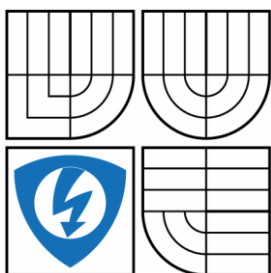


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

ŘÍZENÍ DVOJICE SPŘAŽENÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORŮ

CONTROL OF TWO DC MOTORS ON COMMON SHAFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ ORÁVIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLAHA, Ph.D.

BRNO 2013



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: Tomáš Orávik

ID: 136568

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řízení dvojice spřažených stejnosměrných motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- seznámte se s existujícím přípravkem dvou spřažených stejnosměrných motorků, s prostředím LabView a s jeho použitím pro řízení systémem CompactRIO,
- vytvořte propojení přípravku se systémem CompactRIO od National Instruments a jeho I/O kartami,
- navrhnete několik typů regulátorů pro řízení přípravku,
- provedte identifikaci parametrů stejnosměrného motoru,
- navrhnete laboratorní úlohu pro návrh regulátorů stejnosměrného motoru a pro identifikaci jeho parametrů. Zadání, teoretický úvod a vzorové vypracování obou úloh uveďte v příloze bakalářské práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Soederstrom, T., Stoica, P.: System identification. Prentice Hall International, 1989.
- [2] Vas, P.: Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines. Clarendon press, Oxford, 1993, ISBN 0-19-859375-9.
- [3] Žídek J.: Grafické programování ve vývojovém prostředí Labview, VŠB-TU Ostrava, říjen 2002.

další dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 9.8.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

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

Práca sa zaoberá riadením dvojice spojených jednosmerných motorov pomocou programového prostredia LabVIEW, komunikujúceho s modelom Compact cRio 9076 a modulom NI 9505, metódami na identifikáciu parametrov sústav a návrhovými metódami regulátorov.

Kľúčové slová

Jednosmerné motory, Compact cRio, LabVIEW, modul NI 9505, Identifikácia parametrov, Metóda najmenších štvorcov, Návrh regulátora, Metóda štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu.

Abstrakt

Thesis deals with control of two DC motors on common shaft using programming software LabVIEW, communicating with model CompactRio 9076 and I/O module NI 9505, methods for identifying parameters, methods motion controllers.

Keywords

DC motors, Compact cRio, LabVIEW, Module NI 9505, Identification parameters, Method of least squares, Motion controller, Method of standard frequency characteristic shape of an open loop.

Bibliografická citácia mojej práce:

ORÁVIK, T. *Řízení dvojice spřažených stejnosměrných motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 59 s.
Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D..

Prehlásenie

„Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Riadenie dvojice spojených jednosmerných motorov som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej 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 bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej 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 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI., diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Zb.

V Brne, dňa 9.8.2013

.....

Tomáš Orávik

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Petr Blahovi, Ph.D za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 9.8.2013

.....
Tomáš Orávik

Obsah

1	Úvod	10
2	Jednosmerné motory	11
2.1	Princíp a konštrukcia jednosmerného motora	11
2.2	Prechodný stav jednosmerného motora	12
3	CoMPACTRIO	15
3.1	CompactRio – 9076	15
3.2	NI 9505	16
4	Labview	21
4.1	Súčasti vývojového systému LabVIEW	21
4.2	Programovanie prípravku	23
5	Identifikácia systémov	27
5.1	Identifikácia parametrov pomocou prechodovej charakteristiky	27
5.2	Metóda najmenších štvorcov	27
5.3	Identifikácia parametrov systému pomocou nástroja IDENT v programe MATLAB	29
5.4	Identifikácia elektrickej časti jednosmerného motora	29
5.4.1	Identifikácia pomocou prechodovej charakteristiky	30
5.4.2	Identifikácia metódou najmenších štvorcov	32
5.4.3	Identifikácia pomocou programu IDENT	32
5.5	Identifikácia mechanických parametrov	34
6	Návrh regulátorov	36
6.1	Metóda štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu	36
6.2	Návrh regulátora pre sústavu	37
6.2.1	Prúdový regulátor	37
6.2.2	Otáčkový regulátor	40
7	Prípravok	43
7.1	Bloková schéma	43
7.2	Aplikácia pre prípravok	43
8	Záver	47
9	Literatúra	48
10	Zoznam príloh	49
A.	Laboratórna úloha	50

Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1	Rez jednosmerného motora s budením permanentnými magnetmi [1] ..	12
Obrázok 2.2	Náhradná schéma jednosmerného motora s konštatným magnetickým tokom [1].....	12
Obrázok 2.3	Model jednosmerného motora.....	14
Obrázok 3.1	CompacRIO – 9076 [2].....	15
Obrázok 3.2	Blokový diagram NI 9505.....	16
Obrázok 3.3	NI 9505 LED indikátory [3].....	17
Obrázok 3.4	Konektor DSUB	18
Obrázok 3.5	Konektor motor	18
Obrázok 3.6	Diferenciálny obvod enkóderu [3]	19
Obrázok 3.7	Obvod enkóderu pripojeného pomocou jedného vodiča [3]	19
Obrázok 4.1	Bloková schéma	21
Obrázok 4.2	Čelný panel.....	22
Obrázok 4.3	PWM generácia	23
Obrázok 4.4	Enkóderová slučka	24
Obrázok 4.5	Meranie prúdu	24
Obrázok 4.6	Prúdový regulátor.....	25
Obrázok 4.7	Otáčkový regulátor.....	25
Obrázok 4.8	Real-Time.....	26
Obrázok 4.9	Štruktúra Case	26
Obrázok 5.1	Odozva na skokovú zmenu prúdu	30
Obrázok 5.2	Skoková zmena vstupného napätia	31
Obrázok 5.3	Skoková zmena výstupného prúdu.....	31
Obrázok 5.4	Prechodové charakteristiky	33
Obrázok 6.1	Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 1$	37
Obrázok 6.2	Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 10$	38
Obrázok 6.3	Skoková zmena riadenia prúdu	39
Obrázok 6.4	Overenie prúdového regulátora.....	39
Obrázok 6.5	Frekvenčná charakteristika.....	40
Obrázok 6.6	Odozva na skokovú zmenu riadenia	41
Obrázok 6.7	Odozva na skok riadenia 0-1000 ot/min	42
Obrázok 7.1	Bloková schéma prípravku.....	43
Obrázok 7.2	Aplikácia v LabVIEW.....	44
Obrázok 7.3	Aplikácia IdentRT-prvá časť.....	45
Obrázok 7.4	Aplikácia IdentRT-druhá časť.....	45
Obrázok 7.5	Prípravok	46
Obrázok 7.6	Compact cRIO.....	46
Obrázok 10.1	Náhradná schéma jednosmerného motora[1].....	50
Obrázok 10.2	Matematický model jednosmerného motora[1]	51
Obrázok 10.3	Bloková schéma	51

Obrázok 10.4 Nástroj IDENT	52
Obrázok 10.5 Výstupné hodnoty prúdu	54
Obrázok 10.6 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 1$	56
Obrázok 10.7 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 10$	56
Obrázok 10.8 Overenie prúdového regulátora	57
Obrázok 10.9 Frekvenčná charakteristika.....	58
Obrázok 10.10 Overenie otáčkového regulátora	59

1 ÚVOD

Cieľom bakalárskej práce Riadene dvojice spojených jednosmerných motorov je zoznámiť sa s daným prípravkom a vytvoriť prepojenie s programovacím prostredím LabVIEW. Tento prípravok je vytvorený pre použitie do laboratórií na meranie vlastností jednosmerných motorov, meranie zaťažovacích charakteristík, identifikáciu parametrov danej sústavy. V jednotlivých kapitolách sa budem zaoberať jednosmernými motormi a ich matematickými modelmi, vlastnosťami a parametrami daného modulu Compact cRio, programovacím prostredím LabVIEW, cez ktoré je ovládaný prípravok dvojice motorov, možnosťami identifikácie parametrov sústav, na základe týchto parametrov možnosti návrhu regulátorov pre prípravok a aplikáciou vytvorenou v LabVIEW pre ovládanie prípravku.

2 JEDNOSMERNÉ MOTORY

2.1 Princíp a konštrukcia jednosmerného motora

Jednosmerný motor je jeden z najstarších elektrických točivých strojov. Jednosmerný motor patrí medzi ideálne regulačné systémy – zmenou napätia privedeného na kotvu jednosmerného motora sa dajú plynule riadiť otáčky motora, prípadne reverzácia. Tieto motory sa používajú tam, kde je potrebný veľký rozsah regulácie rýchlosti alebo, kde sa vyskytujú sťažené podmienky pri rozbehu motora. Jednosmerné motory patria medzi nenahraditeľné súčasti obrábacích strojov, priemyselných robotov, a sú využité aj v automobilovom priemysle.

Jednosmerné motory sa delia nielen podľa konštrukcie ale aj podľa prepojenia obvodu kotvy s buđením. [1]

Pre regulované sústavy sa používajú najmä jednosmerné motory s cudzím buđením a motory s buđením permanentnými magnetmi v statore. Magnety sa používajú z magneticky tvrdých materiálov, feritov a spekaných materiálov zo vzácnych zemín, napr. zlúčeniny neodýmu, železa a bóru. Medzi aktívne časti jednosmerného motora patria stator s permanentnými magnetmi a pólovými nástavcami z mäkkého železa pre koncentráciu magnetického toku do vzduchovej medzery, rotor (kotva) s vinutím, tvorený jednotlivými cievkami, uloženými v drážkach a vyvedenými na komutátor, ktorý spolu s uhlíkovými kefami a kefovými držiakmi tvorí tzv. zberné ústrojenstvo. Takýto jednosmerný motor s buđením permanentnými magnetmi môžeme vidieť v reze na Obrázok 2.1. [1]

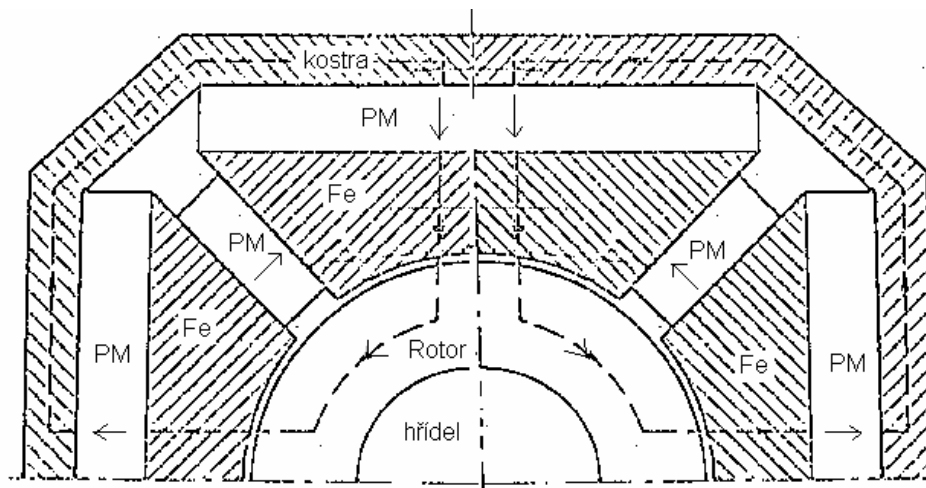
Jednosmerné motory sú popísané týmito základnými rovnicami: vo vinutí kotvy sa indukuje napätie pri otáčaní motora uhlovou rýchlosťou ω

$$U_i = C\phi\omega \quad [\text{V}] \quad (2.1)$$

Pôsobením prúdu v kotve a magnetického toku vzniká moment

$$M = C\phi I \quad [\text{Nm}] \quad (2.2)$$

C je konštanta motora (napäťová, momentová), ϕ je magnetický tok a I je prúd prechádzajúci kotvou.[1]



Obrázok 2.1 Rez jednosmerného motora s buđením permanentnými magnetmi [1]

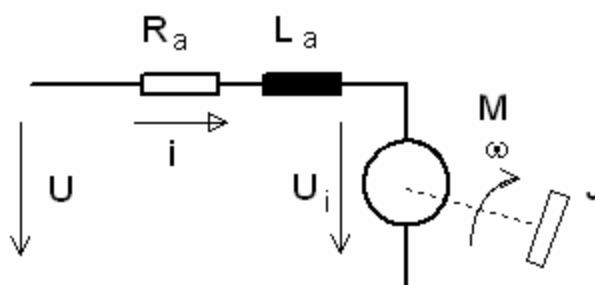
Jednosmerný motor s permanentnými magnetmi má konštantný magnetický tok, ktorého veľkosť závisí od konštrukcie magnetického obvodu a od použitého typu jednotlivých magnetov. Keďže sa magnetický tok nemení, je konštantný, otáčky je možné riadiť len zmenou napätia privedeného na kotvu. Pre obvod kotvy platí rovnica rovnováhy elektrických napätí

$$U = R_a I_a + C \phi \omega \quad [V] \quad (2.3)$$

R_a je odpor vinutia kotvy, I_a je prúd kotvy. [1]

2.2 Prechodný stav jednosmerného motora

Na Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov. vidíme náhradnú schému jednosmerného motora, z ktorej môžeme odvodiť sústavu diferenciálnych rovníc popisujúcich dynamický systém. Prevedením týchto rovníc pomocou Laplaceovej transformácie získame operátorový prenos systému, čiže jednosmerného motora.



Obrázok 2.2 Náhradná schéma jednosmerného motora s konštantným magnetickým tokom [1]

$$u_a = R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C\phi\omega \quad [\text{V}] \quad (2.4)$$

$$C\phi i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_0 \quad [\text{Nm}] \quad (2.5)$$

J predstavuje celkový moment zotrvačnosti na hriadieli motora, B koeficient viskózneho trenia a M_0 moment mechanického odporu. Rovnica (2.4) vyjadruje rovnováhu napätí v obvode kotvy, rovnica (2.5) vyjadruje rovnováhu momentov na hriadieli motora.

Z rovníc (2.4), (2.5) je možné odvodiť pomocou Laplaceovej transformácie prenosovú funkciu jednosmerného motora, kde deriváciu prúdu kotvy nahradíme operátorom p . Keď dosadíme za $C\phi\omega = u_i$ rovnica rovnováhy napätí nadobudne nový operátorový tvar

$$U_a = R_a I_a + pL_a I_a + U_i \quad [\text{V}] \quad (2.6)$$

Elektrické parametre jednosmerného motora môžeme vyjadriť pomocou operátorového prenosu $F_1(p)$, ktorý vyjadruje pomer výstupného prúdu kotvy I_a k vstupnému napätiu, vyjadreného ako rozdiel privedeného napätia na kotvu a indukovaného napätia U_i . Prenos takto vyjadrenej elektrickej časti jednosmerného motora má tvar zotrvačného článku so zosilnením $1/R_a$ a s časovou konštantou τ_a

$$F_1(p) = \frac{I_a}{U_a - U_i} = \frac{1/R_a}{1 + p\tau_a} \quad \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.7)$$

Model obsahuje aj ďalší člen, ktorý je čisto proporcionálny. Tento člen vyjadruje závislosť momentu jednosmerného motora a prúdu, ktorý prechádza kotvou $m = C\phi i_a$, v operátorovom tvare $M = C\phi I_a$. Prenos tohto člena je

$$F_2(p) = \frac{M}{I_a} = C\phi \quad (2.8)$$

Keď zanedbáme viskózne trenie B , rovnica rovnováhy momentov (2.5) nadobudne operátorový tvar

$$M = pJ\omega + M_0 \quad (2.9)$$

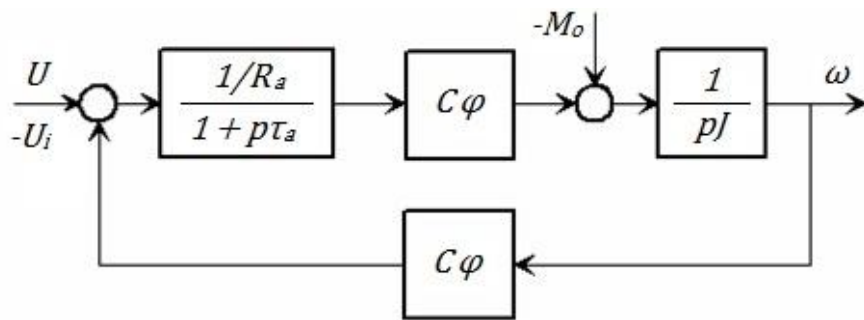
Prenos člena s momentom zotrvačnosti J má integračný charakter

$$F_3(p) = \frac{\omega}{M - M_0} \quad (2.10)$$

Indukované napätie v kotve a uhlová rýchlosť sú medzi sebou lineárne závislé, prenos tohto člena je proporcionálny a má tvar

$$F_4(p) = \frac{U_i}{\omega} = C\phi \quad (2.11)$$

Z týchto prenosových funkcií $F_1(p)$, $F_2(p)$, $F_3(p)$, $F_4(p)$ vytvoríme výsledný matematický model jednosmerného motora s konštantným magnetickým tokom, ktorého bloková schéma je na Obrázok 2.3. [1]



Obrázok 2.3 Model jednosmerného motora

Jednotlivé časti tohto matematického modelu budeme indentifikovať v ďalších kapitolách.

3 COMPACTRIO

3.1 CompactRio – 9076

CompactRio - 9076 je konfigurovateľné šasi pre Embedded systémy s integrovaným inteligentným Real-Time prostredím a prostredím hradlových polí FPGA od firmy National Instruments ako je vidieť na Obrázok 3.1.



Obrázok 3.1 CompacRIO – 9076 [2]

Špecifikácie

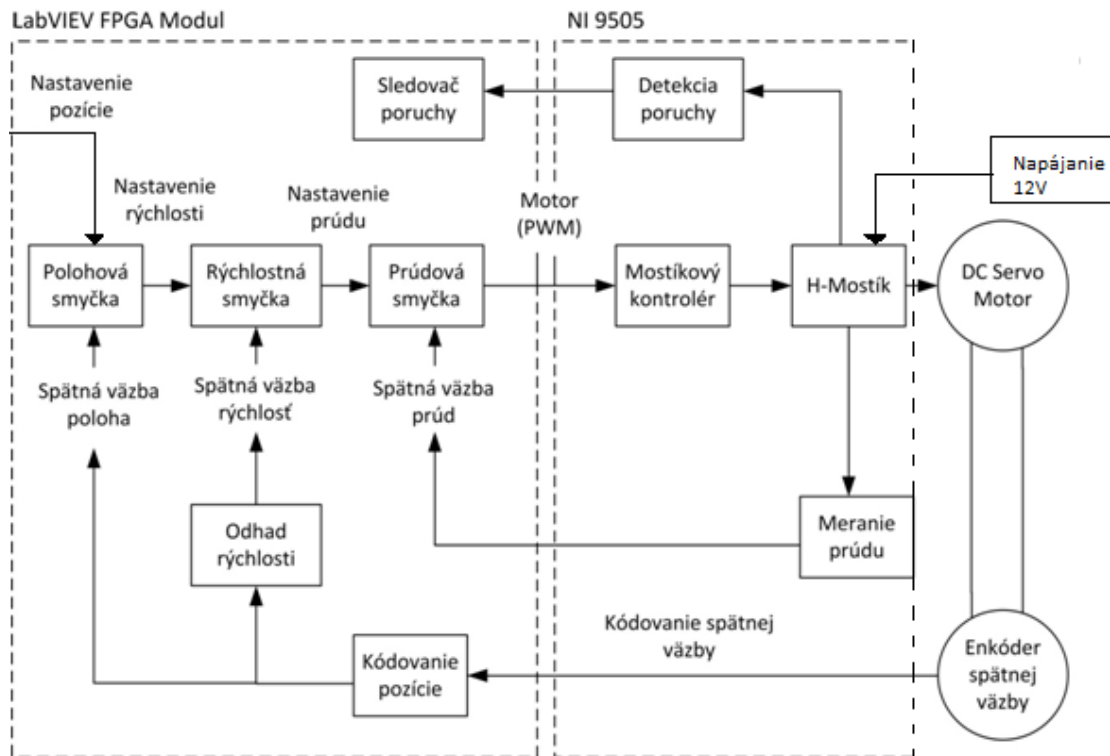
- 10BaseT a 100BaseTX Ethernet sieťové rozhranie
- Kompatibilita IEEE 802.3
- Komunikačné rýchlosti 10Mbps, 100Mbps
- Maximálna dĺžka prepojenia 100m/segment
- RS – 232 Serial port
- Systémová pamäť 256 MB
- Nevolatilná pamäť 512MB
- Konfigurovateľné FPGA

Požiadavky na napájanie

- Odporúčané napájanie 24 W, 24 VDC
- Spotreba maximálne 15 W
- Rozsah napájacieho napätia 9 – 30V[2]

3.2 NI 9505

NI 9505 je vhodná karta pre jednosmerný servo pohon. Poskytuje jedinečnú flexibilitu a prispôsobenie. Spolupracuje s modulom LabVIEW FPGA. Na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** vidíme funkčnosť NI 9505, pracuje v spojení s modulom LabVIEW FPGA na ovládanie aplikácie. Pre prípravok dvojice spojených jednosmerných motorov je potrebné mať použité dve takéto karty NI 9505, každú pre jeden motor.



Obrázok 3.2 Blokový diagram NI 9505

Obsahuje typické aplikácie ako slučka na určenie polohy, slučka na určenie rýchlosti a slučka na určenie prúdu. Tieto aplikácie sa vykonávajú v FPGA module.

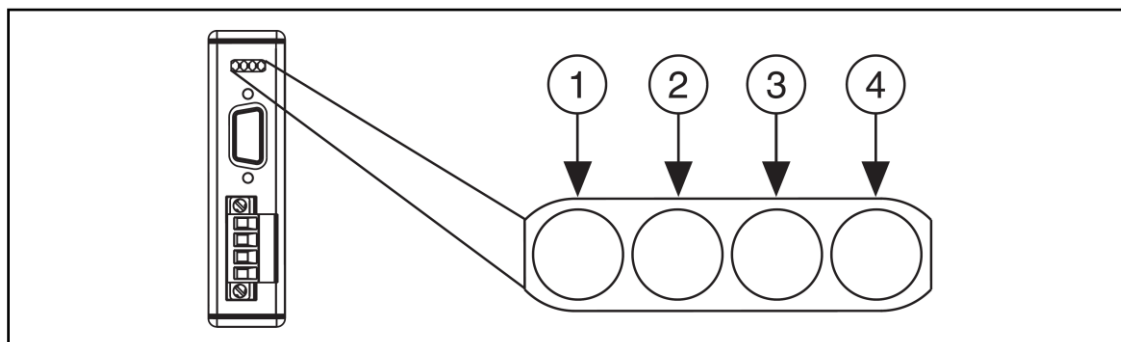
NI 9505 vráti z motora alebo pohonu aktuálne dáta do LabVIEW FPGA modulu pre ďalšie použitie a spracovanie v prúdovej slučke alebo monitorovanie.

Tiež vracia informácie o stave ako sú chybový stav, správne napájanie, núdzové zastavenie.

LabView FPGA modul generuje PWM signál, ktorý odošle do NI 9505. PWM, ktorý odpovedá výstupu prúdového regulátora. Z momentovej rovnice je vidieť, že moment je priamo úmerný prúdu. Mohli by sme tento regulátor nazývať taktiež regulátor momentu.

Signály z kvadrátneho enkódera sú cez NI 9505 ďalej spracované v module LabVIEW FPGA, na určenie polohy a rýchlosti motora alebo pohonu.

NI 9505 má 4 LED indikátory, ktoré vidíme na Obrázok 3.3, na poskytnutie informácií o svojom aktuálnom stave.



Obrázok 3.3 NI 9505 LED indikátory [3]

- 1 – POWER (zelená)
- 2 – V_{SUP} (Motor Power) (zelená)
- 3 – Disable (žltá)
- 4 – Fault (červená)

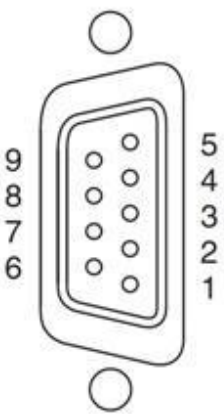
POWER – rozsvieti sa, keď je správne vložený do šasi

V_{SUP} – rozsvieti sa, keď motor je správne pripojený a má privedené napájanie

Disable – rozsvieti sa, keď je zakázaný pohon, je zakázaný pri každom zapnutí

Fault – rozsvieti sa, ak dôjde k poruche, napr. prepätie, prekročenie teploty

NI 9505 má 9-pinový DSUB konektor, (Obrázok 3.4), ktorý poskytuje pripojenie vstupov z enkódera, pripojenie napájania +5V pre enkóder, pripojenie pre núdzové zastavenie a pripojenie COM. Má tiež konektor na pripojenie motora a napájanie pre motor (Obrázok 3.5).

Konektor	Pin	Signál
	1	fáza z enkóderu A+
	2	fáza z enkóderu B+
	3	index Z+
	4	bezpečnostný stop
	5	+ 5 V výstup
	6	fáza z enkóderu A-
	7	fáza z enkóderu B-
	8	index Z-
	9	COM spoločná zem

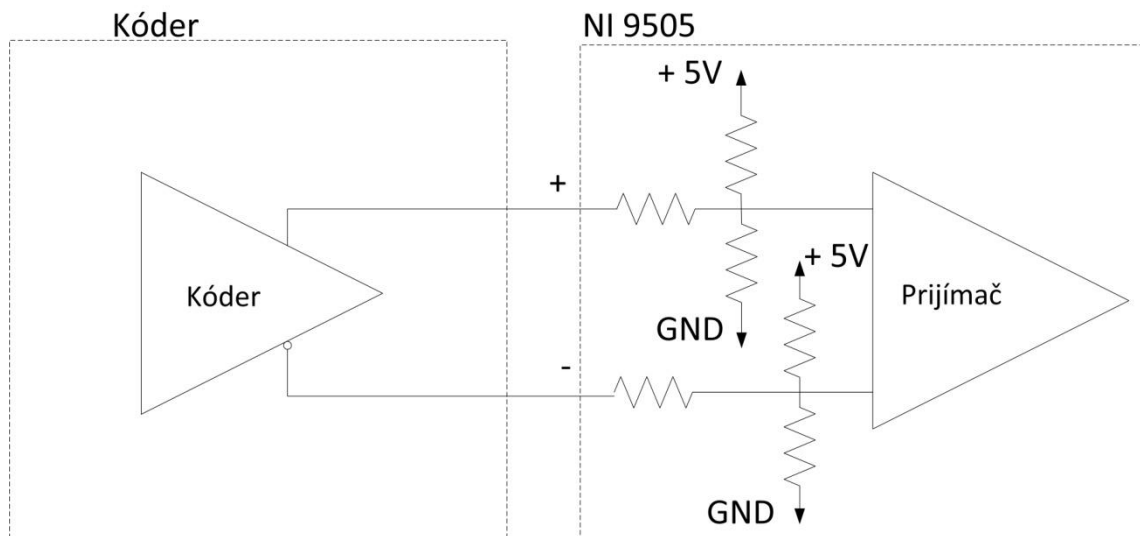
Obrázok 3.4 Konektor DSUB

Modul	Terminal	Signál
	M+	MOTOR+
	M-	MOTOR-
	C	napájanie pre motor (zem)
	V	napájanie pre motor

Obrázok 3.5 Konektor motor

Signály z enkóderu sa skladajú z fázy A, fázy B a indexu Z. Tieto signály sú digitálne signály, sú používané v module LabVIEW na určenie pozície a rýchlosti motora.

Ak je dĺžka kábla väčšia ako 3 metre používa sa zapojenie enkóderu, ako snímač s diferenciálnymi výstupmi. Napájanie pre enkóder je generované v module NI 9505 a pripojené pomocou 5 pinu DSUB konektora. Zapojenie je možné vidieť na Obrázok 3.6.



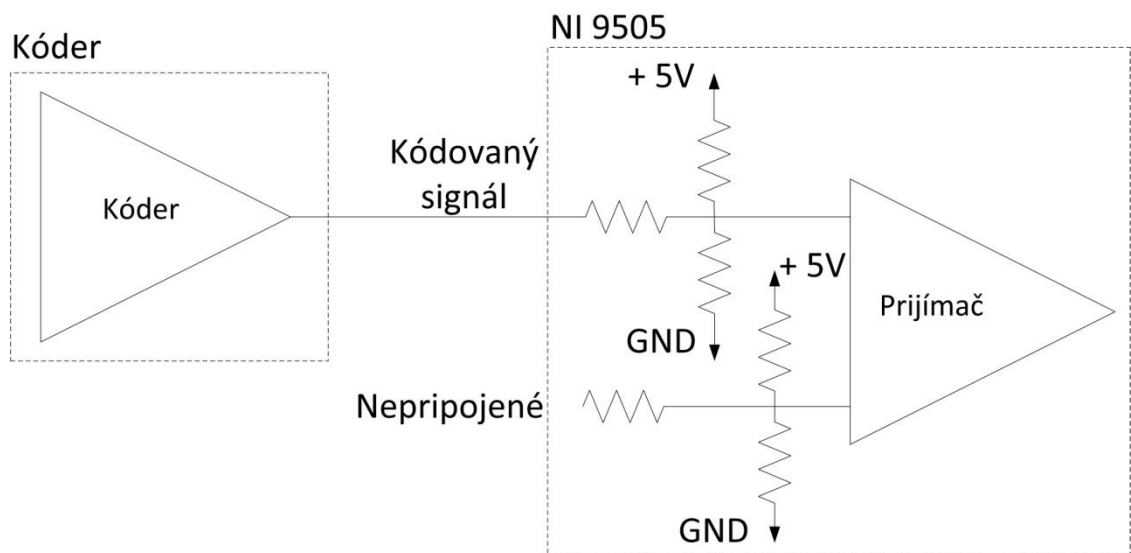
Obrázok 3.6 Diferenciálny obvod enkóderu [3]

Uzavreté slučky servo aplikácií vyžadujú smerovú polaritu medzi motorom a snímačom pre správnu funkciu. Jeden zo štandardov smerovej polarity je nasledujúci:

Pozitívny – v smere hodinových ručičiek

Negatívny – proti smeru hodinových ručičiek

Ak enkóder počíta nesprávne, tak treba zmeniť polaritu enkóderu v FPGA alebo vymeniť pripojenie fáz A a B. Zapojenie je možné vidieť na Obrázok 3.7.



Obrázok 3.7 Obvod enkóderu pripojeného pomocou jedného vodiča [3]

Parametre:

- Napájanie motora 8-30 V, 12 A max
- Frekvencia impulzov PWM 20 kHz odporúčaná, 40 kHz max
- Rozsah merania prúdu $\pm 12,7\text{A}$
- Maximálna prevádzková teplota $115\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Výstup z enkódera $5\text{V} \pm 5\%$, prúd 125 mA
- Spotreba 100 mW max [3]

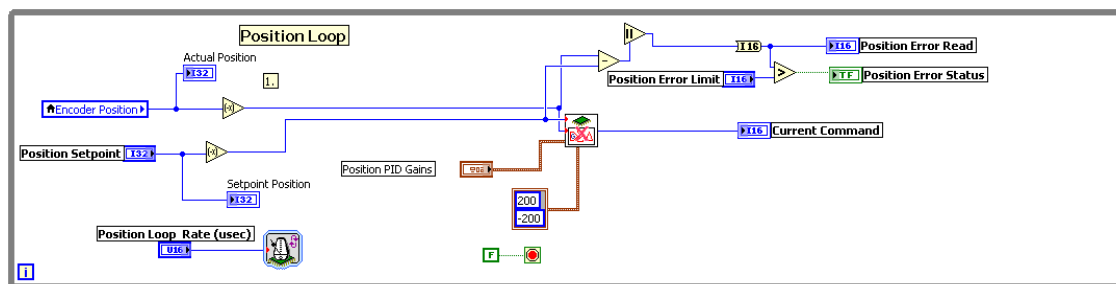
4 LABVIEW

4.1 Súčasti vývojového systému LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je univerzálnym vývojovým prostredím vhodným pre vytváranie aplikácií zapadajúcich do oblasti merania a do oblasti riadenia. Poskytuje užívateľovi plnohodnotný programovací jazyk so všetkými odpovedajúcimi dátovými a programovými štruktúrami v grafickej podobe.

LabVIEW je vývojovým prostredím na úrovni napr. C jazyka, ktorý nie je formou textu ale formou grafického programovania. Výsledný produkt naprogramovaný z tohto vývojového prostredia je nazývaný virtuálny prístroj (Virtual Instrument), pretože v skutočnosti nahrádza fyzický merací prístroj.[4]

Tento virtuálny prístroj sa skladá z dvoch základných častí. Jedna z nich je bloková schéma, ktorú môžeme vidieť na Obrázok 4.1



Obrázok 4.1 Bloková schéma

V blokovej schéme sa dajú použiť rôzne programovacie prvky, ako napríklad globálne a lokálne premenné, numerické konštanty, rôzne typy premenných, či už integer, double alebo fixed point. Tieto typy signálov sú aj farebne odlíšené. Modrá farba predstavuje typ integer, zelená boolovský typ, oranžová double, šedá fixed point a hnedá pole viacero premenných.

Obsahuje veľké množstvo matematických operácií ako napríklad sčítanie, odčítanie, násobenie, delenie, absolútnu hodnotu. Nechýbajú ani logické operácie ako súčin, súčet alebo negácia.

Všetky tieto operácie sú naprogramované v slučkách. Najčastejšie používaná je slučka while, ktorá sa vykonáva na základe počtu tikov nastavených v slučke. Ďalšia používaná slučka je časová, v ktorej si môžeme nastaviť s akým časom sa bude vykonávať a akou periódou vzorkovania.

Použité programovacie prvky ako napríklad premenné sú zobrazené aj v druhej základnej časti virtuálneho prístroja, a to čelný panel.

Čelný panel, ktorý môžeme vidieť na Obrázok 4.2, obsahuje rôzne ovládacie, indikačné a zobrazovacie prvky. Z najviac používaných zobrazovacích prvkov je WaveForm Chart. Je to základný graf na zobrazovanie priebehov závislých na čase.

Medzi ovládacie prvky patria tlačidlá, prepínače, riadiace prvky ako napríklad Duty Cycle, ktorý môžeme vidieť na Obrázok 4.2.

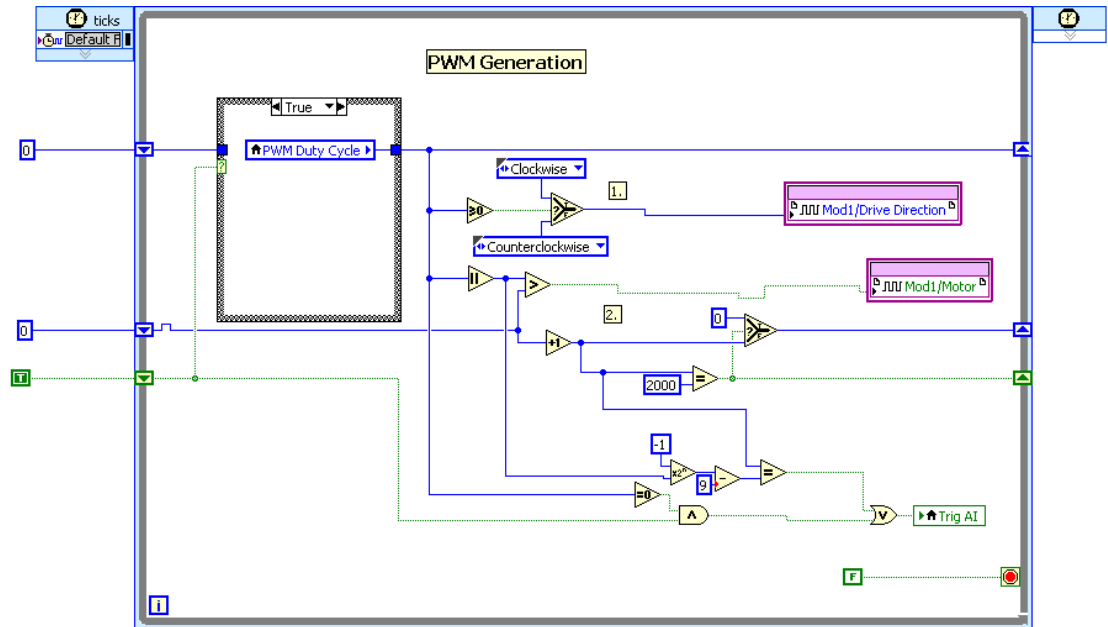
Indikačné prvky sú najčastejšie používané na hlásenie vzniku nejakej chyby alebo stavu prípravku, prípadne zapnutia pohonu alebo prehriatie motora.



Obrázok 4.2 Čelný panel

4.2 Programovanie prípravku

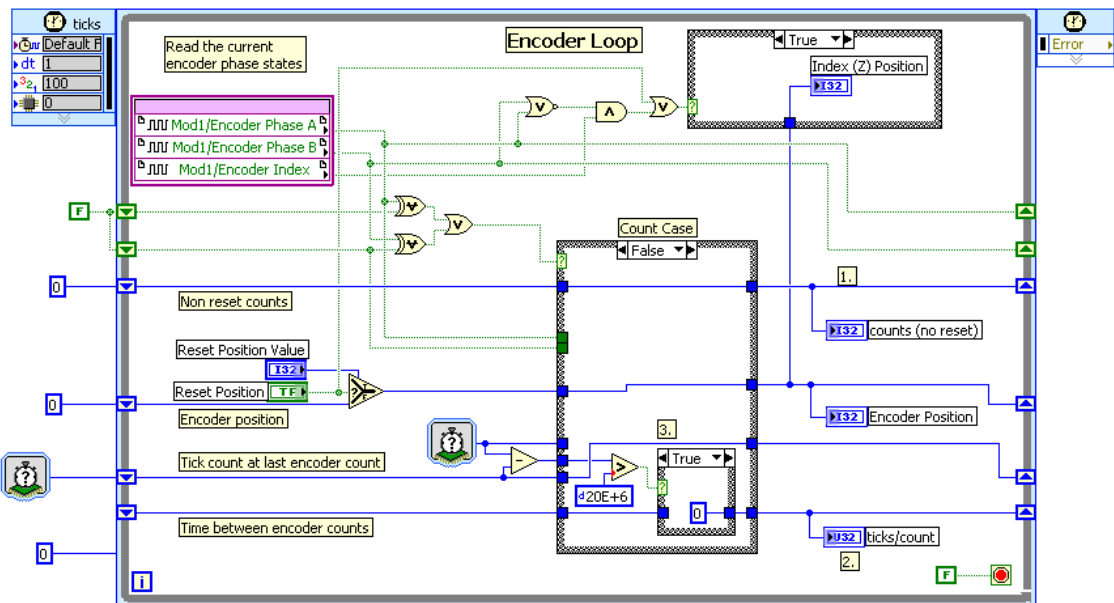
Motor prípravku je riadený pomocou pulzne šírkovvej modulácie PWM. Je realizovaná v karte NI 9505 pomocou H-mostíku, ktorý privádza na motor strednú hodnotu napätia. Bloková schéma, pomocou ktorej PWM generujeme je na Obrázok 4.3



Obrázok 4.3 PWM generácia

Podľa hodnoty striedy zadanej do PWM Duty Cycle sa určí, či sa motor bude otáčať v smere hodinových ručičiek alebo proti smeru, a ako rýchlo sa pripája napätie na motor. Veľkosť tejto striedy je ohraničená na hodnoty -2000 až 2000, čo odpovedá frekvencii PWM 20 kHz.

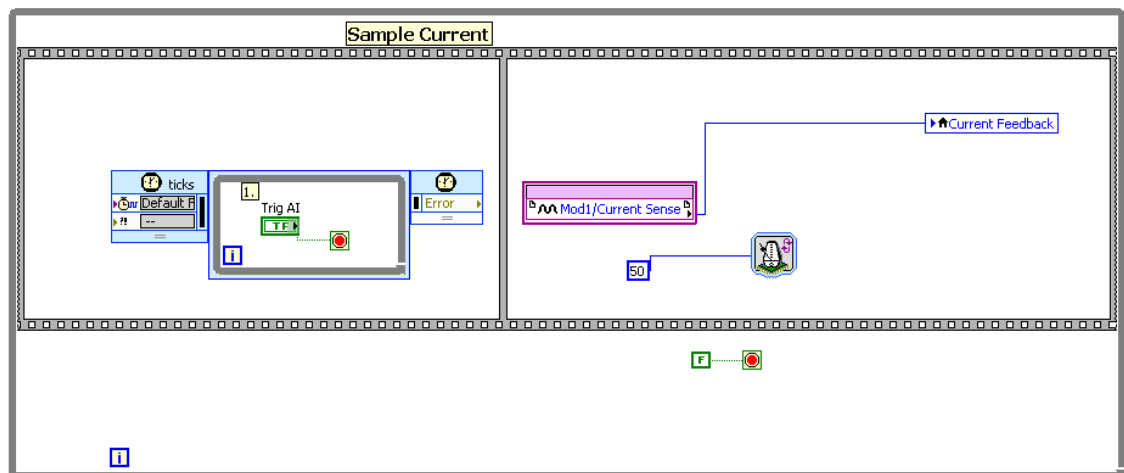
Signály z enkódera fáza A, fáza B a index Z sa spracovávajú v enkóderovej slučke. Z týchto signálov pomocou logických operácií dokážeme určiť na akej pozícii sa nachádza hriadeľ motora, ktorá sa zapisuje do premennej Encoder Position, ktorá môže byť použitá ako aktuálna poloha motora pri polohovom riadení prípravku. Ticks/counts je premenná, ktorá obsahuje číslo pomeru tikov procesora Compact-cRIO ku počtu pulzov z enkódera. Z tejto hodnoty sa potom určujú aktuálne otáčky motora. Táto slučka obsahuje funkcie ako je napríklad resetnutie pozície enkódera a nastavenie na nami požadovanú hodnotu. Blokovú schému tejto slučky môžeme vidieť na Obrázok 4.4.



Obrázok 4.4 Enkóderová slučka

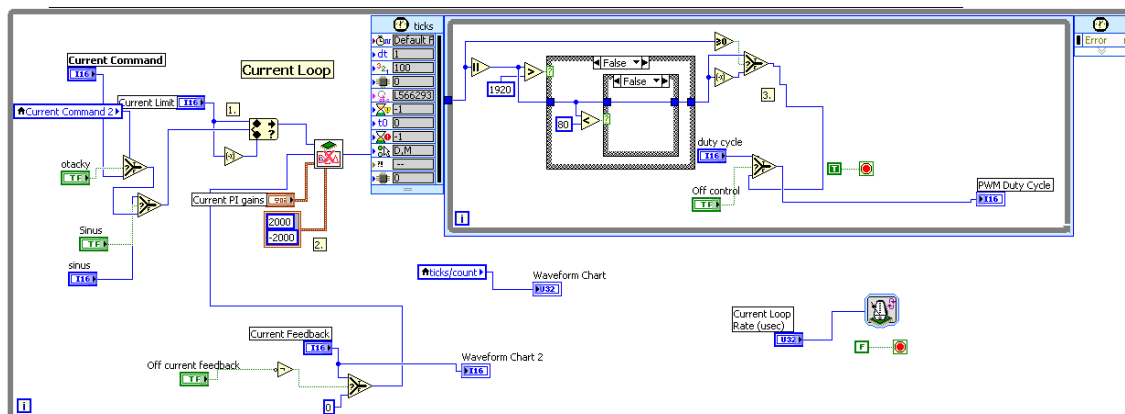
Pri určovaní otáčok sme prišli na problém, že napätie z enkóderu nedosahuje hodnotu +5V ale celá logická úroveň bola „posunutá nižšie“ o 1,3V. Tento problém sme vyriešili prevodníkom napäťovej úrovne. Výsledok výpočtu otáčok bol veľmi kmitavý v rozsahu ± 200 otáčok za minútu. Preto bol pred graf, čo vykresľoval priebeh otáčok závislých na čase, zaradený Butterworth filter.

Karta NI 9505 má v sebe stavanú slučku na meranie prúdu prechádzajúceho motorom.



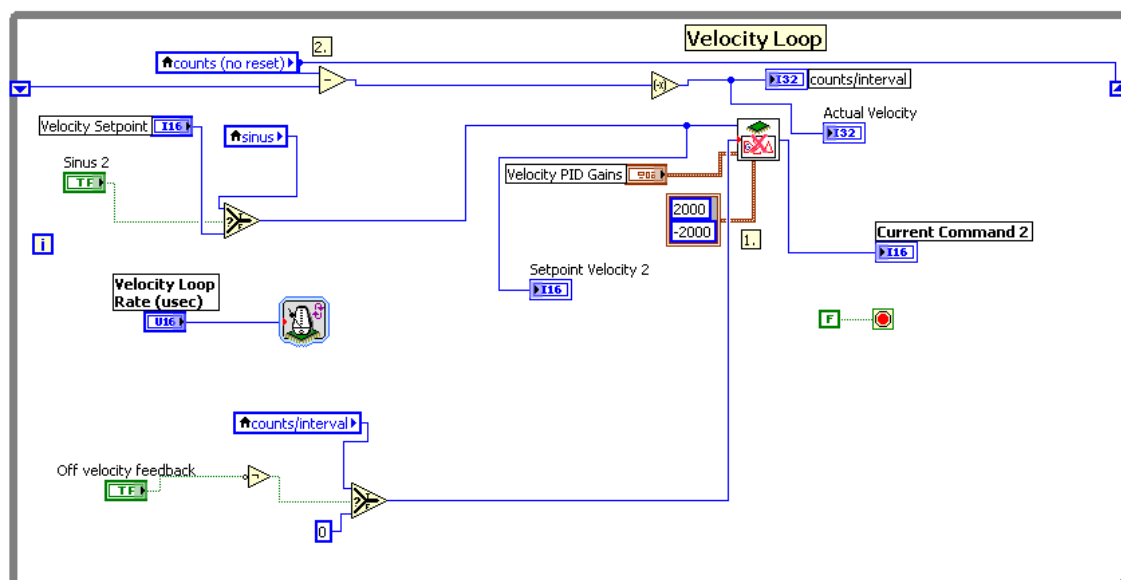
Obrázok 4.5 Meranie prúdu

Z tejto slučky (Obrázok 4.5) zapisujeme hodnotu prúdu do premennej Current Feedback s periódou vzorkovania 50 μ s. Hodnotu musíme vynásobiť číslom 0,0062, aby sme dostali presnú hodnotu odpovedajúcu prúdu v ampéroch. Premennú ďalej používame ako aktuálnu hodnotu prúdu pre slučku riadenia pomocou prúdového regulátora.



Obrázok 4.6 Prúdový regulátor

Na Obrázok 4.6 vidíme slučku s prúdovým regulátorom. Do regulátora vstupujú žiadaná hodnota prúdu Current Command, aktuálna hodnota prúdu Current Feedback, hodnoty jednotlivých konštánt regulátora Current PI gains a obmedzenie výstupu regulátora, ktorý je pripojený na vstup PWM ako hodnota striedy od -2000 do 2000. Regulátor obsahuje prúdové obmedzenie žiadanej hodnoty prúdu na nami nastavenú hodnotu prúdu Current Limit. Slučka obsahuje ešte niekoľko prepínačov pre samotné ovládanie motora bez regulátora pomocou veľkosti striedy, pre vypnutie a zapnutie spätnej väzby, pre identifikáciu systému, pre odskúšanie správnosti návrhu prúdového regulátora alebo pre použitie do nadradenej otáčkovej slučky, ktorú môžeme vidieť na Obrázok 4.7.

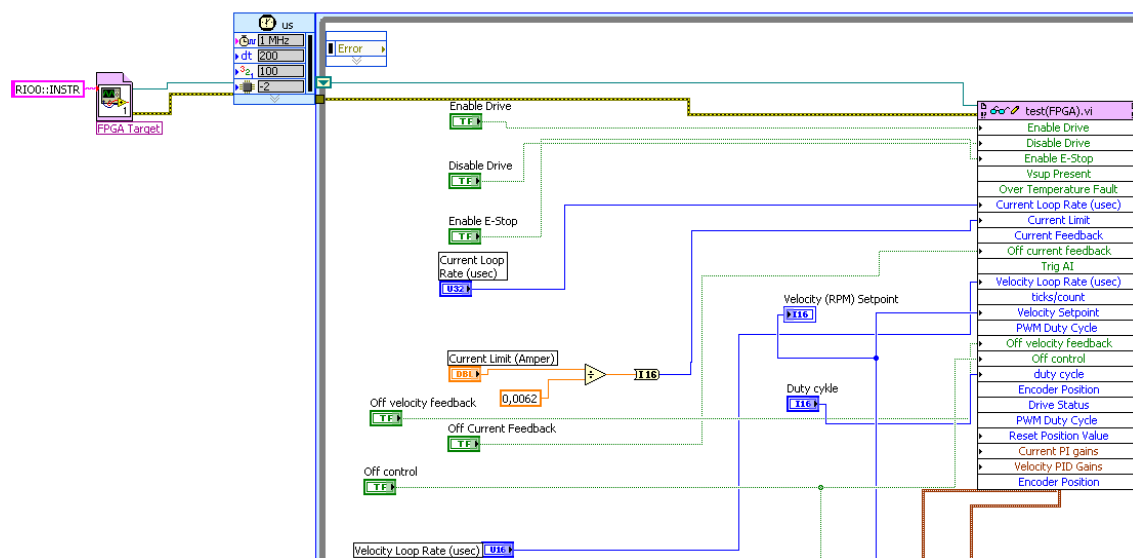


Obrázok 4.7 Otáčkový regulátor

V tejto slučke je naprogramovaný nadradený otáčkový regulátor pripojený na vstup prúdového regulátora. Pracuje tak isto ako prúdový regulátor so zmenami, ako sú

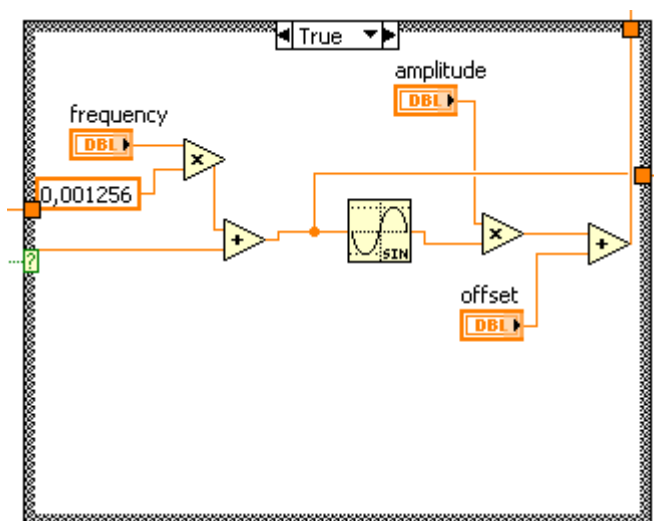
žiadaná aktuálna hodnota regulátora je rýchlosť. Tiež obsahuje niekoľko prepínačov pre vypnutie alebo zapnutie spätnej väzby.

Všetky tieto blokové schémy sú naprogramované v prostredí FPGA. Celkovú aplikáciu ovládame cez prostredie Real-Time, čo môžeme vidieť na Obrázok 4.8. V Real-Time sa FPGA súbor otvorí a predávajú sa mu parametre. Prostredie Real-Time je výhodnejšie pre výpočty. Obsahuje typ premenných double, čo FPGA neobsahovalo a mohlo sa v ňom deliť iba vo fixed point. Má aj svoje nevýhody ako, keď vykonávame veľa výpočtov naraz, vykresľujú sa nejaké grafy alebo sa generuje harmonický sínusový signál, procesor to nestíha, a tak celá aplikácia začne sekať, prípadne sa úplne resetuje Compact-cRio.



Obrázok 4.8 Real-Time

Pri identifikácii a pri overovaní správnosti návrhu regulátorov bolo potrebné naprogramované časti, ktoré nie je potrebné práve používať, dočasne vypnúť. Bolo to riešené Case štruktúrami, ako je vidieť na Obrázok 4.9.



Obrázok 4.9 Štruktúra Case

5 IDENTIFIKÁCIA SYSTÉMOV

5.1 Identifikácia parametrov pomocou prechodovej charakteristiky

Systém daného prípravku, jednosmerného motora s permanentnými magnetmi, má blokovú schému na Obrázok 2.3.

Pri zanedbaní momentu zotrvačnosti na hriadeli nám zostanú tri neznáme parametre, a to odpor vinutia R_a , konštantu stroja $C\phi$ a elektromagnetická časová konštanta τ_a .

Odpor vinutia R_a určíme tak, že privedieme na motor nízke napätie U_a , aby sa motor netočil, t. z. $\omega = 0$, rovnica (2.3) sa nám upraví do tvaru Ohmovho zákona

$$U_a = R_a I_a \quad (5.1)$$

a môžeme si vyjadriť neznámy parameter R_a .

Keď poznáme parameter R_a , privedieme na motor také napätie, aby sa motor točil. Z rovnice (2.3) dokážeme vyjadriť parameter $C\phi$ a so známymi otáčkami ω vypočítame jeho hodnotu.

Posledný parameter, elektromagnetická časová konštanta τ_a , určíme ako čas, kedy po privedení skokovej zmeny na vstupe systému, bude mať prúd na výstupe hodnotu rovnú 63% ustálenej hodnoty prúdu. Pre takto zidentifikovanú sústavu môžeme navrhnúť regulátory. [1]

5.2 Metóda najmenších štvorcov

Táto metóda je veľmi často používaná tam, kde máme k dispozícii namerané vstupné a výstupné dáta a potrebujeme určiť neznáme parametre systémov, ktorá vychádza z minimalizácie stratovej funkcie

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \epsilon^2(k) \quad (5.2)$$

$$\text{kde} \quad \epsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k) \cdot \theta \quad (5.3)$$

Význam jednotlivých symbolov:

N	počet prevedených meraní
$\varphi(k)$	stĺpcový vektor meraných veličín v kroku k
$y(k)$	skutočný (meraný) výstup systému v kroku k
θ	stĺpcový vektor neznámych parametrov

Pre výpočet neznámych parametrov systému je možné odvodiť vzťah

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (5.4)$$

$$\text{kde} \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \dots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix}$$

Uvedený vzťah je možné použiť len jednorázovo v situácii, kde bude získaný parameter potrebný pre identifikáciu. Pre náš systém by sa dala metóda najmenších štvorcov použiť takto

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{La} (u - Ra \cdot i - c\phi \cdot \omega) \quad (5.5)$$

Diferenciálnu rovnicu prevedieme na diferenčnú s periódou vzorkovania T_{vz}

$$i(k) = i(k-1) + \frac{T_{vz}}{La} (u(k-1) - Ra \cdot i(k-1) - c\phi \cdot \omega(k-1)) \quad (5.6)$$

$$i(k) = \left(1 - \frac{Ra \cdot T_{vz}}{La}\right) \cdot i(k-1) + \frac{T_{vz}}{La} \cdot u(k-1) - \frac{T_{vz} \cdot c\phi}{La} \cdot \omega(k-1) \quad (5.7)$$

Potom matice Y , ϕ , θ

$$Y = \begin{bmatrix} i(k) \\ i(k+1) \\ \dots \\ i(k+n-1) \end{bmatrix} \quad \phi = \begin{bmatrix} i(k-1) & u(k-1) & \omega(k-1) \\ i(k) & u(k) & \omega(k) \\ \dots & \dots & \dots \\ i(k+n) & u(k+n) & \omega(k+n) \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

kde n je počet meraní a koeficienty matice θ

$$a = \left(1 - \frac{Ra \cdot T_{vz}}{La}\right) \quad b = \frac{T_{vz}}{La} \quad c = -\frac{T_{vz} \cdot c\phi}{La}$$

Po výpočte rovnice (5.3) dostaneme vektor neznámych koeficientov θ .[5]

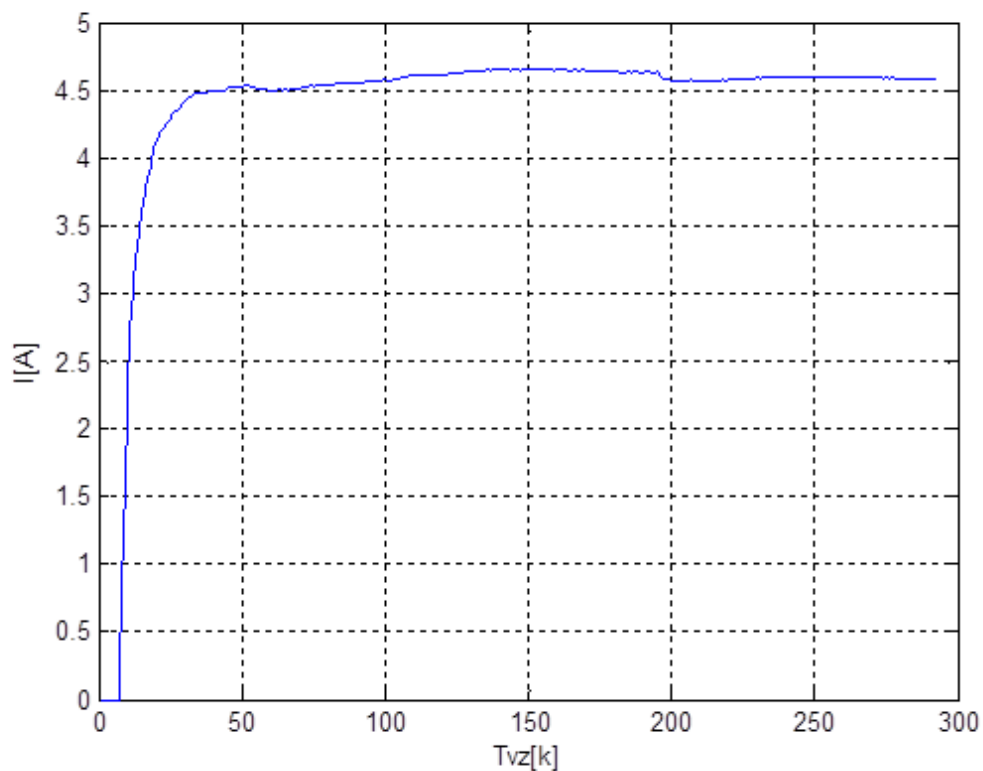
5.3 Identifikácia parametrov systému pomocou nástroja IDENT v programe MATLAB

Identifikačný nástroj IDENT v prostredí MATLAB ponúka interaktívne prostredie pre analýzu dát, z ktorých potom navrhne rôzne modely (parametrickej a neparametrickej identifikácie). Týmto modelom je možné potom porovnávať prechodové charakteristiky, zistiť zhodu navrhnutého modelu so zadanými dátami. Do nástroja je potrebné importovať vstupné, výstupné dáta a periódu vzorkovania, s ktorou boli dáta zmerané. Z týchto dát je možné vytvoriť rôzne modely. Pre identifikáciu elektrickej časti jednosmerného motora môžeme použiť lineárnu parametrickú estimáciu modelom ARX alebo modelom zotrvačného článku prvé rádu. Navrhnuté modely je možné medzi sebou porovnávať podľa rôznych kritérií.

5.4 Identifikácia elektrickej časti jednosmerného motora

Elektrickú časť jednosmerného motora tvorí zotrvačný článok prvého rádu z jednou časovou konštantou v menovateli a zosilnením. Pre porovnanie použijeme viacero metód identifikácie elektrických parametrov. Pre identifikáciu použijeme aplikáciu vytvorenú v programe LabVIEW (IdentRT.vi). Vypneme všetky regulátory, ktoré sú tam naprogramované tlačidlom OFF CONTROL, tým zabezpečíme, že signál z PWM je priamo pripojený na jednosmerný motor a nie je pripojená žiadna spätná väzba. Vymažeme namerané dáta z oboch grafov cez pravé tlačidlo myši/Data Operations/Clear Chart. Nastavíme si veľkosť striedy Duty Cycle na hodnotu 0. Spustíme systém tlačidlom ENABLE DRIVE, os motora zaistíme, aby sa neotáčala a nastavíme striedu na hodnotu 1000, nie viac, pretože bude väčší moment motora a bude problém udržať motor, aby sa netočil. V grafe *Actual Current* je vykreslená závislosť výstupného prúdu jednosmerného motora na perióde vzorkovania a v grafe *Input Voltage* skoková zmena strednej hodnoty napätia privádzaného na sústavu.

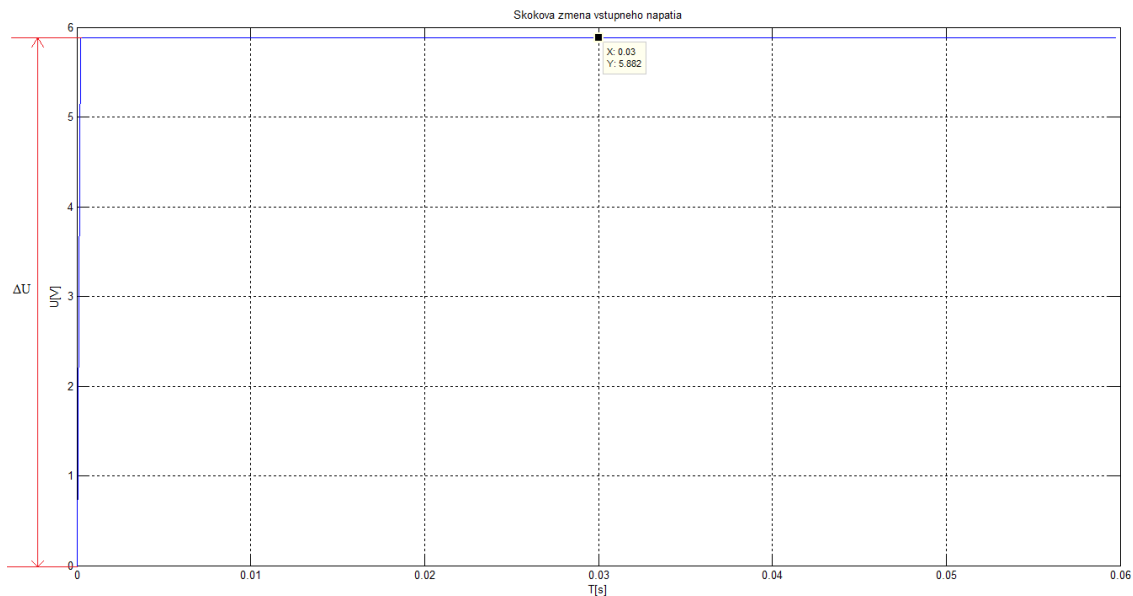
Tieto namerané dáta je možné exportovať do Excelu, a to pravým tlačidlom myši v karte Export, a následne do programu MATLAB.



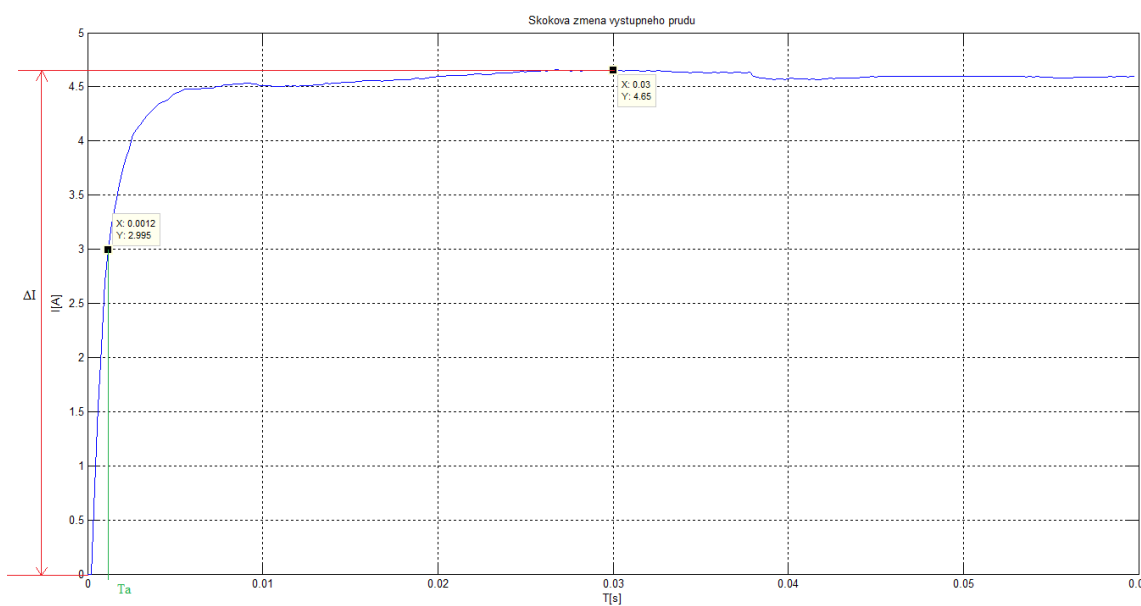
Obrázok 5.1 Odozva na skokovú zmenu prúdu

5.4.1 Identifikácia pomocou prechodovej charakteristiky

Pre túto identifikáciu použijeme tú istú prechodovú charakteristiku ako pre program IDENT. Zosilnenie sústavy je definované ako pomer skokovej zmeny výstupného prúdu ku skokovej zmene vstupného napätia.



Obrázok 5.2 Skoková zmena vstupného napätia



Obrázok 5.3 Skoková zmena výstupného prúdu

Z odoziev vypočítame zosilnenie

$$K = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{4,65}{5,882} = 0,79 \quad (5.8)$$

Časovú konštantu určíme ako 63% ustálenej hodnoty výstupného prúdu, čo odpovedá približne 1,2 ms. Výsledný prenos má tvar

$$F_S(p) = \frac{0,79}{(0,0012p+1)} \quad (5.9)$$

5.4.2 Identifikácia metódou najmenších štvorcov

Budeme vychádzať z toho, že identifikovaný diskretný prenos bude mať tvar

$$F(z^{-1}) = \frac{bz^{-1}}{1+az^{-1}} \quad (5.10)$$

Z prenosu si vyjadríme diferenčnú rovnicu

$$y(k) = b \cdot u(k-1) - a \cdot y(k-1) \quad (5.11)$$

Rovnica metódy najmenších štvorcov

$$y = \phi^T \cdot \theta \quad (5.12)$$

$$\text{kde} \quad \phi = \begin{bmatrix} u(k-1) & -y(k-1) \\ u(k) & -y(k) \\ u(k+1) & -y(k+1) \\ \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ y(k+2) \\ \dots \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix}$$

Ako vstupy a výstupy použijeme predchádzajúce dáta. Neznáme parametre b a a dostaneme použitím opačného lomítka ($\theta = \phi \backslash Y$) v programe Matlab.

Prenos s vypočítanými parametrami má tvar

$$F(z^{-1}) = \frac{0,1396z^{-1}}{1-0,8208z^{-1}} \quad (5.13)$$

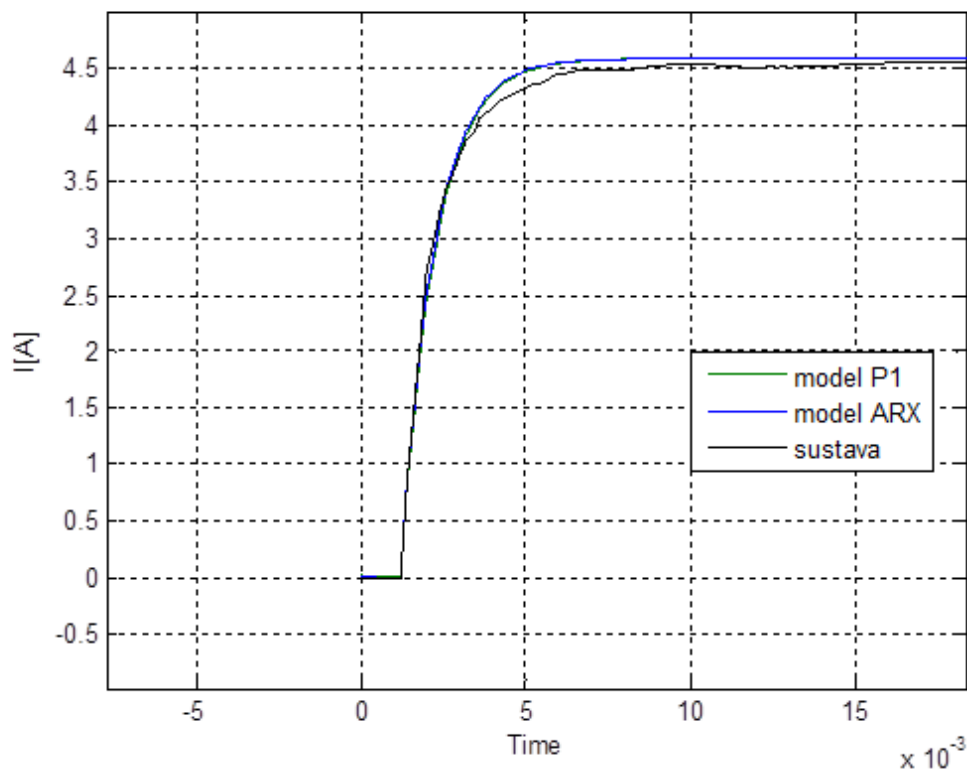
Po prevedení diskretného prenosu na spojitý prenos príkazom d2c, výsledný prenos má tvar

$$F_S(p) = \frac{0,779}{(0,0010p+1)} \quad (5.14)$$

5.4.3 Identifikácia pomocou programu IDENT

Namerané výstupné dáta a vstupné dáta (Obrázok 5.1) importujeme do nástroja IDENT programu MATLAB s periódou vzorkovania takou akou sme dáta namerali. V našom prípade to bolo 200μs.

Z týchto importovaných dát dáme navrhnuť lineárne parametrický model ARX, prípadne model zotrvačného článku prvého rádu, ktoré potom môžeme medzi sebou porovnať. Na (Obrázok 5.4) vidíme prechodové charakteristiky nášho systému (čierna farba), modelu ARX (modrá farba) a modelu prvého rádu (zelená farba).



Obrázok 5.4 Prechodové charakteristiky

Percentuálna zhoda modelov so sústavou vyšla pre model P1 93,06% a pre model ARX 92,96%. Po prevedení modelu ARX na spojitý systém, tak zosilnenie sústavy vyšlo 0,78 a časová konštanta 0,0011s. Výsledný prenos je

$$F_S(p) = \frac{0,78}{(0,0011p+1)} \quad (5.15)$$

Všetky tieto metódy dosiahli približne rovnaké výsledky. Pre porovnanie sme spravili identifikáciu elektrickej časti jednosmerného motora pomocou prechodovej charakteristiky na osciloskope. Z osciloskopu sme odčítali parametre systému, zosilnenie vyšlo $K_s = 0,85$ a časová konštanta $T_a = 2,5$ ms. Rozdiel týchto parametrov môže byť spôsobený zmenou začiatočných podmienok, napríklad zvýšenie teploty vinutia alebo iné natočenie rotora voči kartáčikom.

5.5 Identifikácia mechanických parametrov

Pre identifikáciu mechanických parametrov sme zvolili metódu frekvenčnej analýzy signálu. Metóda vychádza z toho, že ak na vstup systému privedieme harmonický signál o známej amplitúde a frekvencii, na výstupe sa po uplynutí prechodného deja nameriame harmonický signál o neznámej amplitúde a bude mať fázový posun oproti vstupnému signálu. Pomer amplitúdy výstupného signálu ku amplitúde vstupného signálu bude hodnota amplitúdy na amplitúdovo-frekvenčnej charakteristike a fázový posun bude predstavovať fázu na fázovo-frekvenčnej charakteristike. Keď tieto amplitúdy a fázové posuny zmeriame pre viaceré frekvencie dostaneme amplitúdovo a fázovo frekvenčnú charakteristiku. Podľa tejto charakteristiky potom identifikujeme systém.

Pre vypočítanie amplitúdy a fázy sme použili rozvoj do Diskrétnej Fourierovej rady.

$$f(k) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m e^{jm \frac{2\pi}{N} k} \quad (5.16)$$

$$c_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-jm \frac{2\pi}{N} k} \quad (5.17)$$

kde $k=0,1,2,\dots,N-1$, $m=0,1,2,\dots,N-1$

Táto rada vyjadruje periodickú postupnosť $f(k)$ ako lineárnu kombináciu komplexných exponenciálnych signálov

$$\phi_m(k) = e^{jm \frac{2\pi}{N} k} = \cos\left(m \frac{2\pi}{N} k\right) + j \sin\left(m \frac{2\pi}{N} k\right) \quad (5.18)$$

kde $m=0,1,2,\dots,N-1$

Množina c_m sa nazýva diskkrétne frekvenčné spektrum signálu $f(k)$. Tieto koeficienty sú komplexné čísla. Majú amplitúdy $|c_m|$ nazývané ako diskkrétne amplitúdové spektrum a ich fázy $\arg(c_m)$ nazývané ako diskkrétne fázové spektrum.[7]

Počítali sme cez jednu, prípadne viacero periód, kde sme hľadali jednu harmonickú. Diskkrétne frekvenčné spektrum sme vypočítali pre vstupný i výstupný signál. Z pomeru amplitúd sme určili modul a z rozdielu fáz sme určili výslednú fázu. Výpočet sme realizovali v Matlabe vytvorením funkcie *computePhases*. Funkcia má 6 vstupných parametrov (dáta vstupného signálu vo forme meno.xlsx programu Excel, tak isto dáta výstupného signálu, periódu signálov, amplitúdu, počet periód na výpočet, ofset). Výstup z funkcie je zosilnenie a fáza.

Zadané hodnoty			Namerané hodnoty	
Amplitúda	Frekvencia [Hz]	Ofset	Amplitúda	Fáza [°]
10	0,3	140	34,88	-50
50	1	140	12,85	-75
50	2	140	6,77	-85
100	10	140	1,34	-104
250	20	140	0,68	-144
300	50	140	0,28	-180

Namerané dáta importujeme do toolboxu IDENT ako amplitúdovo-fázovo frekvenčnú charakteristiku. Charakteristiku budeme estimovať ako systém s dvomi časovými konštantami. Výsledný prenos má tvar

$$Fs(p) = \frac{2,62}{(0,47p+1)(0,0066p+1)} \quad (5.19)$$

6 NÁVRH REGULÁTOROV

6.1 Metóda štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu

Návrh regulátora touto metódou sa vykonáva tak, že tvarujeme frekvenčnú charakteristiku otvorenej slučky na nami požadovaný tvar.

Amplitúdová charakteristika regulátora v dB je daná rovnicou

$$|F_R(j\omega)|_{dB} = |F_0(j\omega)|_{dB} - |F_S(j\omega)|_{dB} \quad (6.1)$$

a fáza vzťahom

$$\varphi_R(\omega) = \varphi_0(\omega) - \varphi_S(\omega) \quad (6.2)$$

Podľa týchto vzťahov určíme frekvenčnú charakteristiku regulátora ako rozdiel frekvenčnej charakteristiky otvorenej slučky a frekvenčnej charakteristiky sústavy. Toto môžeme vykonať iba v prípade ak sú frekvenčné charakteristiky v dB. Preto sa táto metóda vykonáva v logaritmických súradniciach. Tvar prechodného deja určuje stredné pásmo frekvencií. [6]

Požiadavky:

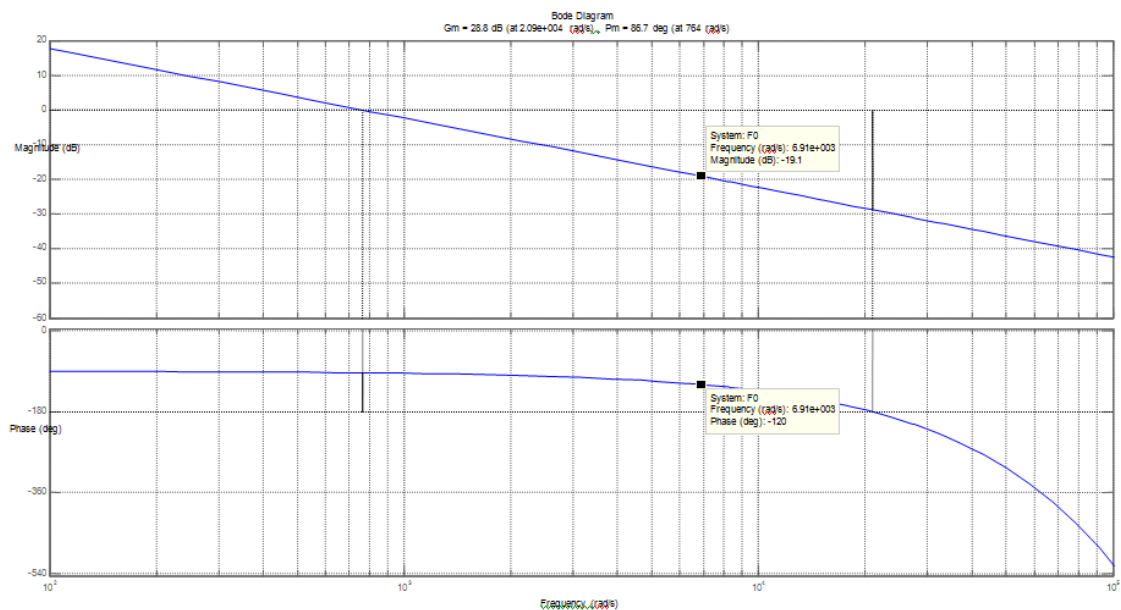
- čo najvyššia hodnota frekvencie rezu ω_r , ktorá určuje rýchlosť prechodného deja
- čo najväčšia fázová bezpečnosť, ktorá zaistí malý prekmit na prechodovej charakteristike. [6]

6.2 Návrh regulátora pre sústavu

6.2.1 Prúdový regulátor

Zvolili sme metódu štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu, pretože je to jednoduchá metóda. Je to jediná vhodná metóda z vyššie uvedených. Pre otáčkový regulátor bude možné použiť aj metódu symetrického optima. Pre vyregulovanie poruchy aj na vstupe sústavy je potrebný regulátor typu PI. Identifikovanú sústavu vynásobíme dopravným oneskorením o veľkosti 0,00005s spôsobeného omeškaním výstupného prúdu voči vstupnému napätiu po jednu dobu vzorkovacej periódy a vzorkovač s tvarovačom nahradíme členom typu dopravného oneskorenia o veľkosti polovice vzorkovacej periódy 0,000025s. Pre takýto systém sa navrhne spojitý regulátor a následne sa prevedie na diskretný ekvivalent.

Časovú konštantu (nulu) regulátora zvolíme takú istú veľkú, ako je časová konštanta (pól) sústavy. Tým zabezpečíme, že celá amplitúdová charakteristika bude mať sklon -20 dB/dekádu.



Obrázok 6.1 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- Kr = 1

Na (Obrázok 6.1) je zobrazená amplitúdovo-fázová frekvenčná charakteristika otvoreného obvodu v logaritmických súradniciach. Prenos regulátora má tvar

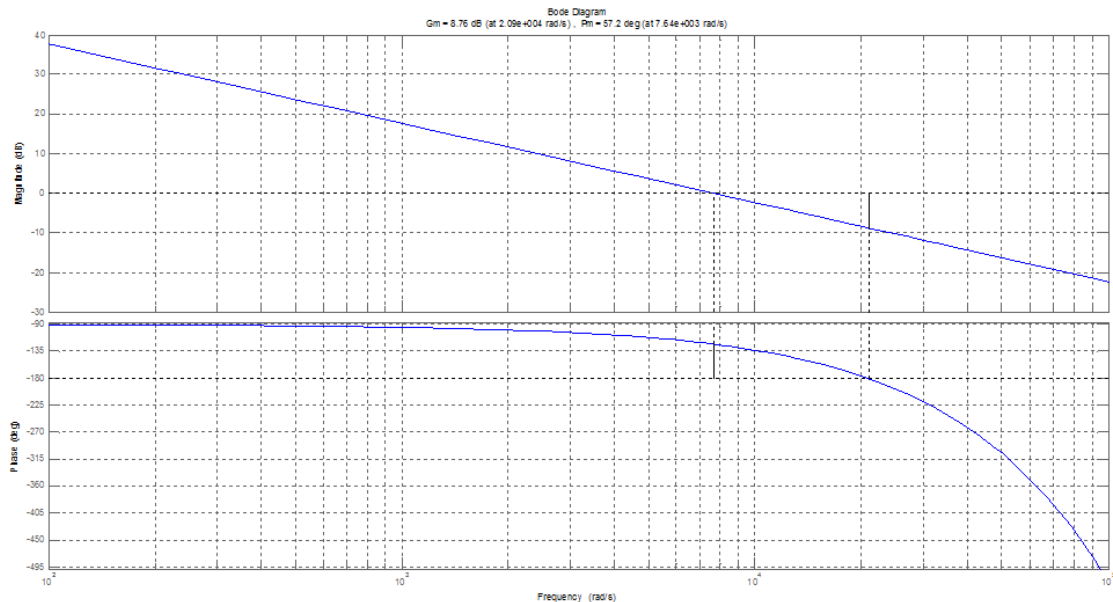
$$F_R(p) = \frac{Kr(p+977)}{p} \quad (6.3)$$

kde $Kr=1$. Keď chceme, aby systém mal fázovú bezpečnosť približne 60 stupňov musíme zosilnenie regulátora zvoliť tak, aby sa amplitúdová charakteristika „posunula vyššie“ o 19,1 dB podľa vzťahu

$$Kr(p) = 10^{\frac{19,1}{20}} \doteq 10 \quad (6.4)$$

Výsledný prenos regulátora je

$$F_R(p) = \frac{10(p+977)}{p} \quad (6.5)$$



Obrázok 6.2 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- Kr = 10

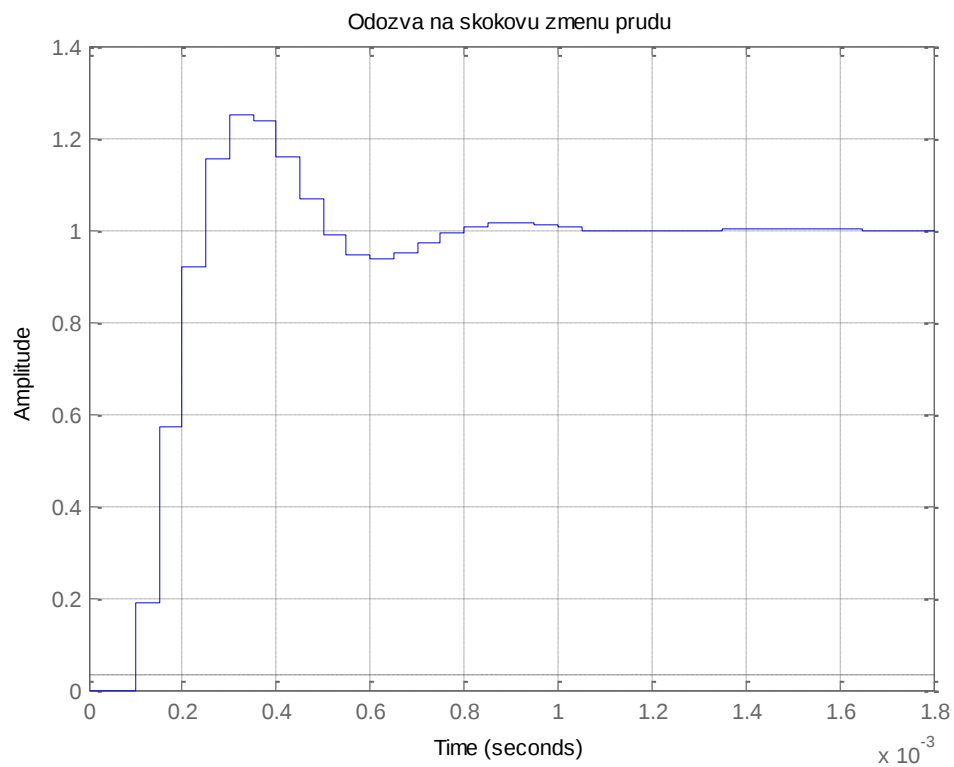
Z Obrázok 6.2 vidíme, že systém s navrhnutým regulátorom má fázovú bezpečnosť $P_m = 57,2^\circ$.

Regulátor prevedieme na jeho diskretný ekvivalent

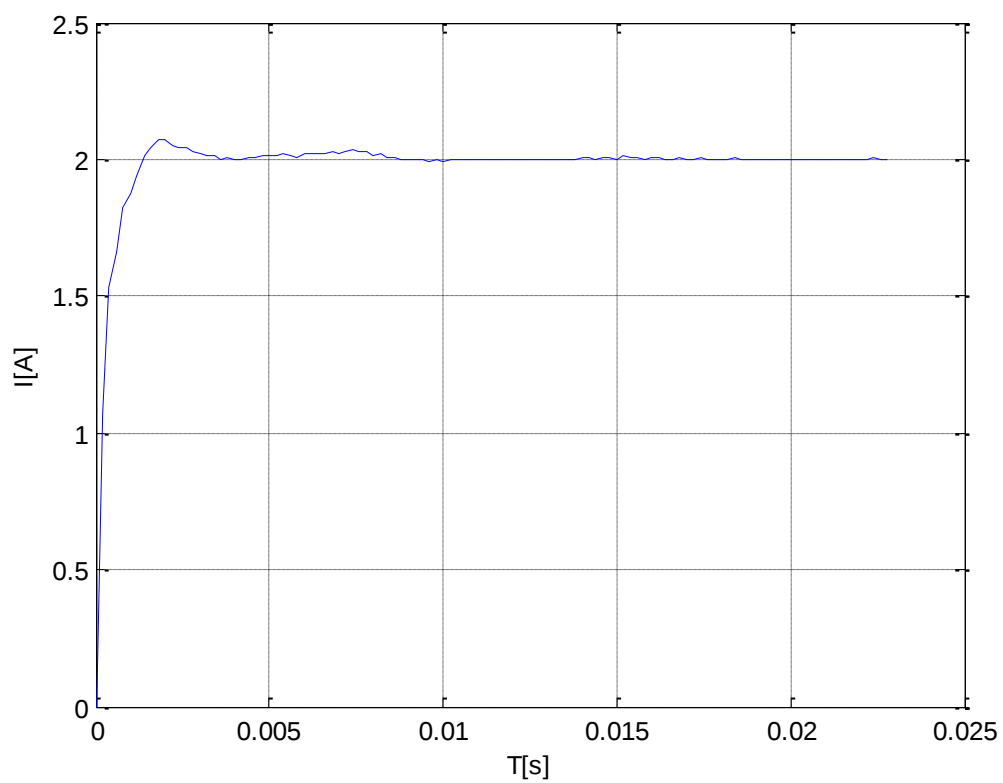
$$D(z) = 10 + 0,5 \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (6.6)$$

Regulátor v takomto tvare môžeme vyskúšať v aplikácii. V dokumentácii od výrobcu pre správne použitie tohto regulátora je potrebné konštanty regulátora vynásobiť číslom 2^8 . Výsledné hodnoty konštant regulátora dosadíme do Kc 2560 a do Ki 256.

Na Obrázok 6.3 môžeme vidieť odozvu pri skokovej zmene riadenia prúdu vytvorenú simuláciou v Matlabe. Navrhnutý regulátor bol veľmi rýchly, tak sme konštanty regulátora 10-krát zmenšili kvôli zašumenému vstupnému napätiu a výstupnému prúdu. Na Obrázok 6.4 je zobrazená charakteristika zmeraná na reálnom prípravku. Žiadaná hodnota prúdu bola 2 A.



Obrázok 6.3 Skoková zmena riadenia prúdu



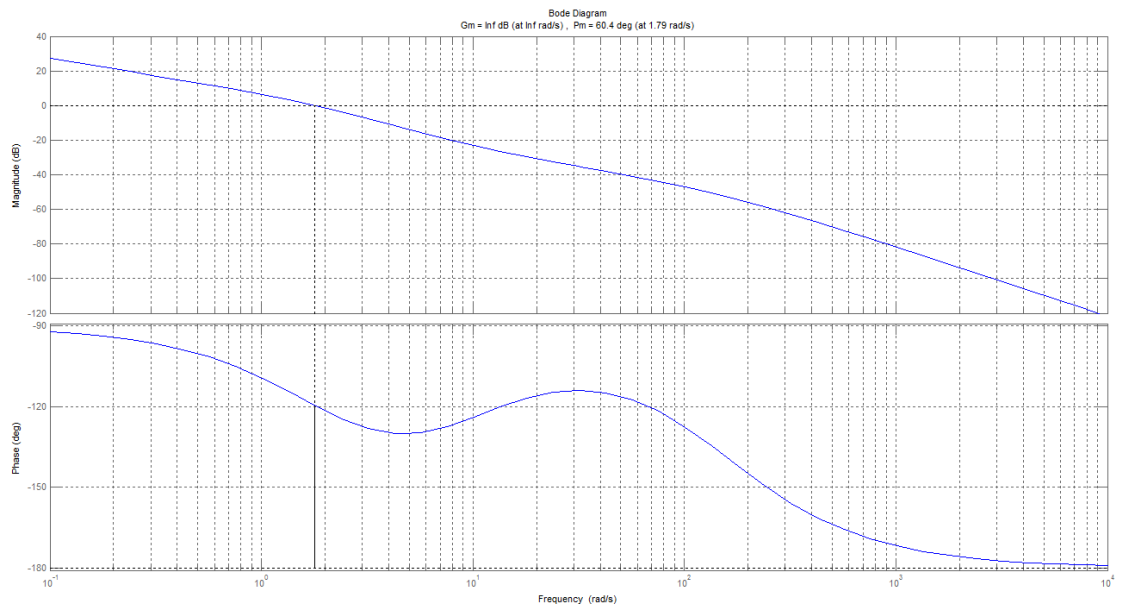
Obrázok 6.4 Overenie prúdového regulátora

6.2.2 Otáčkový regulátor

Regulátor sme navrhli metódou frekvenčných charakteristík v toolboxe SISOTOOL v Matlabe. Systém sme použili

$$F_S(p) = \frac{2,62}{(0,47p+1)(0,0066p+1)} \quad (6.7)$$

Navrhovali sme PI regulátor tak, aby sme dosiahli sklon na amplitúdovej charakteristike -20 dB cez jednu dekádu, čo vychádzalo na časovú konštantu 0,11 sekúnd a fázová bezpečnosť bola približne 60 °.



Obrázok 6.5 Frekvenčná charakteristika

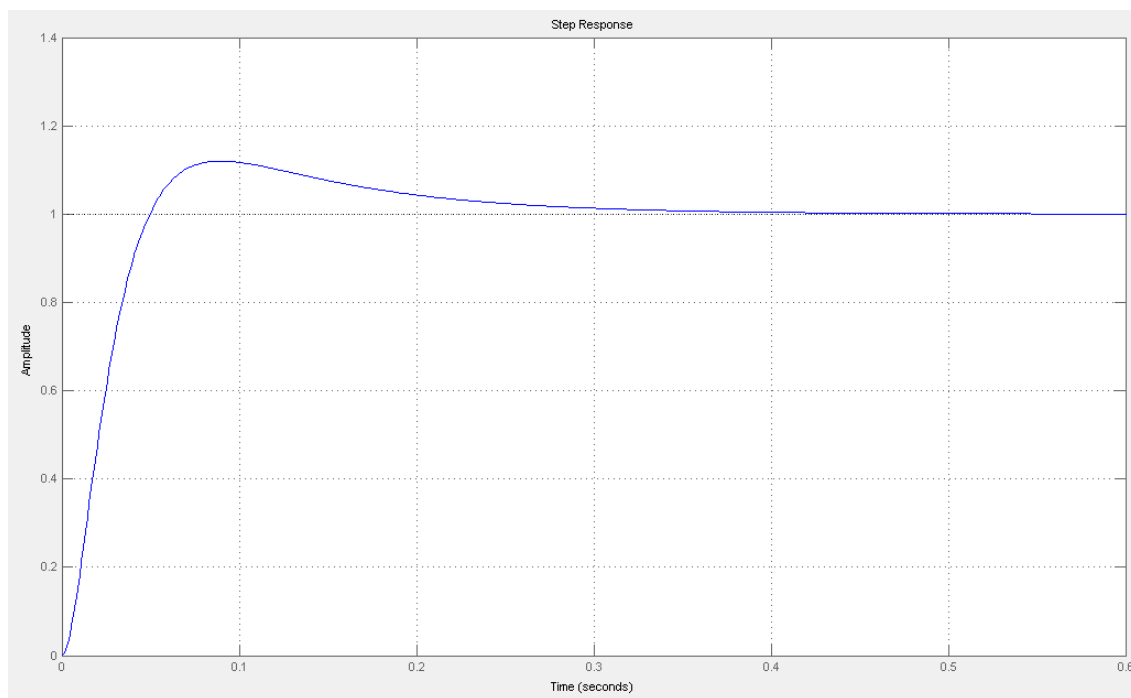
Výsledný prenos regulátora má tvar

$$F_R(p) = \frac{0,88(1+0,11p)}{p} \quad (6.8)$$

Regulátor prevedieme na jeho diskretný ekvivalent.

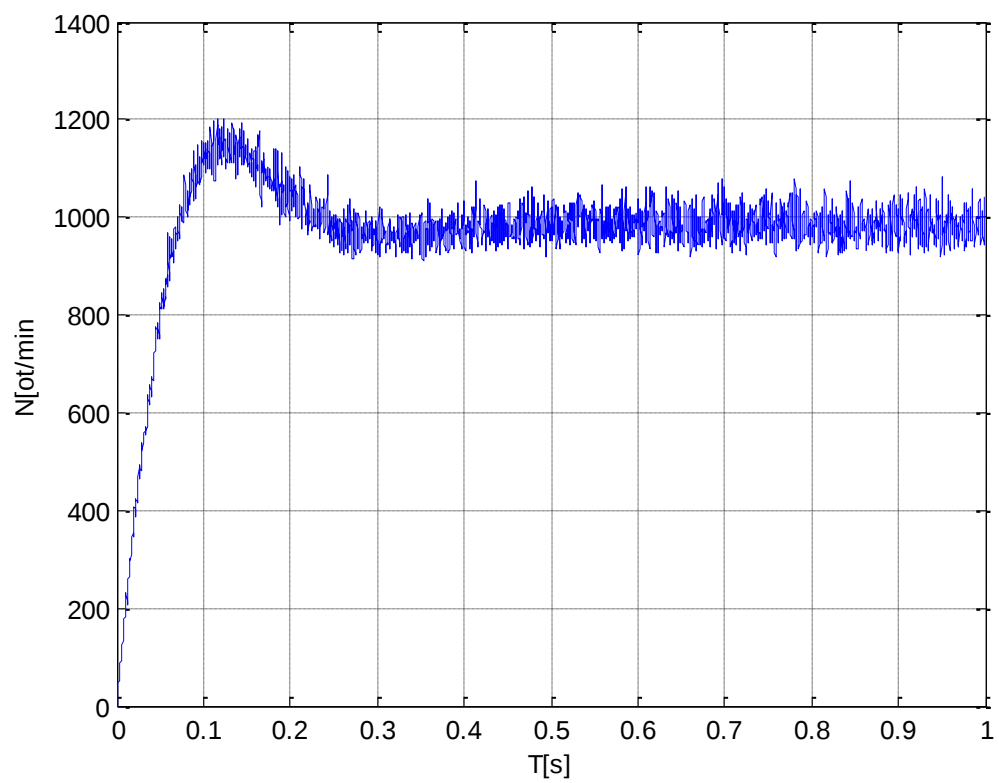
$$D(z) = 0,099 + 0,88 \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (6.9)$$

Odozva na skokovú zmenu riadenia otáčkovej slučky v simulácii je na Obrázok 6.6



Obrázok 6.6 Odozva na skokovú zmenu riadenia

Regulátor bol odskúšaný na prípravku a jeho odozvu na skok riadenia z 0 na 1000 môžeme vidieť na Obrázok 6.7. Konštanty regulátora je potrebné vynásobiť nielen konštantou udanou od výrobcu 2^8 , ale aj konštantou 160, pretože meraný signál otáčok za minútu bol 160-krát zosilnený. Takto upravený navrhnutý regulátor sa dal odskúšať na prípravku.

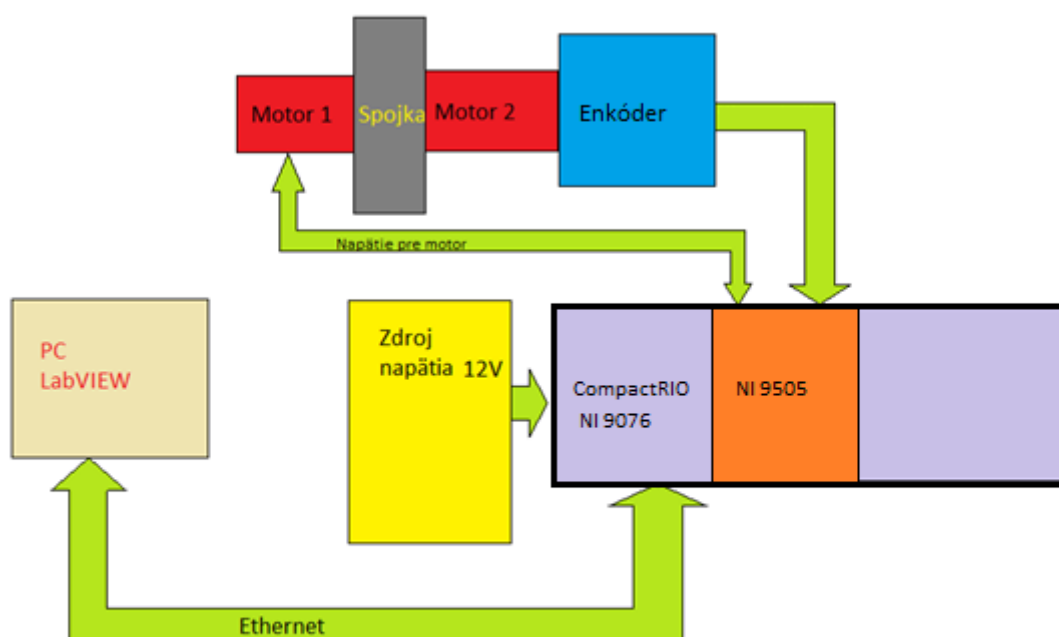


Obrázok 6.7 Odozva na skok riadenia 0-1000 ot/min

7 PRÍPRAVOK

7.1 Bloková schéma

Dvojica jednosmerných motorov je spojená hriadeľom prevodovku. Na tento hriadeľ je pripojený enkóder, z ktorého vedie vodič do modulu NI 9505. Tento vodič je pripojený k 5 pinu na DSUB konektore. Do modulu NI 9505 je privedené napájanie a z neho je privedené napätie na motor. Modul NI 9505 je pripojený do zásuvného modulu cRIO 9076. Modul cRIO 9076 je pripojený pomocou sieťového kábla k počítaču, kde komunikuje s prostredím LabVIEW. Blokovú schému je vidieť na Obrázok 7.1.



Obrázok 7.1 Bloková schéma prípravku

7.2 Aplikácia pre prípravok

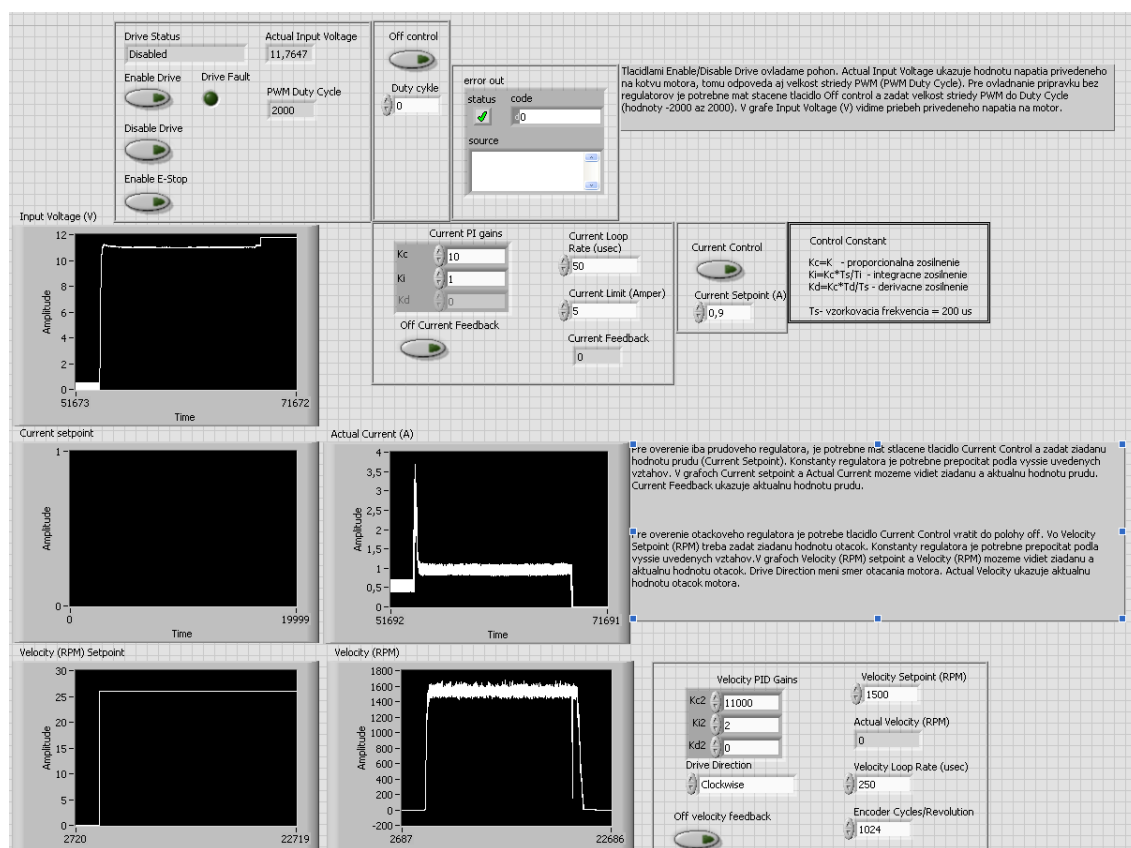
Aplikáciu v RealTime sa skladá z dvoch súborov. Jeden je určený na identifikáciu parametrov systému (IdentRT.vi) a druhý na otestovanie navrhnutých regulátorov (testRT.vi), ktorého čelný panel môžeme vidieť na Obrázok 7.2. Celý prípravok spúšťame (vypíname) tlačidlami Enable Drive (Disable Drive). PWM Duty Cycle nám ukazuje striedu pulzne šírkovej modulácie a Actual Input Voltage strednú hodnotu napätia na motore.

Okno napravo slúži na ovládanie prípravku bez pripojených regulátorov.

V okne s PI prúdovým regulátorom môžeme nastaviť jednotlivé konštanty regulátora, prúdové obmedzenie, vypnúť spätnú väzbu a overiť si správnosť regulátora pomocou žiadanej a aktuálnej hodnoty prúdu.

V okne nižšie vidíme PID otáčkový regulátor. Môžeme si tam nastaviť konštanty regulátora. Navyše si tam môžeme nastaviť smer otáčania. Encoder Cycles/Revolution predstavuje číslo rovné počtu puzlov fázy A z enkóderu za jednu otáčku. Tak ako u prúdového regulátora si môžeme vypnúť spätnú väzbu a overiť si správnosť regulátora pomocou žiadanej a aktuálnej hodnoty otáčok.

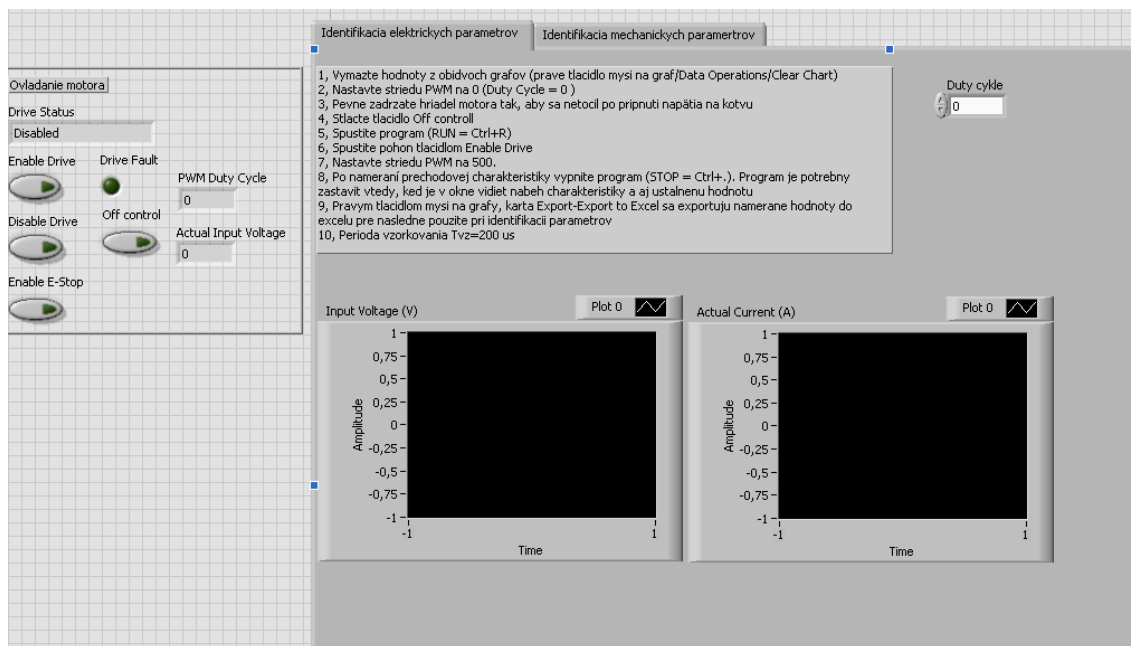
Naľavo sú grafy, kde môžeme sledovať jednotlivé fyzikálne veličiny závislé na čase pri overovaní správnosti návrhu regulátorov. V aplikácii je popísaný postup na overovanie regulátorov.



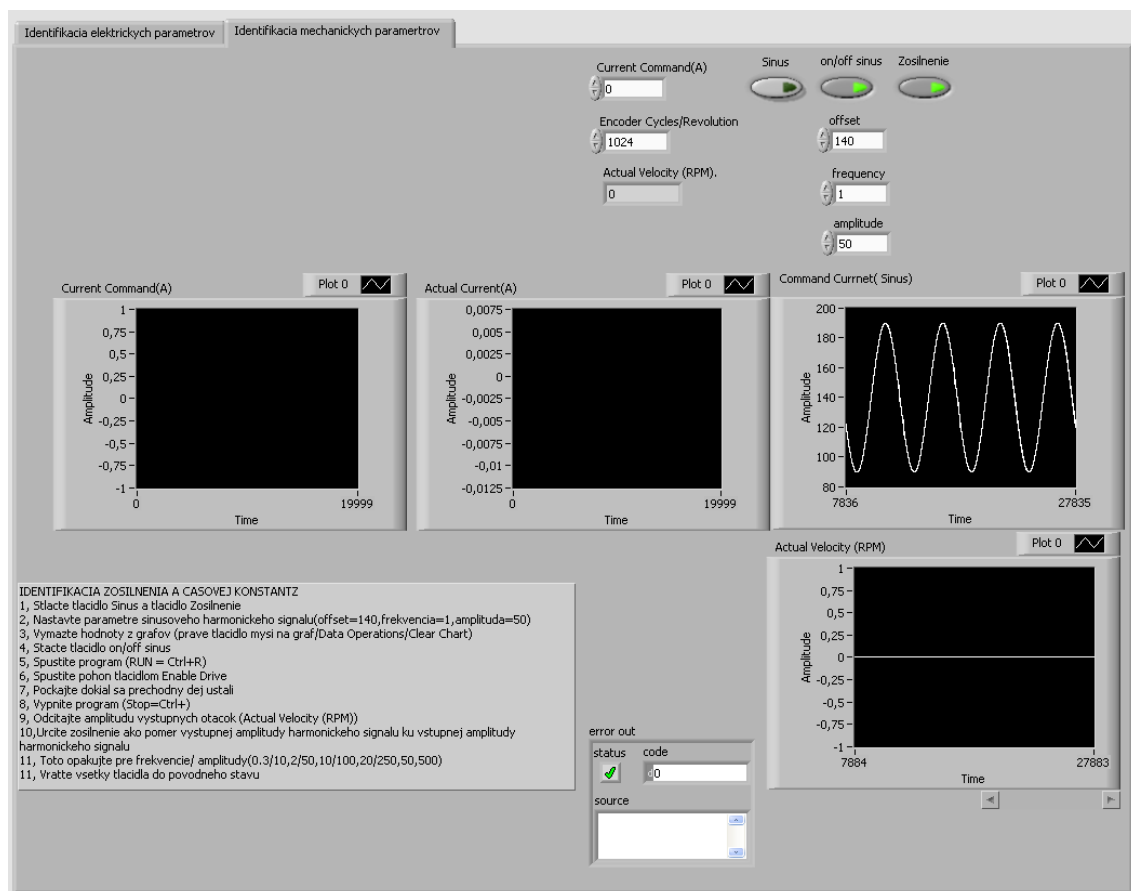
Obrázok 7.2 Aplikácia v LabVIEW

Na Obrázok 7.3 je prvá časť aplikácie používaná na identifikáciu elektrických parametrov systému. Obsahuje blok ovládania motora, nastavenie premenných potrebných k identifikácii, jednotlivé grafy na zobrazenie priebehov a presný postup ako treba postupovať pri identifikácii elektrických parametrov. Druhá časť (Obrázok 7.4) je vytvorená pre identifikáciu mechanických parametrov. Na rozdiel od prvej časti obsahuje generovanie harmonického sínusového signálu, ktorého parametre je možné prestavovať. Ďalej obsahuje všetky potrebné grafy na identifikáciu mechanických

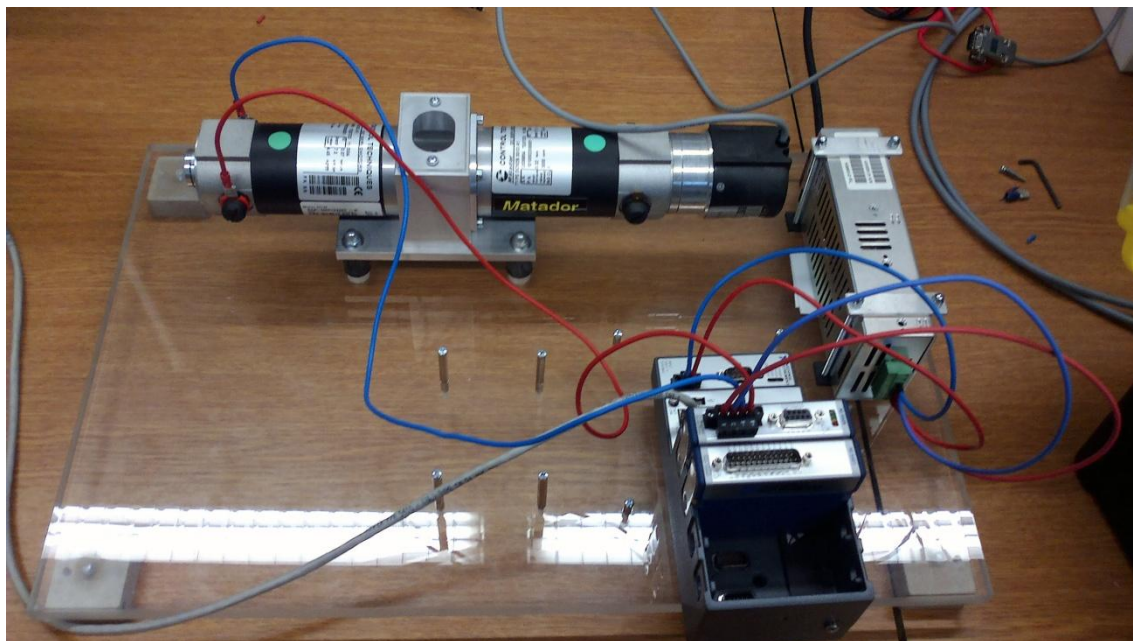
parametrov a kompletný postup. Tieto časti je možné medzi sebou jednoducho prepínať pomocou záložiek.



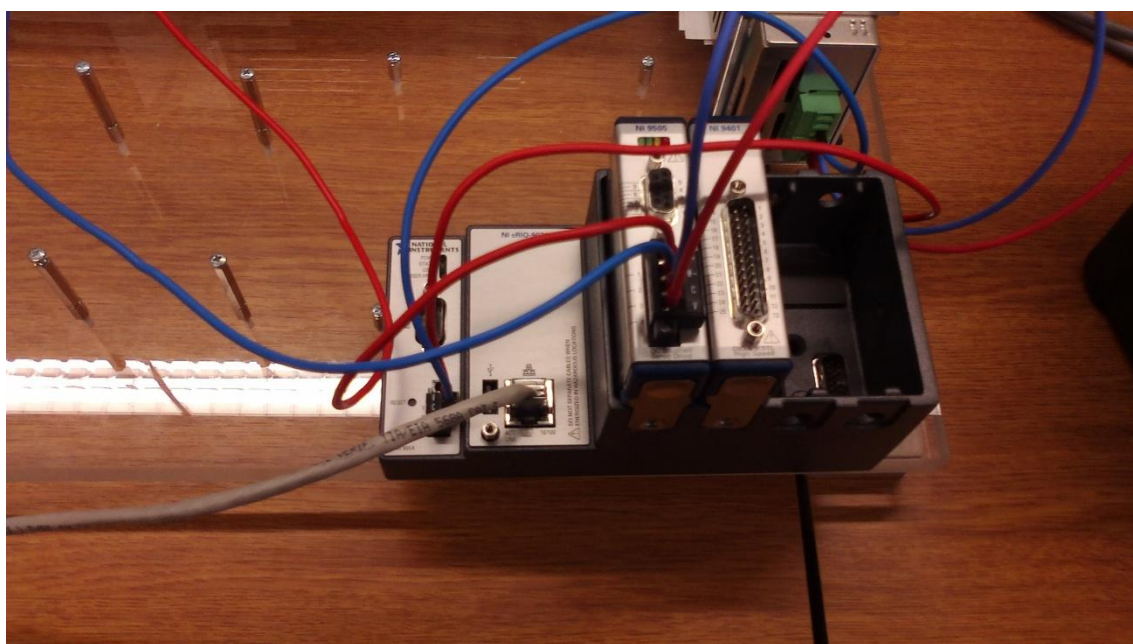
Obrázok 7.3 Aplikácia IdentRT-prvá časť



Obrázok 7.4 Aplikácia IdentRT-druhá časť



Obrázok 7.5 Přípravok



Obrázok 7.6 Compact cRIO

8 ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zoznámiť sa s prípravkom dvojice spojených jednosmerných motorov. Prípravok je prepojený s programovacím prostredím LabVIEW cez modul Compact cRio 9076, v ktorom je použitá karta NI 9505, od National Instruments. Použitá bola len jedna karta NI 9505, tzn. že sme ovládali iba jeden motor z dvojice, pretože karta nedokázala rekuperovať. Ďalším dôvodom, prečo neboli použité obidva motory, bolo nedostatok voľného miesta v prostredí FPGA.

Objasnili sme možnosti identifikácie danej sústavy. Elektrické parametre jednosmerného motora sme identifikovali pomocou nástroja IDENT v programe Matlab, metódou najmenších štvorcov a metódou pomocou prechodovej charakteristiky. Pre tieto identifikácie bolo potrebné zmerať cez LabVIEW prechodovú charakteristiku. Nepodarilo sa to hneď na prvýkrát, pretože bol problém udržať rotor bez otočenia, aby prechodová charakteristika bola zmeraná správne bez prekmitov prúdu. Takto identifikované sústavy sme porovnali medzi sebou. Hodnoty sa líšili minimálne. Mechanické parametre sme identifikovali metódou frekvenčnej analýzy signálu, pomocou ktorej sme zmerali frekvenčnú charakteristiku a na základe zmeranej charakteristiky sme identifikovali systém.

Ďalej sme sa zaoberali možnosťami návrhu regulátorov pre daný prípravok. Pre návrh prúdového regulátora sme si zvolili metódu pomocou frekvenčných charakteristík, pretože táto metóda je rýchla. Otáčkový regulátor sme taktiež navrhli metódou frekvenčných charakteristík. Navrhnuté regulátory sme otestovali na prípravku.

Popísali sme vytvorenú aplikáciu v prostredí LabVIEW na ovládanie prípravku. Aplikácia je vytvorená tak, aby sa dala urobiť na nej laboratórna úloha na identifikáciu parametrov sústavy a overenie správnosti návrhu regulátora.

Laboratórna úloha na identifikáciu systému a návrh regulátorov môže tak prispieť ku skvalitneniu výučby. Vzorové riešenie úlohy je uvedené v prílohe.

9 LITERATÚRA

- [1] SKALICKÝ, J.: Elektrické regulované pohony. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2007.
- [2] OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS Compact cRIO - 9075/9076. National Instruments [online]. Október 2011 [cit. 2012-12-1]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375650b.pdf>
- [3] OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9505. National Instruments [online]. Január 2010 [cit. 2012-12-1]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374211f.pdf>
- [4] ŽÍDEK, J.: Grafické programování ve vývojovém prostředí Labview, VŠB-TU Ostrava, október 2002.
- [5] DUŠEK, M.: *Identifikace parametrů synchronních motorů s permanentními magnety*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [6] BLAHA, P., VAVŘÍN, P.: Řízení a regulace. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2009.
- [7] JURA, P.: Signály a systémy 3. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, druhé opravené vydání, 2010.

10 ZOZNAM PRÍLOH

A Laboratórna úloha

B CD

A. Laboratórna úloha

Zadanie:

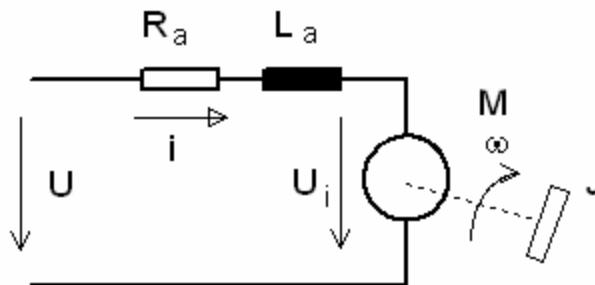
- Identifikujte elektrickú časť jednosmerného motora pomocou nástroja IDENT v programe Matlab a pomocou prechodovej charakteristiky. Identifikujte mechanické parametre jednosmerného motora.
- Navrhните pre identifikovanú sústavu prúdový a otáčkový PI regulátor metódou štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu tak, aby mal systém fázovú bezpečnosť 60° . Správnosť návrhu overte na aplikácii testRT.vi.

Teoretický úvod:

Jednosmerný motor je jeden z najstarších elektrických točivých strojov. Jednosmerný motor patrí medzi ideálne regulačné systémy – zmenou napätia privedeného na kotvu jednosmerného motora sa dajú plynule riadiť otáčky motora, prípadne reverzácia. Tieto motory sa používajú tam, kde je potrebný veľký rozsah regulácie rýchlosti alebo, kde sa vyskytujú sťažené podmienky pri rozbehu motora. Jednosmerné motory patria medzi nenahraditeľné súčasti obrábacích strojov, priemyselných robotov, a sú využité aj v automobilovom priemysle.

Jednosmerné motory sa delia nielen podľa konštrukcie ale aj podľa prepojenia obvodu kotvy s budením. [1]

Na Obrázok 10.1 vidíme náhradnú schému jednosmerného motora, z ktorej môžeme odvodiť sústavu diferenciálnych rovníc popisujúcich dynamický systém. Prevedením týchto rovníc pomocou Laplaceovej transformácie získame operátorový prenos systému, čiže jednosmerného motora.



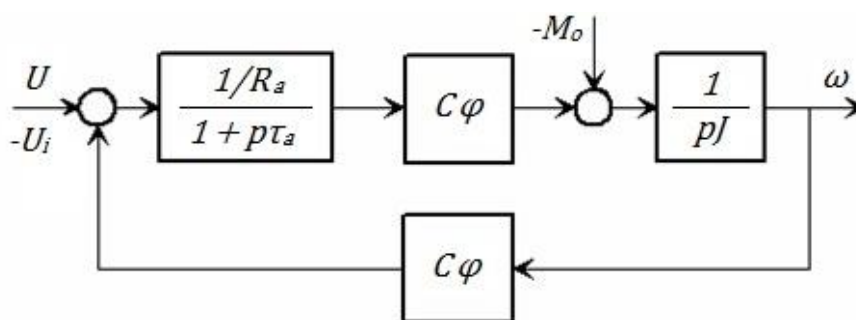
Obrázok 10.1 Náhradná schéma jednosmerného motora[1]

$$u_a = R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C\phi\omega \quad [\text{V}]$$

$$C\phi i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_0 \quad [\text{Nm}]$$

J je celkový moment zotrvačnosti na hriadeli motora, B koeficient viskózneho trenia a M_0 moment mechanického odporu. Prvá rovnica predstavuje rovnováhu napätí v obvode kotvy, druhá rovnica je rovnováha momentov na hriadeli motora.

Po prevedení rovníc pomocou La Placeovej transformácie dostaneme výsledný model jednosmerného motora



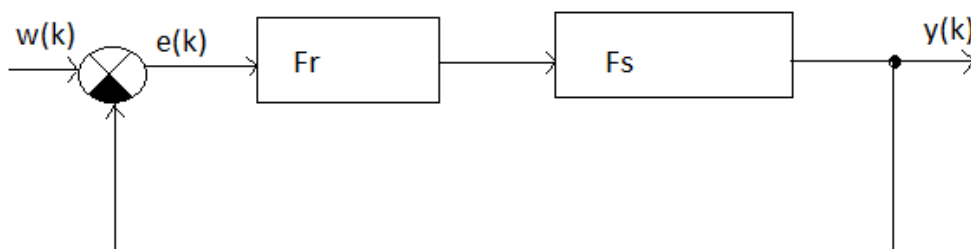
Obrázok 10.2 Matematický model jednosmerného motora[1]

Elektrickú časť jednosmerného motora tvorí zotrvačný článok prvého rádu. Prenos tejto časti je

$$F_s(p) = \frac{K_s}{(Tp+1)}$$

K tejto sústave navrhne PI regulátor s prenosom

$$F_r(p) = \frac{Kr(Trp+1)}{p}$$



Obrázok 10.3 Bloková schéma

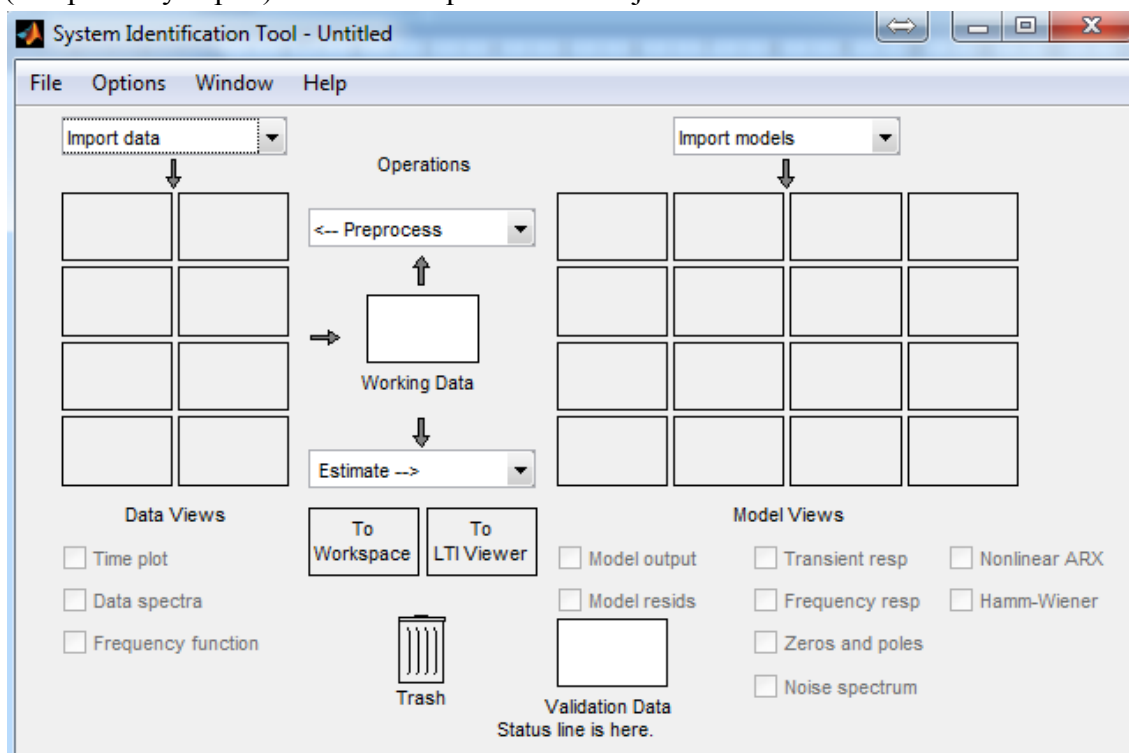
Mechanické parametre jednosmerného motora identifikujte metódou frekvenčnej analýzy harmonického signálu, ktorá hovorí, že ak na vstup sústavy privedieme harmonický signál, na výstupe po uplynutí prechodného deja nameriame harmonický signál s odlišnou amplitúdou a fázovým posunom od vstupného signálu. Pomerom týchto amplitúd zistíme amplitúdu na frekvenčnej charakteristike a fázovým posunom zistíme fázu na frekvenčnej charakteristike. Premeraním viacerých signálov o rôznej frekvencii získame body na frekvenčnej charakteristike. Podľa tejto charakteristiky je možné identifikovať systém.

Postup:

a)

Otvoríme si aplikáciu v LabVIEW IdentRT.vi. Prepne sa na záložku Identifikácia elektrických parametrov. Ďalej postupujeme podľa jednotlivých bodov v aplikácii.

Zmerané dáta z Excelu preniesieme do Workspace programu Matlab ako dve matice (vstupnú a výstupnú). V Matlabe spustíme nástroj IDENT.



Obrázok 10.4 Nástroj IDENT

V ponuke IMPORT DATA si zvolíme TIME DOMAIN DATA. Otvorí sa nové okno, kde zadáme názov matice vstupných hodnôt a názov matice výstupných hodnôt.

Periódou vzorkovania dáme takú, akú máme nastavenú v LabVIEW (0,00002). Importujeme dáta.

V ponuke ESTIMATE si vyberieme PROCESS MODELS, nastavíme si model zotrvačného článku bez dopravného oneskorenia a dáme ESTIMATE.

Takto navrhnutý model si môžeme porovnať z nameranými dátami cez funkciu MODEL OUTPUT.

Model prenesieme do WORKSPACE a prevedieme ho na spojitý funkciou d2c.

Zmerané dáta použijeme aj pre metódu pomocou prechodovej charakteristiky. Z nej určíme zosilnenie ako pomer skokovej zmeny výstupného prúdu ku skokovej zmene vstupného napätia.

Prepneme sa do záložky pre identifikáciu mechanických parametrov a postupujeme podľa bodov popísaných v aplikácii.

Namerané dáta exportované do programu Excel si uložíme do pracovnej zložky Matlabu. Použijeme funkciu *computePhases*, ktorej vstupné parametre sú (dáta vstupného signálu vo forme mena.xlsx programu Excel, tak isto dáta výstupného signálu, periódu signálov, amplitúdu, počet periód na výpočet, offset). Táto funkcia nám vypočíta amplitúdu a fazu signálu na zadanej frekvencii. Pracuje na základe rozvoja do Diskrétnej Fourierovej rady. Premeriame všetky signály podľa postupu v aplikácii. Tieto body použijeme v toolboxe IDENT, kde si importujeme dáta amplitúdovo-fázovo frekvenčnej charakteristiky. V ESTIMATE vyberieme PROCESS MODEL a nastavíme si sústavu s dvoma časovými konštantami. Identifikovaný systém použijeme pre návrh otáčkového regulátora.

b)

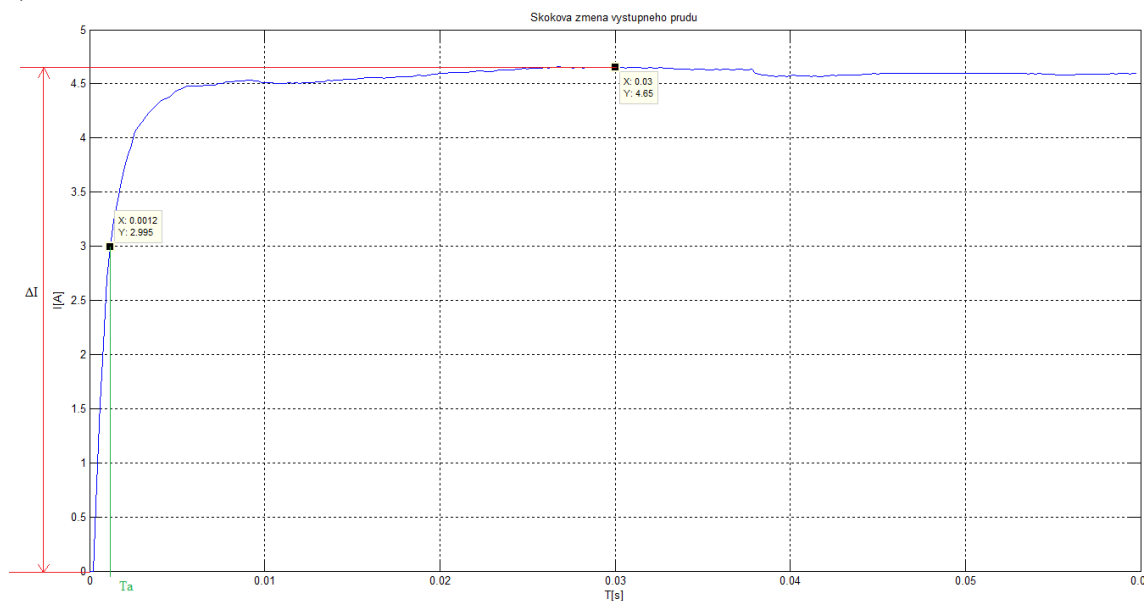
Časovú konštantu prúdového regulátora nastavíme takú istú, ako je časová konštantu identifikovanej sústavy pri elektrických parametroch, čím vytvoríme sklon amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky -20 dB/dekáda a zosilnenie regulátora $K=1$. Pre otáčkový regulátor využijeme nástroj SISOTOOL v matlabe a nastavíme takú časovú konštantu, aby sklon -20dB/dekáda bol dlhý aspoň jednu dekádu. Vytvoríme si prúdovú otvorenú slučku $F0=Fs*Fr$ a otáčkovú otvorenú slučku.

Tieto prenosy vynásobíme dopravným oneskorením $e^{-0,000075}$ (pre prúdovú slučku) a dopravným oneskorením $e^{-0,00025}$ (pre otáčkovú slučku). To vykonáme funkciou *set(F0, 'outputdelay', 0,000075)*.

Vykreslíme si amplitúdovo frekvenčnú charakteristiku otvoreného obvodu $F0$ funkciou *margin(F0)*. Upravíme zosilnenie regulátorov tak, aby fázová bezpečnosť systému bola približne 60° . Zobrazíme odozvy na skok riadenia funkciou *step*. Takto navrhnuté regulátory prevedť na ich diskretný ekvivalent. Správnosť regulátorov overte v aplikácii testRT.vi podľa uvedeného postupu.

Vypracovanie:

a)



Obrázok 10.5 Výstupné hodnoty prúdu

Identifikovali sme model zotrvačného článku. Po prevedení na spojitý systém prenos systému má tvar

$$F_S(p) = \frac{0,78}{(0,0011p+1)}$$

Druhou metódou určíme z prechodovej charakteristiky zosilnenie ako pomer

$$K = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{4,65}{5,88} = 0,782$$

Časová konštanta odčítaná z grafu má veľkosť 1,2 ms.

Na identifikáciu mechanických parametrov bola použitá metóda pomocou harmonického signálu. Zmerali sme frekvenčnú charakteristiku.

Zadané hodnoty			Namerané hodnoty	
Amplitúda	Frekvencia [Hz]	Ofset	Amplitúda	Fáza [°]
10	0,3	140	34,88	-50
50	1	140	12,85	-75
50	2	140	6,77	-85
100	10	140	1,34	-104
250	20	140	0,68	-144
300	50	140	0,28	-180

Po identifikovaní systému pomocou programu IDENT prenos sústavy vyšiel

$$F_S(p) = \frac{2,62}{(0,47p+1)(0,0066p+1)}$$

b)

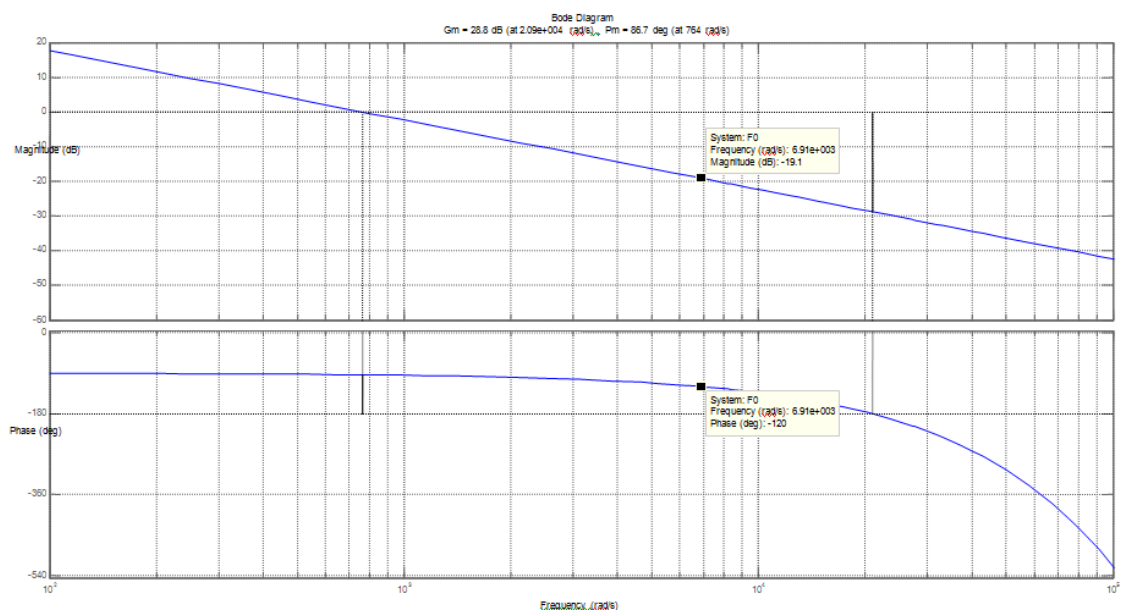
Sústavu sme upravili tým, že sme pridali dopravné oneskorenie 0,000075s. Upravená sústava má prenos

$$F_S(p) = \frac{0,78}{0,0011p+1} * e^{-0,000075p}$$

Otvorený obvod má prenos

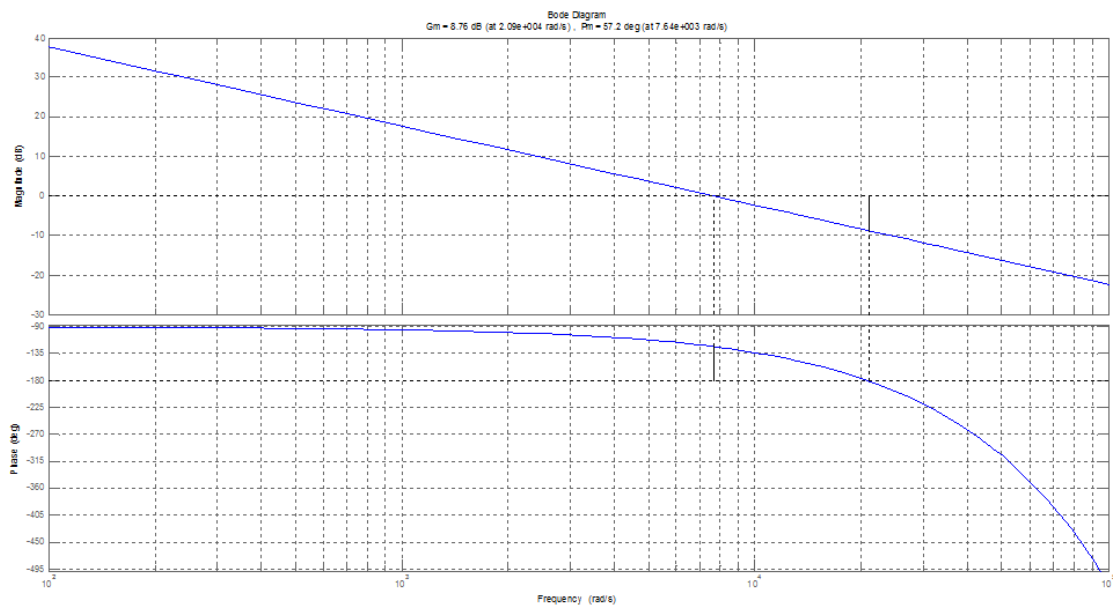
$$F_0(p) = F_R * F_S = \frac{Kr*0,78*(0,0011p+1)}{p(0,0011p+1)} * e^{-0,000075p}$$

Pre zosilnenie $K_r = 1$ je zobrazená frekvenčná charakteristika



Obrázok 10.6 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 1$

Na Obrázok 10.6 vidíme, že keď chceme dosiahnuť fázovú bezpečnosť približne 60° , musíme amplitúdovú charakteristiku „posunúť vyššie“ o 19,1 dB. To dosiahneme zosilnením regulátora približne rovným 10.



Obrázok 10.7 Amplitúdovo fázová frekvenčná charakteristika- $K_r = 10$

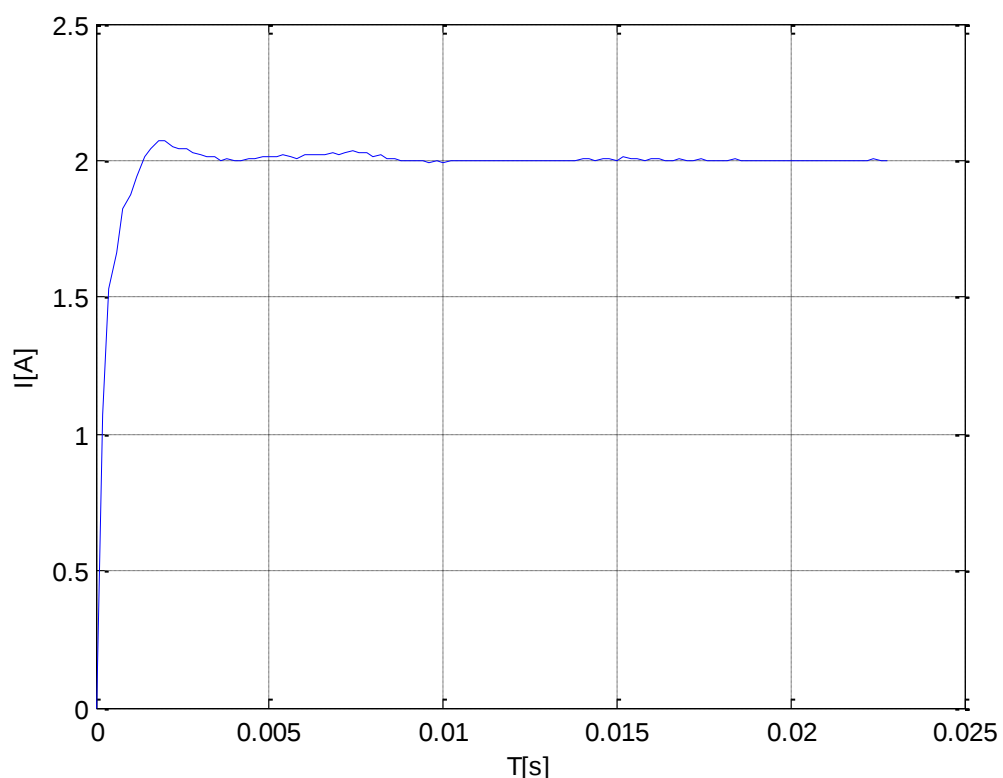
Výsledný prenos regulátora

$$F_R(p) = \frac{10(0,0011p+1)}{p}$$

Regulátor prevedieme na jeho diskretný ekvivalent. Perióda vzorkovania je 0,00005s. Diskretný regulátor má potom prenos

$$D(z) = 10 + 0,5 \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

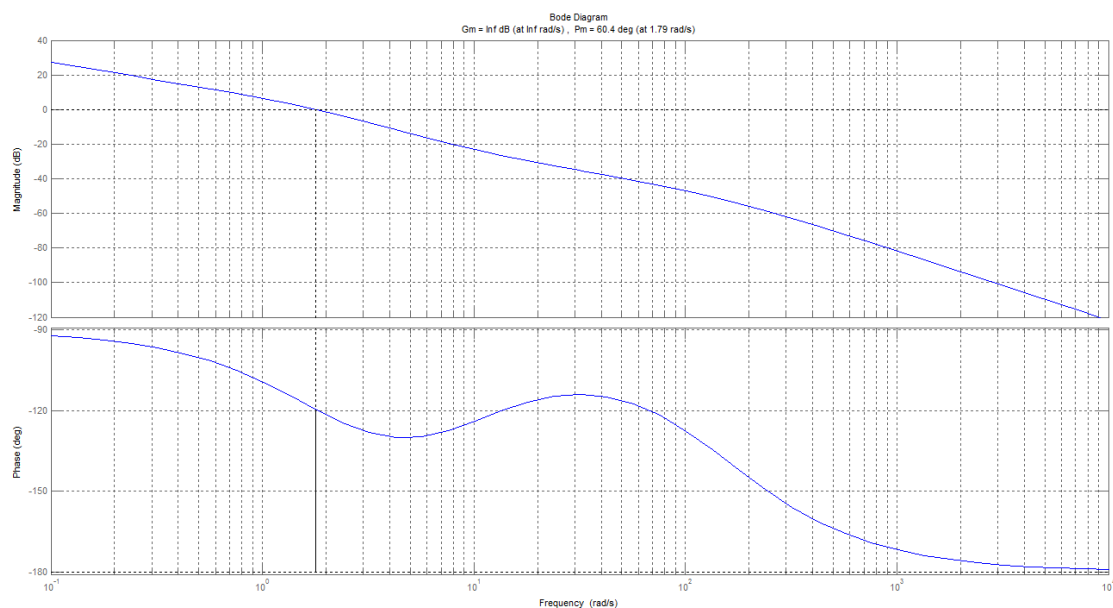
Navrhnutý prúdový regulátor sme odskúšali v aplikácii. Konštanty regulátora bolo potrebné vynásobiť konštantou 2^8 uvedenou v dokumentácii od výrobcu. Do zložky K napíšeme hodnotu zosilnenia $d_0 = 2560$ a do zložky Ki hodnotu $d_2 = 256$. Takto navrhnutý regulátor je veľmi rýchly, výstupný prúd a vstupné napätie boli veľmi zašumené, preto sme zvolili zložky regulátora 10-krát menšie. Odskúšanie sa prípravku môžeme vidieť na



Obrázok 10.8 Overenie prúdového regulátora

Z toolboxu SISOTOOL sme navrhli regulátor s časovou konštantou 0,11s. Zosilnenie regulátora sme nastavili na 0,88, čo nám zabezpečilo fázovú bezpečnosť približne 60° .

Frekvenčnú charakteristiku otvorenej slučky môžeme vidieť na Obrázok 10.9.



Obrázok 10.9 Frekvenčná charakteristika

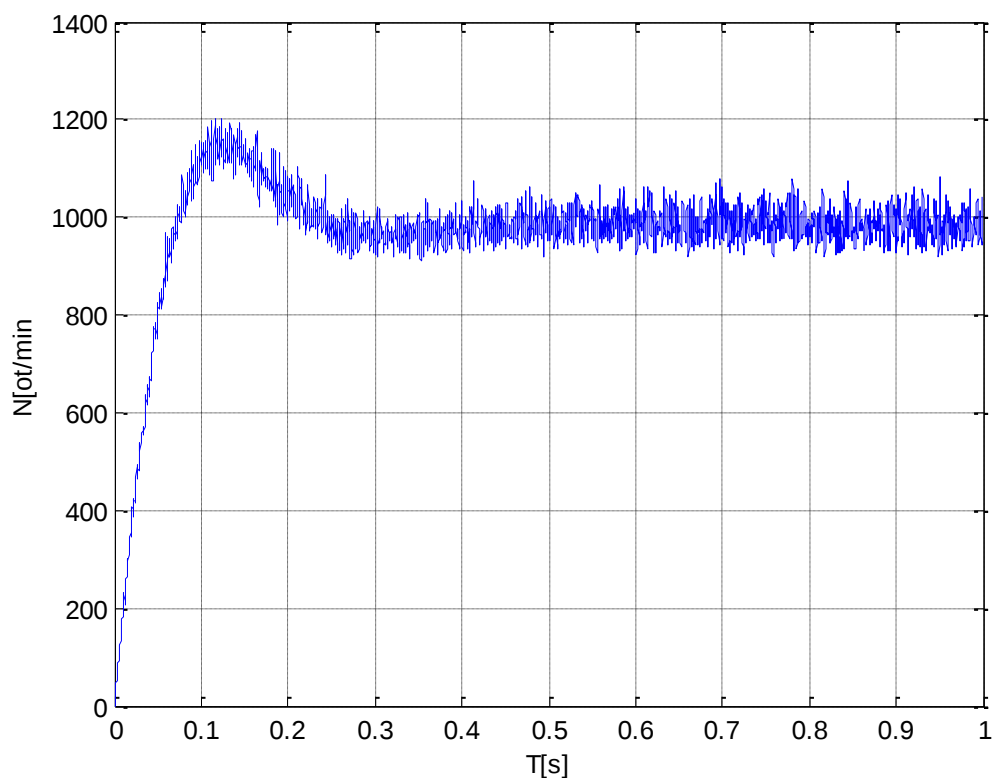
Výsledný prenos regulátora

$$F_R(p) = \frac{0,88(0,11p+1)}{p}$$

Regulátor prevedieme na jeho diskretný ekvivalent. Konštanty regulátora vynásobíme nielen konštantou 2^8 udanou v dokumentácii regulátora, ale aj konštantou 160, pretože meraný signál otáčok za minútu bol 160-krát väčší. Výsledný tvar regulátora je

$$D(z) = 4032 + 9 \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

Navrhnutý otáčkový regulátor sme odskúšali v aplikácii. Do zložky K napíšeme hodnotu zosilnenia $d_0 = 4032$ a do zložky Ki hodnotu $d_2 = 9$. Odozvu na skok riadenia môžeme vidieť na Obrázok 10.10.



Obrázok 10.10 Overenie otáčkového regulátora

Záver:

Cieľom tohto merania bolo identifikovať parametre jednosmerného motora a navrhnuť prúdový a otáčkový PI regulátor. Navrhnuté regulátory metódou frekvenčných charakteristík po odskúšaní pracovali správne. Pri meraní prechodovej charakteristiky sa vyskytol problém. Až na niekoľký pokus sa podarilo zmerať peknú prechodovú charakteristiku bez prekmitov. Rotor pri skokovej zmene vstupného napätia bolo potrebné znehybniť a nesprávnym držaním došlo k prekmitom prúdu.