

UPRAVLJANJE BRZINOM VRTNJE SINKRONOG MOTORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

CONTROLLING THE SPEED OF THE SYNCHRONOUS MOTOR ROTATION WITH PERMANENT MAGNET

Marko Boršić, Toni Bjažić

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

U radu je dan matematički model sinkronog motora s permanentnim magnetima, koji je ekvivalentan modelu klasičnog istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom. Prikazan je elektromotorni pogon te je dan pregled njegovih glavnih komponenti. Softverski paket primjeren za Sinamics S120 elektromotorni pogon je Starter V4.3. U pogledu optimizacije isključen je PT2 *setpoint* filter struje, koji se pojavljuje u početnom modelu, te su shodno tome proračunati novi parametri regulatora struje (momenta) i brzine vrtnje. Postavljen je prefilter brzine vrtnje te je podešen iznos vremenske konstante povratne veze brzine vrtnje. Primjenom optimiranih parametara postiže se brži odziv brzine vrtnje uz manje nadvišenje, dok je struja i dalje u granicama dozvoljenih vrijednosti. Isto tako, kompenzacija poremećaja (momenta tereta) bi trebala biti bolja po iznosu i vremenski brža.

Ključne riječi: *sinkroni motor s permanentnim magnetima, SMPM, vektorsko upravljanje, širinsko-impulsna modulacija, Starter, Sinamics S120, regulator struje, regulator brzine vrtnje*

Abstract

A mathematical model of permanent magnet synchronous motor is described in this thesis. The described model is equivalent to a model of classical separately excited DC motor with constant excitation. An electric drive is described. Software package suitable for Sinamics electric motor is Starter V4.3. Regarding optimization PT2 *setpoint* filter is disabled, which appears in starting model, and according to that new parameters were calculated for current (torque) and rotational speed controllers. A *setpoint* filter of rotational speed was set and time constant of rotational speed feedback was adjusted. With usage of optimized parameters a quicker response of rotational speed with smaller overshoot

is achieved, while current is still within allowed limits and compensation of disturbances is better.

Keywords: *permanent magnet synchronous motor, PMSM, vector control, pulse with modulation, Starter, Sinamics S120, current controller, speed controller*

1. Uvod

1. Introduction

Sinkroni motori s permanentnim magnetima jedni su od najboljih motora zbog svojih malih dimenzija, visoke korisnosti, velikog faktora snage i velike gustoće snage po jedinici volumena. Korištenjem napredne matematičke analize u radu strojeva moguće je prikazati model SMPM-a u rotirajućem koordinatnom sustavu u kojem su sve fizikalne varijable neovisne o položaju rotora. Model SMPM-a u takvom, *dq* sustavu, ekvivalentan je modelu istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom. U ovom članku dan je model sinkronog motora s permanentnim magnetima te je uspoređen s modelom istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom. Opisan je elektromotorni pogon zasnovan na Siemensovom Sinamics S120 modularnom sustavu za aplikacije visokih performansi, te je dan pregled glavnih komponenti s njihovim karakteristikama. Isto tako, prikazani su bitni parametri pogona dobiveni na temelju proračuna, kataloških podataka te dijagnostičkih rezultata. Projektiran je regulator struje (momenta) korištenjem Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika i tehničkog optimuma. Regulator brzine vrtnje projektiran je korištenjem Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika i simetričnog optimuma. Prikazani su rezultati optimizacije.

2. Vektorsko upravljanje sinkronim motorom s permanentnim magnetima

2. Vector control of permanent magnet synchronous motor

U ovom poglavlju dan je model sinkronog motora s permanentnim magnetima (SMPM-a) pogodan za vektorsko upravljanje. Napravljena je ekvivalencija s modelom istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom.

2.1. Model sinkronog motora s permanentnim magnetima u dq koordinatnom sustavu

2.1. Model of synchronous motor in dq coordinate system

Prema [2] i [3] model sinkronog motora s permanentnim magnetima pogodan za primjenu vektorskog upravljanja, dobiva se prebacivanjem veličina motora (faznih struja, napona te induciranog napona) iz trofaznog a,b,c koordinatnog sustava u d,q koordinatni sustav.

Vektorskim upravljanjem SMPM-om postiže se linearna dinamika istosmjernog motora. Kako bi se SMPM mogao promatrati kao istosmjerni motor potreban je model motora u d,q koordinatnom sustavu (dalje se koristi kratica KS). Taj se model dobije tako da se model u a,b,c KS-u Clarkeovom transformacijom prebaci u α,β KS, a onda iz α,β KS - a u d,q KS.

Konačni model SMPM-a u d,q sustavu je sljedeći:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \tag{2-1}$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_M \tag{2-2}$$

$$M_e = \frac{3}{2} n_{pp} (\psi_M + (L_d - L_q) i_d) i_q \tag{2-3}$$

2.2. Ekvivalencija sinkronog motora s permanentnim magnetima i istosmjernog motora

2.2. Equivalency of permanent magnet synchronous motor and classical DC motor

Iz dobivenih izraza (2-1), (2-2) i (2-3) može se vidjeti da, ako se struja i_d regulacijom održava na nuli, SMPM ima istu dinamiku kao i istosmjerni stroj. Upravljanje elektromagnetskim momentom odvija se upravljanjem strujom i_q jer uz $i_d=0$ vrijedi:

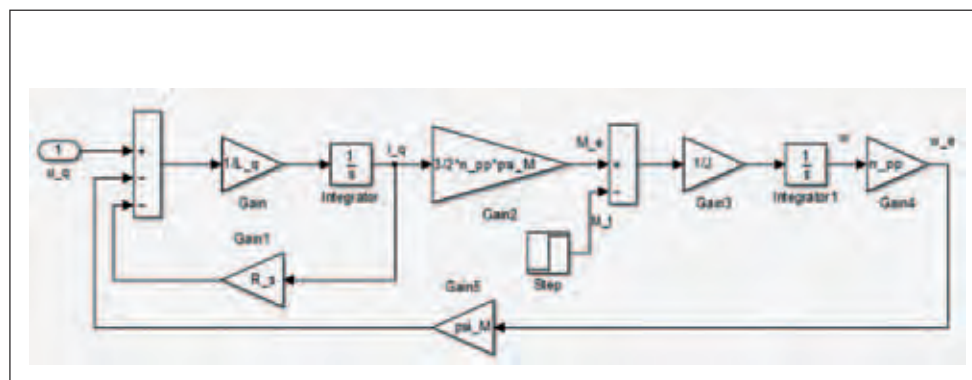
$$u_d = -\omega_e L_q i_q \tag{2-4}$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e \psi_M \tag{2-5}$$

$$M_e = \frac{3}{2} n_{pp} \psi_M i_q = K_m i_q \tag{2-6}$$

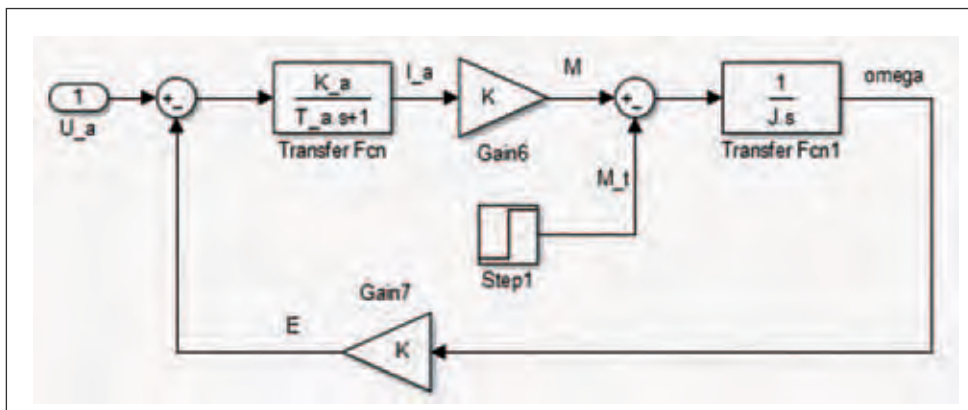
Na slici 2.1. prikazan je model SMPM-a temeljen na izrazima (2-4), (2-5) i (2-6) .

Na slici 2.2. dan je model istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom. Iz modela motora vidljivo je da sinkroni motor s permanentnim magnetima ima potpuno istu dinamiku kao i istosmjerni. SMPM ima različite koeficijente za računanje momenta i inducirane protuelektromotorne sile, a omjer tih koeficijenata iznosi $K_m/K_e=3/2$. Regulacija d komponente struje ekvivalentna je upravljanju magnetskim tokom istosmjernog stroja.



Slika 2.1. Model sinkronog motora s permanentnim magnetima

Figure 2.1. Model of permanent magnet synchronous motor



Slika 2.2. Model istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzбудom

Figure 2.2. Model of separately excited DC motor with constant excitation

U praksi je primjenjivo i upravljanje magnetskim tokom radi postizanja brzine vrtnje veće od nazivne.

3. Opis elektromotornog pogona

3. Electric drive description

Fizički izgled elektromotornog pogona zasnovanog na Sinamics S120 sustavu prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Elektromotorni pogon

Figure 3.1. Electric drive

Osnovne komponente elektromotornog pogona su upravljačka jedinica, pretvarač te sinkroni motor s permanentnim magnetima. Radi se o pretvaraču PM340 s maksimalnom izlaznom trofaznom strujom od 2,3 A, što mu daje snagu od 370 W [4], [5]. Upravljačka jedinica je CU320 s 12 digitalnih ulaza, 8 ulaza/izlaza te 3 sučelja

za mjerenje. Komunikacija se ostvaruje Profinet komunikacijskim protokolom. Sinkroni motor s permanentnim magnetima 1FK7 za Sinamics S120 ima nazivnu snagu od 310 W, nazivnu brzinu vrtnje 3000 okr/min te nazivni moment od 1 Nm uz stupanj korisnog djelovanja od 85%.



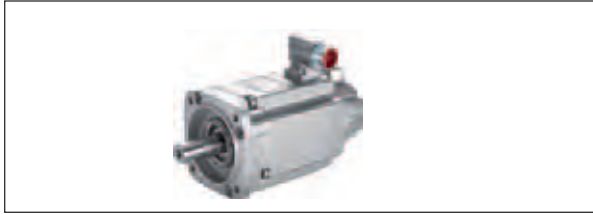
Slika 3.2. Upravljačka jedinica CU320-2 PN [8]

Figure 3.2. Control unit CU320-2 PN [8]



Slika 3.3. Pretvarač PM340 [9]

Figure 3.3. Power unit PM340 [9]



Slika 3.4 Sinkroni motor s permanentnim magnetima IFK7 [10]

Figure 3.4. Permanent magnet synchronous motor IFK7 [10]

4. Programski paket Starter

4. Program package Starter

Programski paket (korisničko programsko sučelje) *Starter* koristi se za parametriranje, testiranje, optimizaciju, dijagnostiku i puštanje u rad pretvarača *Siemens, Micromaster* i *Sinamics* [6].

Prije svega, elektromotorni pogon je potrebno parametrirati, pri čemu je potrebno dobro poznavati karakteristike komponenti elektromotornog pogona te ih pravilno unijeti u programski paket *Starter*. Nakon što je pogon ispravno parametriran potrebno je pristupiti aktiviranju identifikacijske rutine, te po potrebi dodatno podesiti sustav. Korištenjem programskog paketa elektromotorni pogon je moguće pustiti u rad, testirati, optimizirati...

5. Testiranje i simuliranje elektromotornog pogona

5. Testing and simulation of electric drive

U ovom poglavlju dan je prikaz bitnih parametara pogona te pripadajuća shema simuliranja. Prikazani su rezultati eksperimentalnog testiranja te simuliranja u *Simulinku*.

5.1. Parametri elektromotornog pogona

5.1. Parameters of electric drive

Na temelju kataloga pogona i parametara prikazanih u *Starteru* dana je tablica 5.1 s prikazom značajnijih parametara pogona [7].

Tablica 5.1. Parametri pogona temeljeni na katalogskim podacima i parametrima dobivenim u *Starteru*

Table 5.1. Parameters of electric drive based on catalogue data and *Starter* data

Parametar	Iznos	Opis
P_n	310 W	nazivna snaga motora
n_n	3000 rpm	nazivni broj okretaja
M_n	1 Nm	nazivni moment motora
I_{an}	1,6 A	nazivna struja motora
n_{pp}	3	broj pari polova motora
J_m	$6,5 * 10^{-5}$ Kgm ²	moment inercije motora
η	85 %	korisnost motora
R_s	5,53135 Ω	otpor namota motora
R_{ch}	0,135 Ω	otpor pretvarača
L_d	19,56624 mH	induktivitet motora u d, q KS-u
L_q	16,89075 mH	induktivitet motora u d, q KS-u
f_{sw}	16 kHz	frekvencija sklapanja (podesiva na niže do preporučenih 4 kHz)
$U_{d,ref}$	0 V	referentni napon u d, q KS-u
$U_{q,ref}$	145 V	referentni napon u d, q KS-u
E_n	135 V	nazivna protuelektromotorna sila
U_{an}	153 V	nazivni napon
K_m	$0,67 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$	koeficijent za računanje momenta
w_0	$2000 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	prirodna frekvencija PT2 setpoint filtra
ξ	0,7	koeficijent prigušenja PT2 setpoint filtra
K_{Ri}	40,64	koeficijent pojačanja regulatora struje
T_{ti}	2 ms	vremenska konstanta regulatora struje
K_{Rw}	0,017	koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje
T_{tw}	13,55 ms	vremenska konstanta regulatora brzine vrtnje

Tablicom 5.2. dani su parametri elektromotornog pogona temeljeni na proračunu i procijeni.

Tablica 5.2. Parametri pogona temeljeni na procijeni i proračunu

Table 5.1. Parameters of electric drive based on estimates and calculation

Parametar	Iznos	Opis
J	$1,45 * 10^{-4}$ Kgm ²	moment inercije motora i remenice
M_0	0,0815 Nm	moment Coulombovog trenja
B_t	$6,484 * 10^{-5}$ $\frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$	koeficijent viskozno trenja
K_a	0,1765	koeficijent pojačanja armature
T_a	0,003	vremenska konstanta armature
K_{ch}	3,08	koeficijent pojačanja pretvarača
T_{ch}	31,25 μ s	vremenska konstanta pretvarača
K_i	1	koeficijent pojačanja strujnog senzora
T_i	46,576 μ s	vremenska konstanta strujnog senzora
K_w	1	koeficijent pojačanja mjernog člana brzine vrtnje
T_w	1 ms	vremenska konstanta mjernog člana brzine vrtnje
K_e	0,4297 $\frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$	koeficijent za računanje protuelektromotorne sile

Ukupni moment inercije dobiva se pribrajanjem momenta inercije remenice momentu inercije motora. Moment inercije remenice procijenjen je s obzirom na dimenzije remenice i materijal.

U nastavku je dan proračun momenta Coulombovog trenja i koeficijenta viskozno trenja, izveden na način da 80% gubitaka, nastalih zbog trenja i ventilacije, daje Coulombovo trenje, a preostalih 20% odnosi se na viskozno trenje [11].

$$P_g = P_n * (1 - \eta) = 46,5 \text{ W}$$

$$P_0 = P_g - I_{an}^2 * R_{au} = 32 \text{ W}$$

Gdje je:

$$R_{au} = R_{ch} + R_s = 5,67 \Omega$$

$$M_{u0} = \frac{P_0}{\omega_n} = 0,102 \text{ Nm}$$

Gdje je:

$$\omega_n = \frac{n_n * \pi}{30} = 314,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$M_0 = 0,8 * M_{u0} = 0,0815 \text{ Nm}$$

$$B_t = \frac{0,2 * M_{u0}}{\omega_n} = 6,484 * 10^{-5} \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$$

Koeficijent pojačanja armature proračunat je kao:

$$K_a = \frac{1}{R_{au}}$$

dok je vremenska konstanta armature definirana kao:

$$T_a = \frac{L_q}{R_{au}}$$

Parametri pretvarača određeni su prema sljedećim relacijama:

$$K_{ch} = \frac{U_r}{100}$$

$$T_{ch} = \frac{2}{f_{sw}}$$

Pri čemu je U_r određen kao ostvareni napon nakon ispravljanja (napon DC linka) i iznosi 308 V. Referenca pretvarača zadaje se u intervalu od 0 do 100.

Parametri strujnog senzora, kao i mjernog člana brzine vrtnje temelje se na procijeni i pripadajućim približnim relacijama:

$$T_i = \frac{T_a}{64}$$

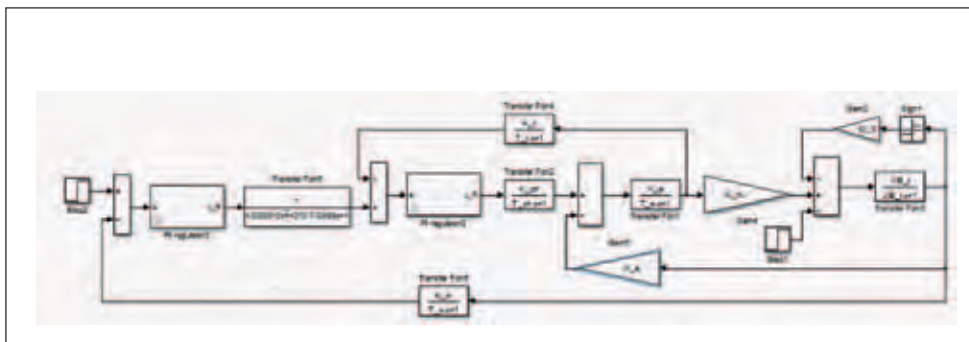
Iznos nazivne protuelektromotorne sile iznosi 135 V. Temeljem ovog parametra moguće je proračunati koeficijent za računanje inducirane protuelektromotorne sile K_e .

$$K_e = \frac{E_n}{\omega_n} = 0,4297 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$$

Gdje je:

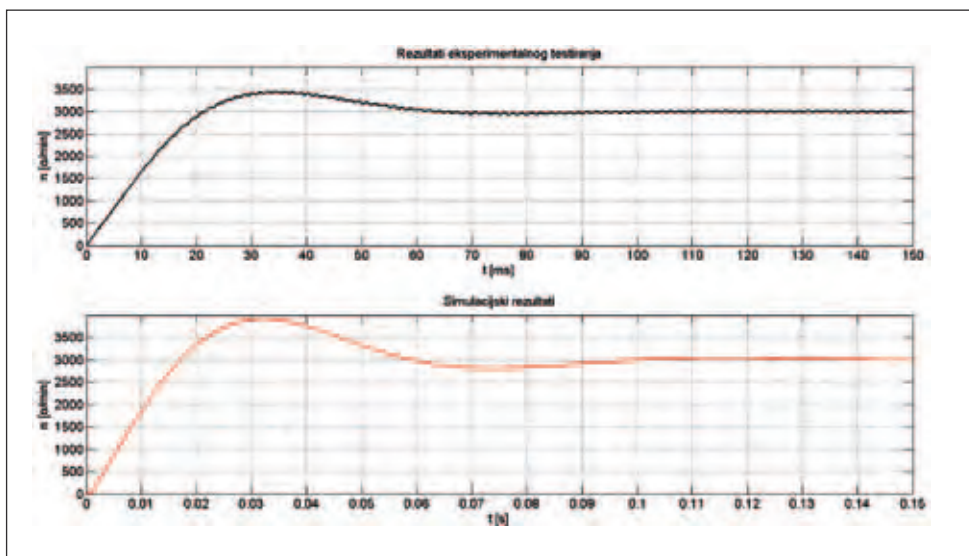
$$\omega_n = \frac{n_n * \pi}{30} = 314,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Parametri dani u tablici 5.1 i 5.2 potrebni su za simuliranje elektromotornog pogona u *Matlab-Simulinku* te radu na optimizaciji sustava, što je obrađeno u narednim poglavljima ovog rada.



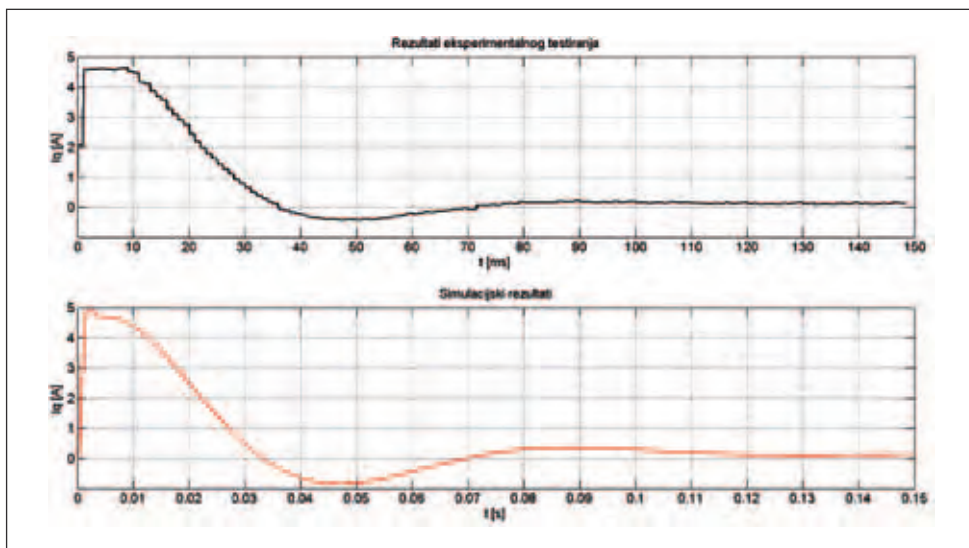
Slika 5.1. Shema elektromotornog pogona

Figure 5.1. Electric drive schematics



Slika 5.2. Brzina vrtnje

Figure 5.2. Rotation speed



Slika 5.3. Struja i_q

Figure 5.3. Current i_q

5.2. Rezultati testiranja i simuliranja

5.2. Test and simulation results

Schema elektromotornog pogona potrebna za simuliranje u *Simulinku* prikazana je na slici 5.1.

PI regulatori brzine vrtnje i struje izvedeni su s „anti-windup“ algoritmom.

Rezultati eksperimentalnog testiranja i simuliranja u *Simulinku*, za ubrzanje motora od 0 do nazivne vrijednosti, prikazani su za brzinu vrtnje na slici 5.2, a za struju i_q na slici 5.3.

Vidljivo je približno poklapanje rezultata simuliranja s rezultatima eksperimentalnog testiranja što znači da su parametri simulacijskog modela dobro određeni. Odstupanja nastaju zbog aproksimacija, šumova i nekih pojednostavljenja.

U tablici 5.3 dan je iznos ostvarenog nadvišenja i vremena maksimuma za ubrzanje motora od 0 do $3000 \frac{\text{okr}}{\text{min}}$.

Tablica 5.3. Rezultati testiranja

Table 5.3. Test results

$K_{R\omega}$	T_{ω} [ms]	σ_m [%]	t_{mn} [ms]
0,017	13,55	15,5	35

6. Optimizacija elektromotornog pogona

6. Electric drive optimization

Osnovni segment optimizacije ovog pogona vidljiv je u isključivanju PT2 setpoint filtra s prirodnom frekvencijom $2000 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ i koeficijentom prigušenja 0,7 koji dodatno usporava odziv sustava, uvođenju prefiltra brzine vrtnje, te podešavanju iznosa vremenske konstante povratne veze brzine vrtnje. Setpoint filtar q -komponente

struje se u praksi postavlja zbog smanjenja udara momenta motora pri promjeni referentne brzine ili momenta tereta, što se može postići i na druge načine (rampa u grani referentne vrijednosti brzine, filtar q -komponente struje). Za ispitivanje punih performansi pogona, taj filtar potrebno je isključiti.

S obzirom na ovu promjenu potrebno je proračunati nove parametre regulatora struje (momenta) i brzine vrtnje.

6.1. Projektiranje regulatora struje

6.1. Current controller design

U ovom poglavlju opisano je projektiranje regulatora struje (momenta) korištenjem Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika i tehničkog optimuma [1], [11].

Prijenosna funkcija otvorenog sustava s regulatorom $G_{oRt}(s)$ ima oblik:

$$G_{oRt}(s) = \frac{K_{oRt}(1+T_{Ii}s)}{s(1+T_{chs})(1+T_a s)(1+T_i s)} \quad (6-1)$$

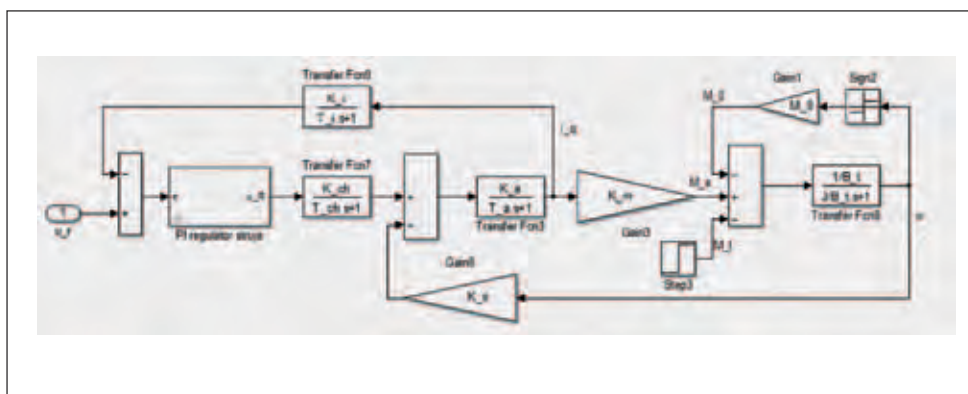
Gdje je:

$$T_a = \frac{L_q}{R_s} = 0,003 \text{ s} \quad (6-2)$$

$$K_{oRt} = \frac{K_{Ri} * K_{ch} * K_i * K_a}{T_{Ii}} \quad (6-3)$$

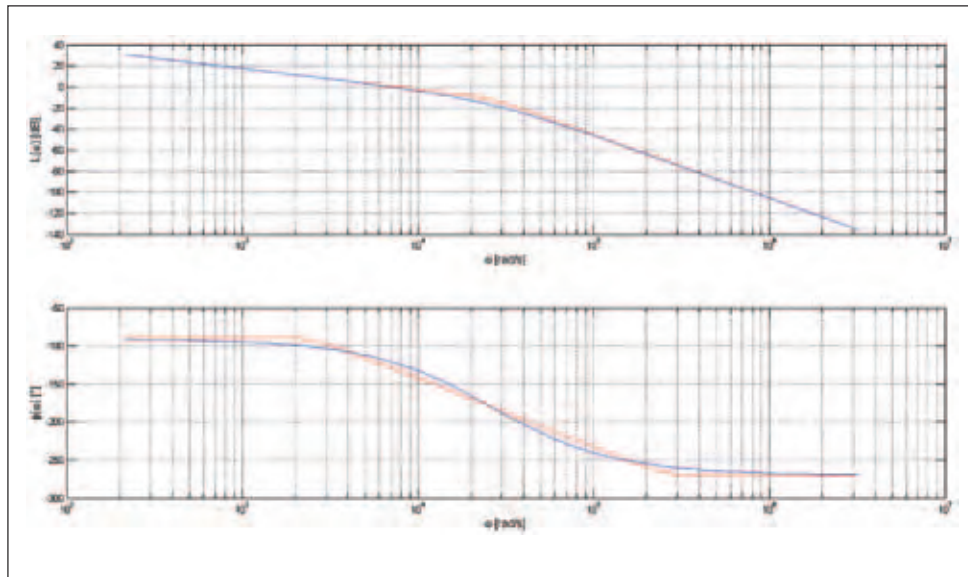
$$K_a = \frac{1}{R_{au}} = 0,1765 \quad (6-4)$$

U slučaju kompenzacije najveće vremenske konstante $T_{Ii} = T_a$, odnosno tehničkog optimuma (TO), prijenosna funkcija otvorenog sustava s regulatorom $G_{oRt}(s)$ poprima oblik:



Slika 6.1. Blokovska shema SMPM-a s PI regulatorom struje

Figure 6.1. Block schematics of SMPM drive with PI current controller



Slika 6.2.
Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika otvorenog sustava s regulatorom

Figure 6.2. Bode plots of open loop system with current controller

Frekvencijski dijagrami $G_{oRt}(s)$ prijenosne funkcije prikazani su slikom 6.2.

$$G_{oRt}(s) = \frac{K_{oRt}}{s(1+T_{ch}s)(1+T_i s)} \quad (6-5)$$

S obzirom da se radi o procesu trećeg reda a željeno nadvišenje je 10%, potrebno fazno osiguranje iznosi:

$$\gamma_t = 58 - 10 = 48^\circ \quad (6-6)$$

Na temelju fazno-frekvencijske karakteristike i izračunatog faznog osiguranja određuje se frekvencija presjeka:

$$\begin{aligned} \omega_c &= 0,1 * \omega_{ch} * 10^{\frac{-90+132-45*\log\frac{0,1*\omega_{ch}}{0,1*\omega_i}}{90}} = \\ &= 7676,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (6-7)$$

Gdje je:

$$\omega_{ch} = \frac{1}{T_{ch}} = 32000 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-8)$$

$$\omega_i = \frac{1}{T_i} = 21470 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-9)$$

S poznatom frekvencijom presjeka crta se amplitudno-frekvencijska karakteristika te se određuje koeficijent pojačanja otvorenog sustava s regulatorom K_{oRt} u području niskih frekvencija ω_{nf} s nagibom karakteristike $L_{oRt}(\omega)$ od -1 (-20 dB/dek) iz kojeg se određuje koeficijent pojačanja regulatora.

$$L_{oRt}(1) = 20 * \log(\omega_c) = 77,7 \text{ dB} \quad (6-10)$$

$$K_{oRt} = 10^{\frac{L_{oRt}(1)}{20}} = 7676,4 \quad (6-11)$$

$$K_{Rit} = \frac{K_{oRt} * T_{lit}}{K_{ch} * K_i * K_a} = 42,0976 \quad (6-12)$$

Konačni parametri PI regulatora struje (momenta) su:

$$T_{lit} = 3 \text{ ms} \quad (6-13)$$

$$K_{Rit} = 42,1 \quad (6-14)$$

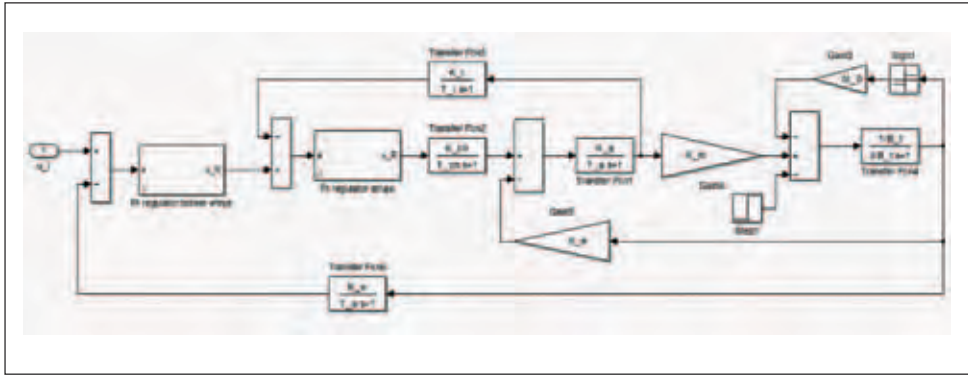
6.2. Projektiranje regulatora brzine vrtnje

6.2. Rotation speed controller design

U ovom poglavlju opisano je projektiranje regulatora brzine vrtnje korištenjem Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika i simetričnog optimuma [1].

Kada se parametrima regulatora postigne logaritamska amplitudno-frekvencijska karakteristika $L_{oRws}(s)$ simetrična u odnosu na frekvenciju presjeka ω_{cs} , prijenosna funkcija otvorenog sustava s regulatorom (6-15) poprima oblik:

$$G_{oRws}(s) = \frac{K_{oRws} * (1+T_{I\omega}s)}{s(1+T_{zi}s)(1+T_t s)(1+T_\omega s)} \quad (6-15)$$



Slika 6.3. Model SMPM-a s PI regulatorima struje i brzine vrtnje

Figure 6.3. Model of SMPM drive with PI current and rotation speed controllers

Gdje je:

$$K_{oR\omega s} = \frac{K_{R\omega s} K_{zi} K_m K_t K_\omega}{T_{l\omega s}} \quad (6-16)$$

$$K_{zi} = \frac{1}{K_i} = 1 \quad (6-17)$$

$$T_{zi} = \frac{1}{K_{oRi}} = 1,3027 * 10^{-4} \quad (6-18)$$

$$K_t = \frac{1}{B_t} = 1,5424 * 10^4 \quad (6-19)$$

$$T_t = \frac{J}{B_t} = 2,2365 \quad (6-20)$$

S obzirom da se radi o procesu 3. reda, a željeno nadvišenje iznosi 25%, koeficijent a iznosi:

$$a = \frac{67-25}{14} = 3 \quad (6-21)$$

Na temelju koeficijenta a određuje se iznos frekvencije presjeka koja definira integralnu vremensku konstantu.

$$\omega_{sc} = \frac{\omega_\omega}{a} = 333,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-22)$$

Gdje je:

$$\omega_\omega = \frac{1}{T_\omega} = 1000 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-23)$$

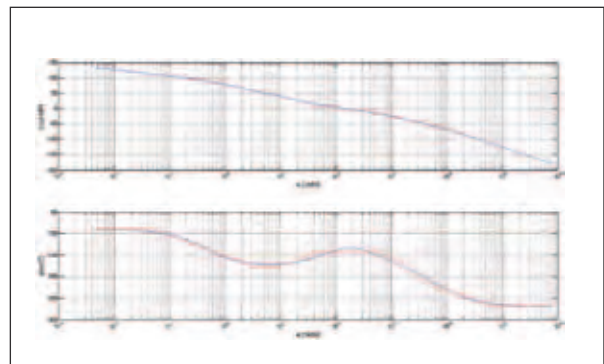
Integralna vremenska konstanta iznosi:

$$\omega_{l\omega s} = \frac{\omega_{cs}}{a} = 111,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-24)$$

$$T_{l\omega s} = \frac{1}{\omega_{l\omega s}} = 0,009 \text{ s} \quad (6-25)$$

Crta se Bodeov prikaz (aproksimacija pravicima) amplitudno-frekvencijske karakteristike

otvorenog sustava s regulatorom (slika 6.4) $L_{oR\omega s}(\omega)$ tako da prolazi kroz frekvenciju presjeka ω_{cs} .



Slika 6.4. Amplitudno-frekvencijska i fazno-frekvencijska karakteristika otvorenog sustava s regulatorom

Figure 6.4. Bode plots of the open loop system with rotation speed controller

Određuje se koeficijent pojačanja otvorenog sustava s regulatorom $K_{oR\omega s}$ u području niskih frekvencija ω_{nf} s nagibom karakteristike $L_{oR\omega s}(\omega)$ od -1 (-20 dB/dek).

$$L_{oR\omega s}(1) = 20 * \log \frac{\omega_{cs}}{\omega_{l\omega s}} + 40 * \log \frac{\omega_{l\omega s}}{\omega_t} -$$

$$20 * \log \frac{1}{\omega_t} = 98,3641 \text{ dB} \quad (6-26)$$

Gdje je:

$$\omega_t = \frac{1}{T_t} = 0,4471 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6-27)$$

Koeficijent pojačanja otvorenog sustava s regulatorom $K_{oR\omega s}$ u području niskih frekvencija ω_{nf} s nagibom karakteristike $L_{oR\omega s}(\omega)$ od -1 (-20 dB/dek) iznosi:

$$K_{oR\omega s} = 10^{\frac{L_{oR\omega s}(1)}{20}} = 82833,3 \quad (6-28)$$

Koeficijent pojačanja PI regulatora brzine vrtnje:

$$K_{R\omega S} = \frac{K_{oR\omega S} * T_{I\omega S}}{K_{zi} * K_m * K_t * K_\omega} = 0,0721 \quad (6-29)$$

6.3. Rezultati testiranja

6.3. Test results

Dobivene parametre regulatora potrebno je unijeti u programski paket *Starter* i primijeniti na upravljačku jedinicu.

Regulator brzine vrtnje projektiran je tako da nadvišenje odziva bude 25%. Kako bi kompenzacija poremećaja bila što bolja koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje poveća se tako da nadvišenje iznosi 40%, a kasnije se to nadvišenje, uvođenjem prefiltra brzine vrtnje, smanji na 10%. Korigirani parametri koeficijenta pojačanja regulatora brzine vrtnje, kao i iznos vremenske konstante prefiltra određuju se najprije u *Matlab-Simulinku*, a po potrebi korigiraju tijekom testiranja.

Vremenska konstanta povratne veze brzine vrtnje utječe na parametre regulatora brzine vrtnje kao i na samo ponašanje elektromotornog pogona, te su shodno tome proračunati parametri regulatora za različite iznose vremenske konstante u cilju postizanja što boljeg rada elektromotornog pogona.

Odrađena su testiranja koju uključuju odziv

sustava na promjenu reference od $250 \frac{\text{okr}}{\text{min}}$ uz

proračunate parametre regulatora, odziv uz korigiran koeficijent pojačanja kojim se ostvaruje nadvišenje od 40% te testiranje uz prefilter brzine vrtnje kojim se ostvaruje nadvišenje od 10%. Prikazani su i rezultati testiranja za ubrzanje motora od 0 do nazivne brzine vrtnje.

Parametri regulatora brzine vrtnje za iznos vremenske konstante povratne veze brzine vrtnje $T_\omega = 1 \text{ ms}$ iznose:

$$K_{R\omega S} = 0,0721$$

$$T_{I\omega S} = 9 \text{ ms}$$

Rezultati testiranja za te parametre prikazani su na slici 6.5. Postiže se nadvišenje od oko 30%. Kako bi nadvišenje iznosilo 40% potrebno je koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje

korigirati na iznos:

$$K_{R\omega} = 0,25$$

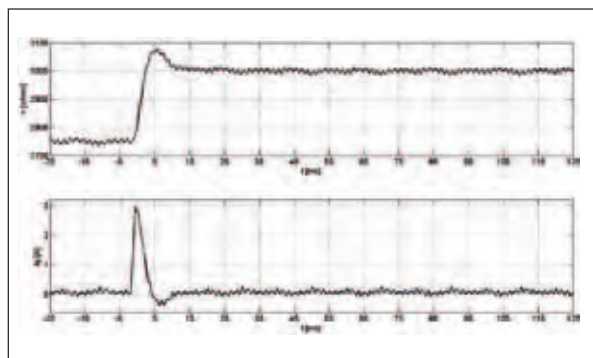
što predstavlja više od trostruko povećanje koeficijenta pojačanja i preveliko forsiranje sustava, te se korigirani parametar uzima kao dvostruko veći:

$$K_{R\omega} = 0,1442$$

Postiže se nadvišenje od oko 37% (slika 6.6). Uvođenjem prefiltra brzine vrtnje s vremenskom konstantom:

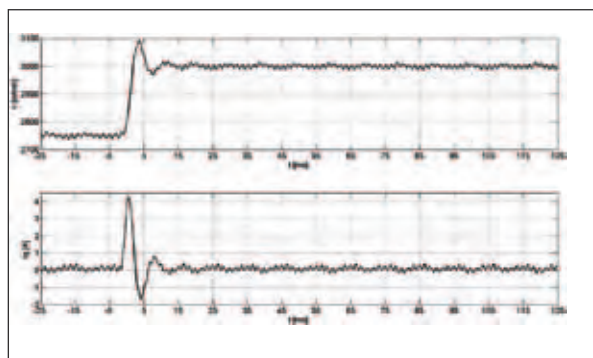
$$T_{pf\omega} = 2,6 \text{ ms}$$

dolazi se do nadvišenja od 10% (slika 6.7).



Slika 6.5. Rezultati testiranja uz $K_{R\omega S}=0,0721$ i $T_{I\omega S}=9 \text{ ms}$

Figure 6.5. Test results with $K_{R\omega S}=0,0721$ and $T_{I\omega S}=9 \text{ ms}$

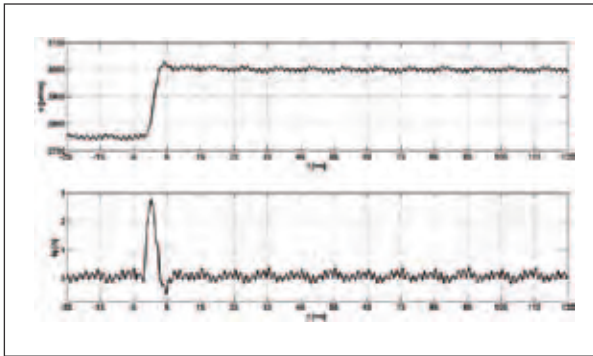


Slika 6.6. Rezultati testiranja uz $K_{R\omega S}=0,144$ i $T_{I\omega S}=9 \text{ ms}$

Figure 6.6. Test results with $K_{R\omega S}=0,144$ and $T_{I\omega S}=9 \text{ ms}$

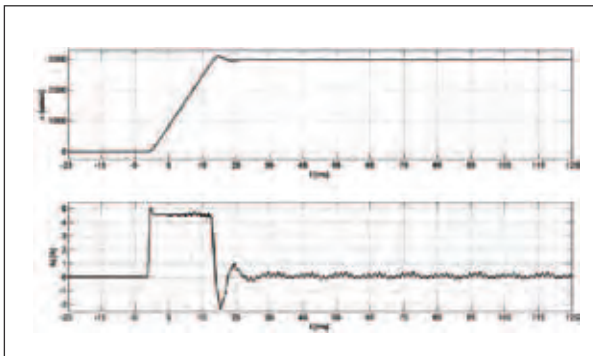
Promjenom iznosa vremenske konstante povratne veze brzine vrtnje na:

$$T_\omega = 0,5 \text{ ms}$$



Slika 6.7. Rezultati testiranja uz $K_{Ros}=0,144$, $T_{los}=9$ ms i $T_{pf\omega}=2,6$ ms

Figure 6.7. Test results with $K_{Ros}=0,144$, $T_{I\omega s}=9$ ms and $T_{pf\omega}=2,6$ ms



Slika 6.8. Rezultati testiranja ubrzanja motora od 0 do nazivne brzine vrtnje uz $K_{Ros}=0,144$, $T_{los}=9$ ms i $T_{pf\omega}=2,6$ ms

Figure 6.8. Acceleration test results from 0 to nominal speed with $K_{Ros}=0,144$, $T_{I\omega s}=9$ ms and $T_{pf\omega}=2,6$ ms

parametri regulatora brzine vrtnje iznose:

$$K_{R\omega s} = 0,1443$$

$$T_{I\omega s} = 4,5 \text{ ms}$$

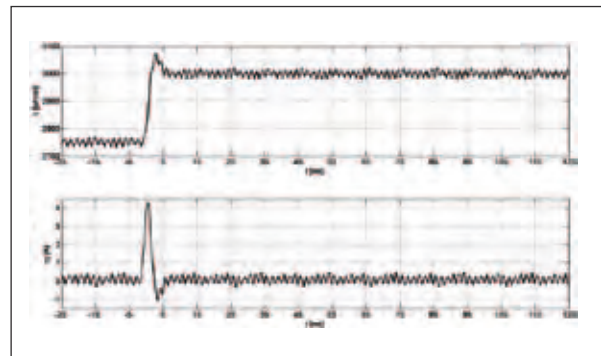
Ovim parametrima postiže se nadvišenje od 29% (slika 6.9). Za postizanje nadvišenja od 40% (slika 6.10) koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje je dvostruko veći i iznosi:

$$K_{R\omega} = 0,289$$

Uvođenjem prefiltra brzine vrtnje s iznosom vremenske konstante od:

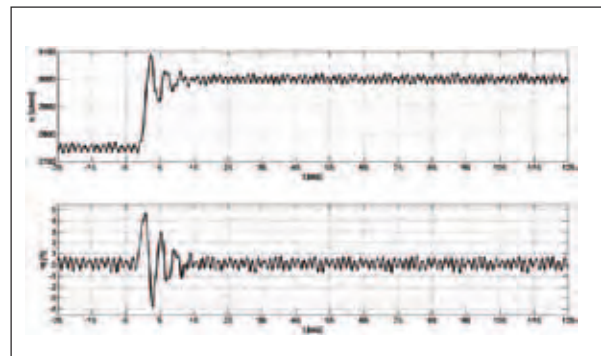
$$T_{pf\omega} = 1,5 \text{ ms}$$

postiže se nadvišenje od 10% kao što je prikazano na slici 6.11. Slika 6.12 prikazuje ubrzanje motora od 0 do nazivne brzine vrtnje.



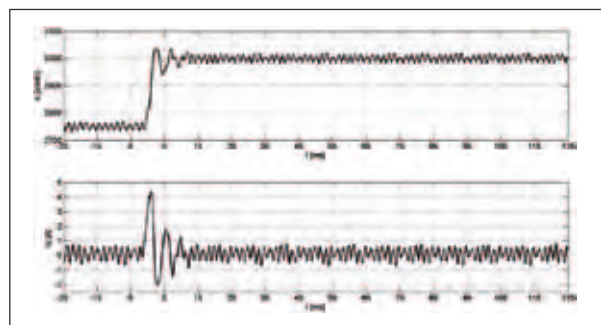
Slika 6.9. Rezultati testiranja uz $K_{Ros}=0,144$ i $T_{los}=4,5$ ms

Figure 6.9. Test results with $K_{Ros}=0,144$ and $T_{I\omega s}=4,5$ ms



Slika 6.10. Rezultati testiranja uz $K_{Ros}=0,289$ i $T_{los}=4,5$ ms

Figure 6.10. Test results with $K_{Ros}=0,289$ and $T_{I\omega s}=4,5$ ms



Slika 6.11. Rezultati testiranja uz $K_{Ros}=0,289$, $T_{los}=4,5$ ms i $T_{pf\omega}=1,5$ ms

Figure 6.11. Test results with $K_{Ros}=0,289$, $T_{I\omega s}=4,5$ ms and $T_{pf\omega}=1,5$ ms

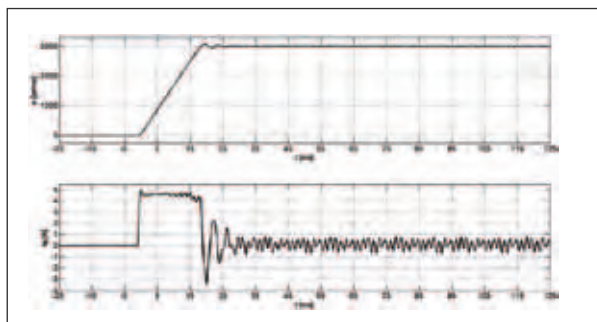
Ukoliko vremenska konstanta povratne veze brzine vrtnje iznosi:

$$T_{\omega} = 2 \text{ ms}$$

parametri regulatora brzine vrtnje su:

$$K_{R\omega s} = 0,0361$$

$$T_{I\omega s} = 18 \text{ ms}$$



Slika 6.12. Rezultati testiranja ubrzanja motora od 0 do nazivne brzine vrtnje uz $K_{R\omega s}=0,289$, $T_{I\omega s}=4,5$ ms i $T_{pf\omega}=1,5$ ms

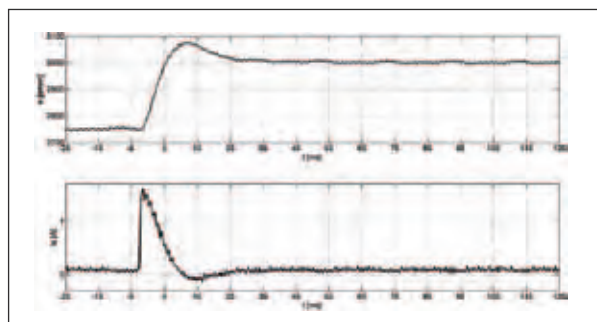
Figure 6.12. Acceleration test results from 0 to nominal speed with $K_{R\omega s}=0,289$, $T_{I\omega s}=4,5$ ms and $T_{pf\omega}=1,5$ ms

Za postizanje nadvišenja od 40% (slika 6.14) koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje potrebno je korigirati na:

$$K_{R\omega} = 0,072$$

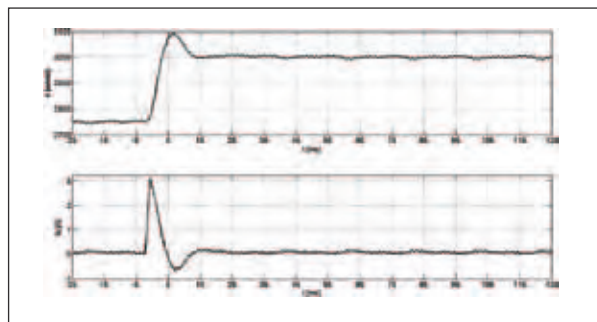
Vremenska konstanta prefiltra brzine vrtnje kojom se postiže nadvišenje od 10% (slika 6.15) je:

$$T_{pf\omega} = 4$$
 ms



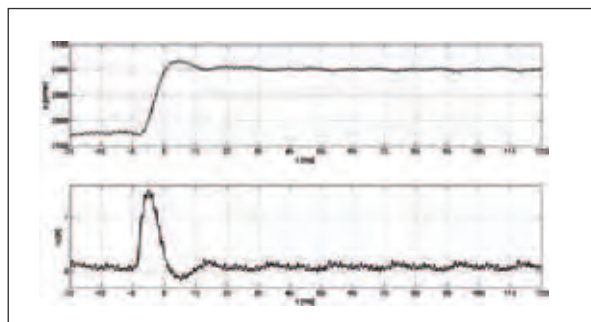
Slika 6.13. Rezultati testiranja uz $K_{R\omega s}=0,0361$ i $T_{I\omega s}=18$ ms

Figure 6.13. Test results with $K_{R\omega s}=0,0361$ and $T_{I\omega s}=18$ ms



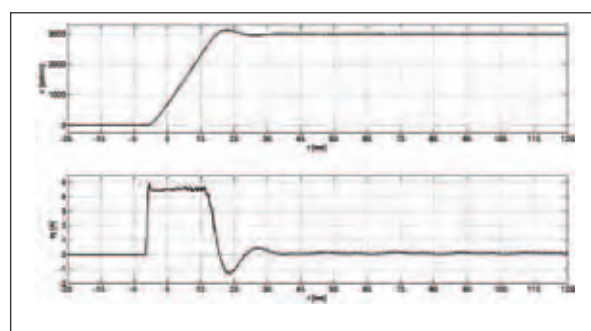
Slika 6.14. Rezultati testiranja uz $K_{R\omega s}=0,072$ i $T_{I\omega s}=18$ ms

Figure 6.14. Test results with $K_{R\omega s}=0,072$ and $T_{I\omega s}=18$ ms



Slika 6.15. Rezultati testiranja uz $K_{R\omega s}=0,072$, $T_{I\omega s}=18$ ms i $T_{pf\omega}=4$ ms

Figure 6.15. Test results with $K_{R\omega s}=0,072$, $T_{I\omega s}=18$ ms and $T_{pf\omega}=4$ ms



Slika 6.16. Rezultati testiranja ubrzanja motora od 0 do nazivne brzine vrtnje uz $K_{R\omega s}=0,072$, $T_{I\omega s}=18$ ms i $T_{pf\omega}=4$ ms

Figure 6.16. Acceleration test results from 0 to nominal speed with $K_{R\omega s}=0,072$, $T_{I\omega s}=18$ ms and $T_{pf\omega}=4$ ms

Tablica 6.1 prikazuje parametre regulatora brzine vrtnje, ostvareno nadvišenje i vrijeme maksimuma, korigirane parametre regulatora i iznos vremenske konstante prefiltra brzine vrtnje za različite iznose vremenske konstante povratne veze i promjenu reference od $250 \frac{\text{okr}}{\text{min}}$. Dano je i

ostvareno vrijeme maksimuma za ubrzanje motora od 0 do nazivne brzine vrtnje (t_{mn}).

Tablica 6.1. Usporedba rezultata

Table 6.1. Comparison of results

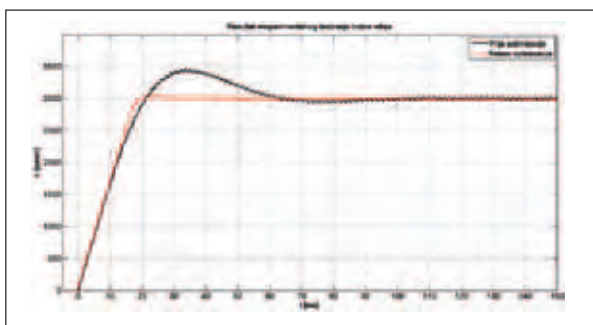
T_{ω}	1 ms	0,5 ms	2 ms
$K_{R\omega s}$	0,072	0,144	0,036
$T_{I\omega s}$ [ms]	9	4,5	18
σ_{ms} [%]	32	28	26

t_{ms} [ms]	5,75	2,8	11,5
$K_{R\omega}$	0,15	0,28	0,072
σ_m [%]	10	10	10
t_m [ms]	4,25	2,6	9,8
t_{mn} [ms]	19,9	19,5	23,3
T_{pfo} [ms]	2,6	1,5	4

Usporedbom rezultata iz tablice 5.2 i tablice 6.1 dolazi se do zaključka da sustav uz nove parametre regulatora, isključen PT2 setpoint filtar i postavljen prefiltar brzine vrtnje ima manje ostvareno nadvišenje uz brži odziv.

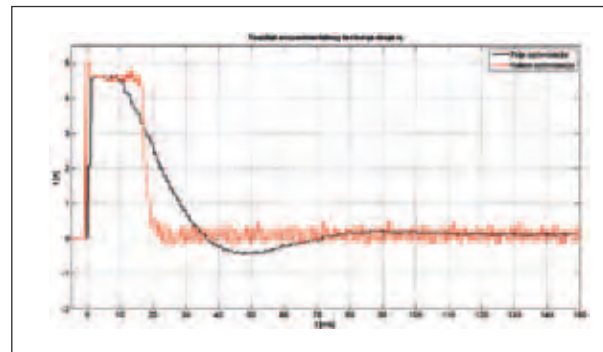
Usporedbom rezultata testiranja prikazanih na slikama 6.4 do 6.15 vidljiv je utjecaj iznosa vremenske konstante povratne veze. Uz veću vremensku konstantu povratne veze postiže se glatkiji odziv, no kompenzacija poremećaja bi u tom slučaju trebala biti sporija nego s manjom vremenskom konstantom. S manjom vremenskom konstantom povratne veze postiže se preveliko forsiranje, te je prisutna veća količina oscilacija. Najbolje ponašanje elektromotornog pogona postiže se uz $T_{\omega} = 1 \text{ ms}$.

Na slici 6.17 i 6.18 prikazani su rezultati testiranja uz početne parametre sustava, te rezultati uz proračunate parametre regulatora, uklonjen PT2 setpoint filtar i postavljen prefiltar brzine vrtnje. Vidljivo je poboljšanje rada elektromotornog pogona u pogledu manjeg nadvišenja uz ostvaren brži odziv. Isto tako, kompenzacija poremećaja bi trebala biti bolja po iznosu i vremenski brža.



Slika 6.17. Usporedba rezultata testiranja brzine vrtnje

Figure 6.17. Comparison of rotation speed test results



Slika 6.18. Usporedba rezultata testiranja struje iq

Figure 6.18. Comparison of current iq test results

7. Zaključak

7. Conclusion

Sinkroni motori s permanentnim magnetima jedni su od najboljih motora zbog svojih malih dimenzija, visoke korisnosti, velikog faktora snage i velike gustoće snage po jedinici volumena. Korištenjem napredne matematičke analize u radu strojeva moguće je prikazati model SMPM-a u rotirajućem koordinatnom sustavu u kojem su sve fizikalne varijable neovisne o položaju rotora. Model SMPM-a u takvom, dq sustavu, ekvivalentan je modelu istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom.

Analizom rezultata testiranja elektromotornog pogona uočeno je da se ponašanje elektromotornog pogona može poboljšati. U početnom modelu pogona koristi se PT2 setpoint filtar koji dodatno usporava odziv, a njegovim uklanjanjem ne gubi se ništa što je regulacijski važno. Shodno isključivanju filtra potrebno je proračunati nove parametre regulatora struje (momenta) i brzine vrtnje. Podešena je i vremenska konstanta povratne veze brzine vrtnje, te je postavljen prefiltar. Primjenom rezultata optimizacije na pogon postiže se brži odziv brzine vrtnje uz manje nadvišenje, dok je struja i dalje u granicama dozvoljenih vrijednosti, a kompenzacija poremećaja bi trebala biti po iznosu manja te vremenski brža.

8. Reference

8. References

- [1] Crnošija, P. i Bjažić, T., Osnove automatike (1. dio: Analiza i sinteza kontinuiranih sustava - teorija i primjena), Zagreb, Element, 2011.
- [2] Dragojević M., Izvedba algoritma upravljanja i regenerativnog kočenja sinkronog motora s permanentnim magnetima, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2012.
- [3] Pravica, L., Strukture upravljanja sinkronim motorom s permanentnim magnetima, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2012.
- [4] Siemens, 1/2011. , Sinamics S120/S150, http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SINAMICS_02_2012_E/LH1.pdf?p=1, 08.03.2014.
- [5] Siemens, 9/2011., Connection of the SINAMICS S120 to the Technology CPU, http://cache.automation.siemens.com/dnl/jM/jM0ODUwNQAA_30119684_HB/pi_s120_en-US_en-US.pdf, 08.03.2014.
- [6] Kolonić, F., Sumina, D., Kutija, M., Upute za rad s frekvencijskim pretvaračem Sinamics S120, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2011/2012
- [7] Siemens, 11/2009., Sinamics S120, http://www.industry.usa.siemens.com/datapool/us/dt/drives/docs/drv-sinamics_s120-cu_comp_manual.pdf, 15.04.2014.
- [8] Siemens, <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6SL3040-1MA01-0AA0>, 15.04.2014.
- [9] Siemens, <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6SL3210-1SB12-3AA0>, 16.04.2014.
- [10] Siemens, <https://eb.automation.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/?mlfb=1FK7032-2AF2>, 16.04.2014
- [11] Boršić M., Upravljanje brzinom vrtnje sinkronog motora s permanentnim magnetima, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2014.

AUTORI · AUTHORS

Marko Boršić - nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 2, No. 2, 2014.

Toni Bjažić - nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 2, No. 2, 2014.