

Načrtovanja algoritma vodenja sinhronskega motorja z uporabo preizkuševališča

Robert Horvat, Franc Hanžič, Karel Jezernik
Univerza v Mariboru, FERI
Smetanova 17, 2000 Maribor

robert.horvat@uni-mb.si, hanzicf@siol.net, karel.jezernik@uni-mb.si

Design of state controller and PI estimator for Synchronous motor with the use for testing platform

Control method using state controller and PI estimator is described in this paper. This method can be applied in the control of robotic mechanism in order to achieve precise trajectory tracking. Simulation model was tested in Matlab/Simulink and experiments were carried out using a load emulation testing platform. A synchronous motor with DSP-2 controller was used as active load in dynamic load emulation.

1 Uvod

V sodobni industriji so vedno pogostejše uporabljeni hitrostno ali položajno vodeni sinhronski motorji. Uporabljamo jih predvsem zaradi dobrih karakteristik, kot so majhna teža motorja glede na mehansko moč, dober izkoristek in dokaj enostavno vodenje. Sinhronski motor ima na rotorju nameščene trajne magnetne, kar pomeni, da moramo za vodenje sinhronskega motorja poznati orientacija rotorskega magnetnega sklepa oziroma absolutni položaj rotorja. Za vodenje sinhronskega motorja je zato nujna uporaba absolutnega merilnika položaja. V opisani aplikaciji je uporabljen sinhronski motor s sinusno porazdelitvijo magnetnega polja na rotorju. Njegovi podatki so naslednji:

Motor Power Company, Tetra SRL

$M_{\max} = 0.9 \text{ Nm}$	$J = 0.23 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$
$\Omega_{\max} = 6000 \text{ rpm}$	$B = 0.23 \cdot 10^{-3} \text{ Nms/rad}$
$K_m = 0.09 \text{ Nm/A}$	$L_s = 0.87 \text{ mH}$
$p = 2$	$R_s = 0.33 \text{ } \Omega$

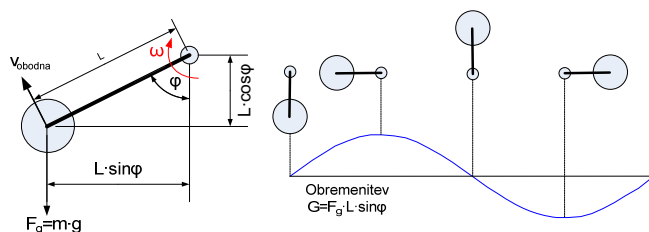
Robotske aplikacije so največkrat namenjene za izvajanje nalog, kjer zahtevamo natančno sledenje hitrostnih in položajnih trajektorij. Za takšno izvajanje potrebujemo robotski

mehanizem, ki ga lahko zapišemo s sistemom nelinearnih enačb 2. reda (1),

$$m_e = D(\phi) \cdot \dot{\omega} + C(\phi, \omega) + F(\omega) + G(\phi) \quad (1)$$

pri čemer predstavlja $D(\phi)$ matriko koeficientov vztrajnosti, $C(\phi, \omega)$ Coriolisove in centrifugalne sile, $G(\phi)$ gravitacijo bremen in $F(\omega)$ suho in viskozno trenje. Vsota vseh členov predstavlja matriko navorov m_e . Poznamo pa mehatronske aplikacije pri katerih je za opis trajektorije zadosten mehanizem z eno prostostno stopnjo.

Ena izmed možnih nalog enoosnega mehanizma je premikanje bremena, ki lahko poteka v horizontalni ali vertikalni smeri. V primeru, da je os motorja postavljena horizontalno, lahko breme, ki nima težišča v osi motorja, opišemo kot nihalo (Slika 1).



Slika 1: Delovanje nihala

Pri takem sistemu se enačba (1) poenostavi, saj odpade vpliv Coriolisovih in centrifugalnih sil, ki nastanejo med dvema prostostnima stopnjama robotskega mehanizma.

Značilnost nihala je, da na obremenitev poleg mase vpliva tudi sila zaradi gravitacijskega pospeška $G(\phi)$, in se spreminja produkt vztrajnostnega momenta in pospeška $D(\phi) \cdot \dot{\omega}$.

$$m_{e_nihalo} = D(\phi) \cdot \dot{\omega} + F(\omega) + G(\phi) \quad (2)$$

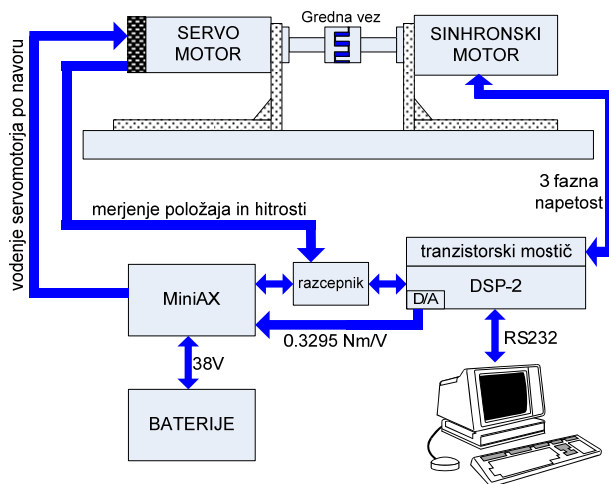
Prisotni sta suho in viskozno trenje $F(\omega)$, ki sta odvisni od hitrosti vrtenja. Zaradi zelo malih vrednosti suho trenje zanemarimo.

$$m_{e_nihalo} = mL^2 \dot{\omega} + B_{nihalo} \omega + mgL \cos \varphi \quad (3)$$

Takšna naloga je realizirana na preizkuševališču, opisanem v nadaljevanju.

2 Preizkuševališče

Preizkuševališče je sestavljeno iz sinhronskega motorja (preizkušanec) in servo motorja. Oba motorja sta povezana preko gredne vezi (Slika 2), kar omogoča, da lahko s pomočjo servo motorja izvajamo emulacijo mehanskih bremen na sinhroonskem motorju. Zaradi sklopljenosti obeh motorjev je za merjenje hitrosti in položaja uporabljen le en merilnik hitrosti (inkrementalni dajalnik). Za vodenje servo motorja je uporabljen industrijski regulator MiniAX, ki omogoča vodenje servo motorja po navoru preko analognega vhoda.



Slika 2 : Blokovna shema preizkuševališča

Vodenje sinhronskega motorja je izvedeno s pomočjo DSP-2 kartice, katere delovanje temelji na digitalnem signalnem procesorju. Vodenje sinhronskega motorja poteka preko pulzno širinske modulacije (PŠM) krmiljenega trifaznega tranzistorskega mostiča. Podatki o položaju in hitrosti se prenesejo s pomočjo razcepnika na regulator servo motorja in na DSP-2 kartico. Za napajanje se uporabljajo tri zaporedno vezani 12V akumulatorji, kar skupaj predstavlja minimalno napajalno napetost 36V. Akumulatorji so primerni tudi zaradi dvosmernega prenosa energije, saj pri zaviranju motor vrača energijo v akumulatorje.

S pomočjo emuliranega nihala bo preizkušena metoda vodenja sinhronskega motorja z regulatorjem stanj in PI estimatorjem (Slika 3). Pri tej metodi reguliramo položaj in hitrost glede na referenčne vrednosti hitrosti ω^d in položaja φ^d , in s pomočjo izračunanega pospeška iz regulatorja stanj lahko reguliramo referenčno vrednost pospeška $\dot{\omega}^d$. S pomočjo PI estimatorja se sproti ocenjuje vpliv bremena.

3 Regulator stanj s PI estimatorjem

V aplikacijah vodenja mehanskega gibanja lahko uporabimo regulacijsko metodo, ki jo podaja Slika 3, pri čemer PI estimator motnje uporabimo za izračun navora obremenitve. Kot referenčno vrednost določimo položaj, hitrost in pospešek gibanja iz začetnega v končni položaj giba. Diferencialna enačba gibanja (2) vsebuje pospešek $\dot{\omega}$, ki je zaradi razmerja signal/šum težko izmerljiv, navor bremena m_b , ki tudi ni poznan, ocenjeni vztrajnostni moment $\hat{J}$ motorja z bremenom in električni moment m_e (5) sinhronskega motorja.

$$\hat{J} \cdot \dot{\omega} = m_e - m_b \quad (4)$$

$$m_e = K_m \cdot i_q \quad (5)$$

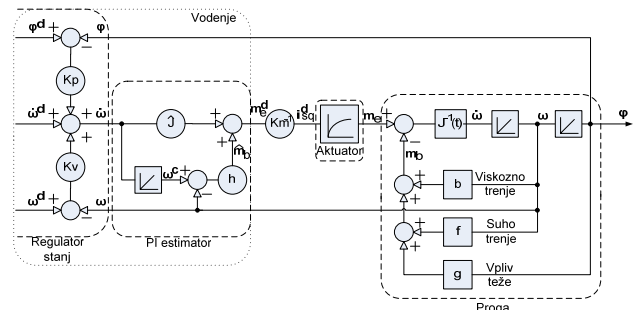
K_m – navorna konstanta

i_{sq} – navorna komponenta statorskega toka

$$K_m = p \cdot \psi_m \quad (6)$$

p – število polovih parov

ψ_m – magnetni sklep trajnega magneta



Slika 3: Blokovna shema vodenja

Blokovno shemo (Slika 3) sestavljata mehanizem in aktuator z izvedenim vodenjem. Regulacijo sestavlja regulator stanj, ki je

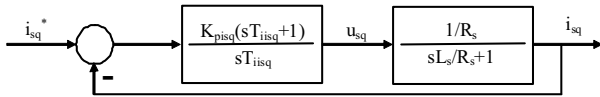
namenjen za povratnozančno vodenje aktuatorja (sinhronskega motorja) in PI estimator, ki ocenjuje navor bremena (7).

$$\hat{m}_b = h \cdot (\omega - \omega^c) \quad (7)$$

Z integriranjem pospeška $\dot{\omega}$ algoritem računa kotno hitrost ω_c (8), s pomočjo katere izračuna ocenjeno vrednost navora obremenitve $\hat{m}_b$.

$$\omega^c = \int_0^t [\dot{\omega}^d + K_v \cdot (\omega^d - \omega) + K_p \cdot (\varphi^d - \varphi)] dt \quad (8)$$

Za regulacijo je potrebna meritev hitrosti, položaja in toka pri čemer je tokovna regulacija izvedena v pretvorniku (Slika 4).



Slika 4: Prenosna funkcija električnega dela motorja s tokovnim regulatorjem

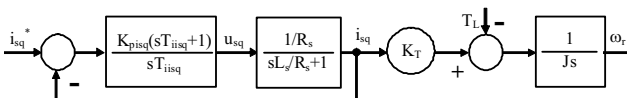
S pravilno izbiro integracijske konstante T_{iisq} (9), lahko obnašanje zaprte tokovne zanke zapišemo s prenosno funkcijo člena 1. reda (8).

$$T_{iisq} = \frac{L_s}{R_s} \quad (9)$$

$$F_{od}(s) = \frac{K_{pisq} \cdot (sT_{iisq} + 1)}{sT_{iisq}} \cdot \frac{R_s}{\frac{sL_s}{R_s} + 1} \quad (10)$$

$$H_t(s) = \frac{F_{od}(s)}{1 + F_{od}(s)} = \frac{\frac{K_{pisq}}{sL_s}}{1 + \frac{K_{pisq}}{sL_s}} = \frac{1}{s \frac{L_s}{K_{pisq}} + 1} \quad (11)$$

Pričakovano prenosno funkcijo (Slika 5) motorja predstavlja člen 2. reda (električni in mehanski del), za katerega sta značilni lastna frekvenca ω_0 in dušenje D . Prenosna funkcija skupaj z modelom za vodenje predstavlja člen 3. reda.



Slika 5: Prenosna funkcija motorja s tokovnim regulatorjem

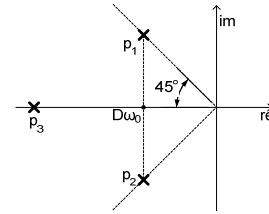
Po opravljenem načrtovanju regulatorja toka, izberemo parametre regulatorja stanj in PI estimatorja. Določimo pole regulatorja.

Z izbiro ojačanj K_p in K_v po enačbi (12) določimo pola p_1 in p_2 , tretji pol p_3 pa izberemo po enačbi (13) s pomočjo parametra h (Slika 6).

$$p_{1,2} = \frac{-K_v \pm \sqrt{K_v^2 - 4 \cdot K_p}}{2} \quad (12)$$

$$p_3 = -\frac{h}{J} \quad (13)$$

Dušenje sistema določimo z razmerjem ojačanj K_v in K_p .



Slika 6: Postavitev polov

Pri izbiri parametrov K_p , K_v in h moramo upoštevati dejstvo, da mora biti frekvenca regulatorja stanja večja od lastne frekvence aktuatorja. Omejena je tudi zgornja frekvenca regulatorja stanj, ki povzroča motnje na referenčnem navoru m_e^d (Slika 3). Ta frekvenca je predvsem odvisna od zmogljivosti merilnika hitrosti.

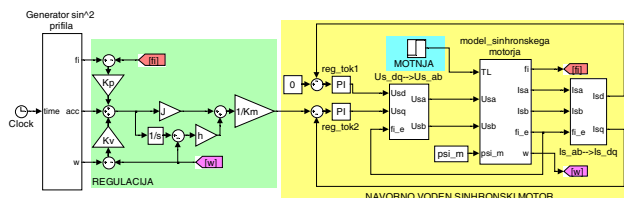
3.1 Emulirano nihalo

Obremenjevanje sinhronskega motorja je izvedeno s pomočjo emuliranega bremena, kar realiziramo s servo motorjem, ki ga vodimo po navoru. Navor servo motorja predstavlja navor bremena m_b . Če želimo emulirati nihalo m_{b_nihalo} , potrebujemo za določitev navora servo motorja podatke o hitrosti in položaju motorja (3).

3.2 Simulacije

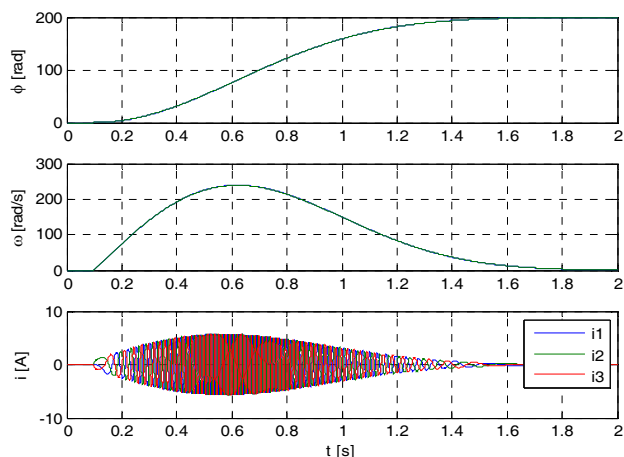
Uporabljen je model sinhronskega motorja v fiksnem α - β koordinatnem sistemu, ki se pretvori v d-q rotorski koordinatni sistem. V rotorskem koordinatnem sistemu lahko

obravnavamo sinhronski motor kot enosmerni motor, če je zagotovljeno konstantno magnetenje ($i_{sd} = 0$), kar pomeni, da s spreminjanjem toka i_{sq} neposredno vplivamo na navor motorja.



Slika 7: Simulacijski model proge z regulatorjem stanj in PI estimatorjem

V okolju Matlab/Simulink je izdelan simulacijski model sinhronskega motorja z regulatorjem stanj (Slika 7).



Slika 8: Sprememba referenčnega položaja

Pri simulacijskem modelu se odziva dejanske hitrosti in položaja ujemata z referenčnima (Slika 8). Po uspešni simulacijski izvedbi je bil postopek ponovljen na eksperimentalnem delu.

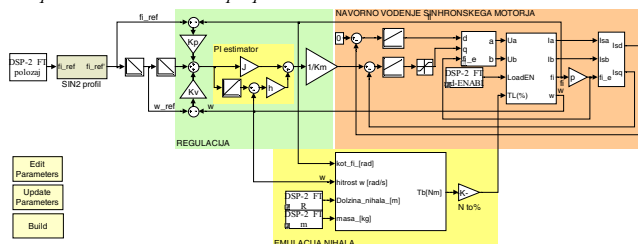
3.3 Eksperiment

Eksperimentalni model (Slika 9) je izveden s pomočjo orodja Matlab/Simulink z dodatno knjižnico, ki zagotavlja povezavo z DSP-2 kartico (generira ustrezno C-kodo za digitalni signalni procesor na DSP-2 karti). Za izdelavo modela je bil uporabljen prej omenjeni simulacijski model (Slika 7), ki je preoblikovan za delovanje na DSP-2 karti. Zamenjani so bili vsi zvezni elementi z diskretnimi in namesto simulacijskega modela motorja je bil uporabljen

vmesnik iz dodatne knjižnice, ki zagotavlja povezavo Simulink sheme na DSP-2 in naprej na sinhronski motor. Regulacija je potekala s časom tipanja $T=150 \mu s$.

Za tokovno regulacijo tokov i_{sd} in i_{sq} sinhronskega motorja sta uporabljena PI regulatorja z naslednjimi parametri:

$$T_{iisq} = 2,63 \text{ ms}, K_{pisq} = 0,725$$



Slika 9: Eksperimentalni model proge z regulatorjem stanj in PI estimatorjem

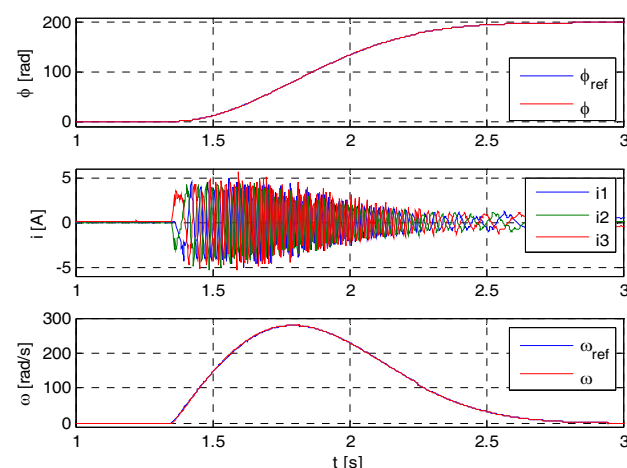
Izbrane vrednosti polov regulatorja stanj in PI estimatorja so:

$$p_{1,2} = -100 \pm j92, p_3 = -400$$

Tako so z enačbama (12) in (13) izračunane vrednosti regulacijske sheme za K_p , K_v in h .

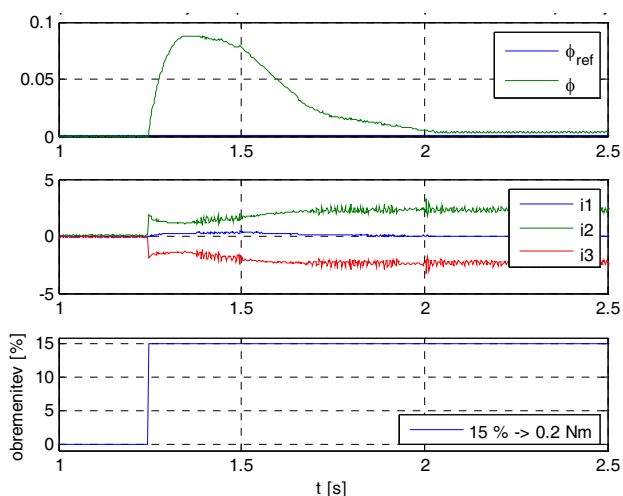
$$K_v = 200, K_p = 400, h = 0.04$$

Izveden je odziv sistema na spremembo referenčnega položaja iz položaja 0 do 200 rad (Slika 10).



Slika 10: Sprememba položaja brez obremenitve. Dejanska hitrost in položaj se praktično prekrivata z referenčnima – dobro sledenje (Slika 10).

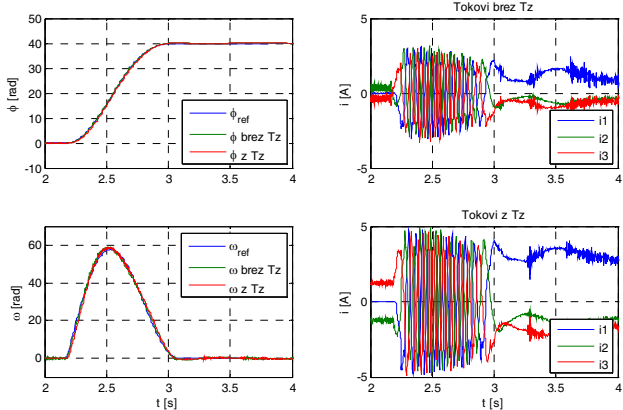
Posnet je tudi odziv sistema pri konstantnem položaju na vpliv zunanje obremenitve (Slika 11).



Slika 11: Sprememba obremenitve pri konstantnem položaju

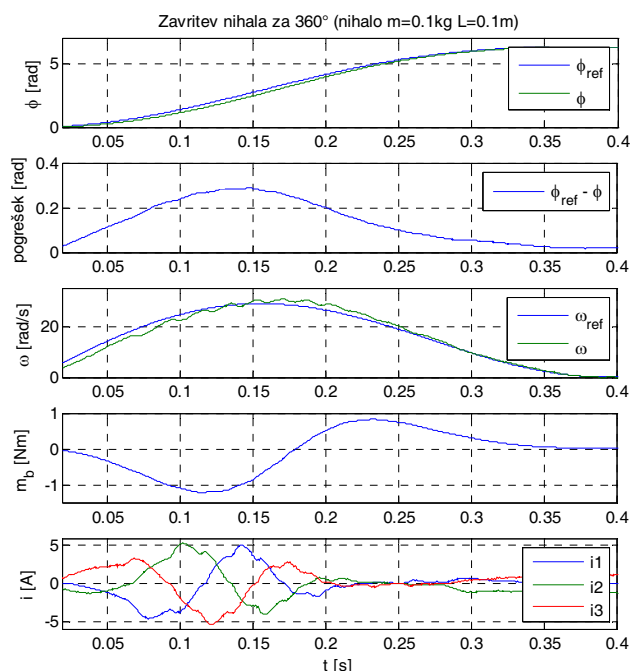
Zaradi povečanja zunanje obremenitve regulator s povečanjem tokov hitro odpravi pogrešek (Slika 11).

Odziv spremembe položaja pod vplivom konstantne zunanje obremenitve (Slika 12) predstavlja eno izmed industrijskih (robootskih) aplikacij.



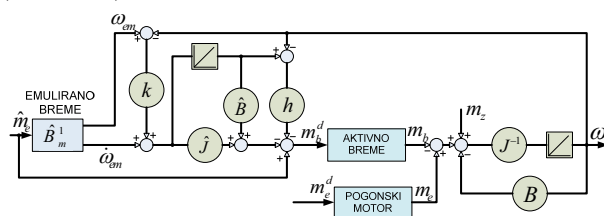
Slika 12: Sprememba položaja pri obremenitvi

Sledenje položaja je tudi pod vplivom zunanje obremenitve zelo dobro, med dejansko in referenčno hitrostjo pa nastopi manjša zakasnitev. Zaradi zunanje obremenitve se posledično poveča amplituda tokov (Slika 12). Za zadnji preizkus metode vodenja je kot breme emulirano nihalo (Slika 13).

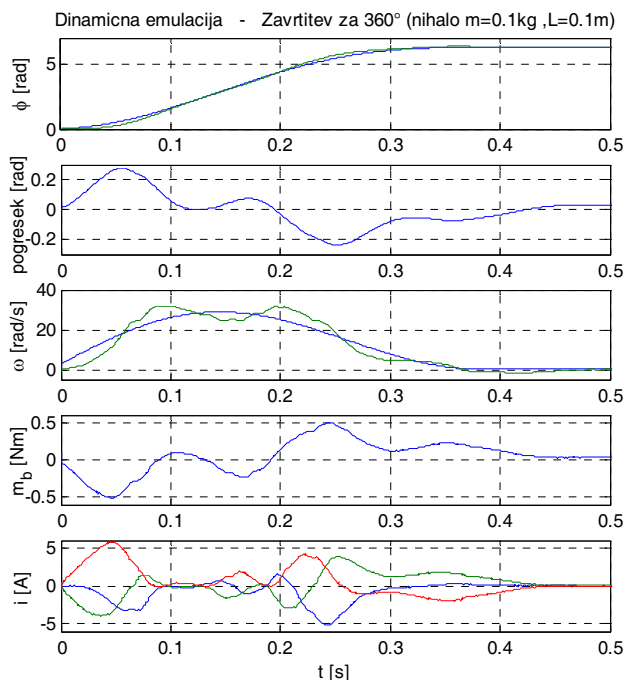


Slika 13: Emulacija nihala

Pri dinamični obremenitvi (Slika 13) se poveča sledilni pogrešek položaja in hitrosti. Na tokovnih odzivih je razvidno, da je amplituda toka tudi brez obremenitve večja od 0A. To je posledica samodržnega navora (cogging torque), ki ga generirata oba motorja. Zaradi tega se pri dejanski hitrosti pojavijo nihanja. Tok pa tudi pri mirovanju motorja ni enak 0A, ampak se spreminja glede na velikost samodržnega navora. Pričakovali bi, da bo navor pri pospeševanju nihala največji, vendar pa na odzivu obremenitve opazimo, da se obremenitev (Slika 13) povečuje postopoma. Ugotovimo, da je to posledica izbrane metode (statična emulacija bremena), ki ne upošteva spremembe pospeška. Postopek ponovimo z metodo dinamične emulacije bremen s PI estimatorjem (Slika 14).



Slika 14: Dinamična emulacija bremen s PI estimatorjem



Slika 15: Emulacija dinamičnega nihala

Pri dinamični emulaciji nihala se obremenitev spreminja tudi glede na pospeševanje in zaviranje nihala, odvisna je tudi od pospeška bremena $\dot{\omega}_{em}$ (Slika 15).

4 Sklep

Regulacija sinhronskega motorja z regulatorjem stanj in PI estimatorjem je bila preizkušena v štirih načinih obratovanja (prosti tek, konstantna obremenitev v mirovanju in med obratovanjem, dinamična obremenitev – nihalo). Pri različnih tipih emuliranih bremen so bili opazovani položaj, hitrost in amplituda faznih tokov.

Regulirani sta položaj in hitrost, kar je primerno za sledenje trajektoriji v robotskih sistemih. Čim bolje poznamo breme, tem bolje je lahko dimenzioniran PI estimator. S pravilno izbiro K_p in K_v je določena lastna frekvenca in dušenje regulator stanj. Frekvenca regulatorja stanj mora biti vsaj $10\times$ višja od lastne frekvence mehanskega dela sistema. Najhitrejša delovanje pa mora zagotoviti PI estimator, s pomočjo katerega se ves čas izračunava velikost

zunanje obremenitve. V našem primeru je PI estimator $5\times$ hitrejši od regulatorja stanj.

Pri prehodu iz simulacijskega (zvezni prostor) v eksperimentalni (diskretni prostor) model se izvede diskretizacija. Določi se časovni interval (T – perioda vzorčenja) v katerem se izvaja regulacijski postopek. Periodo vzorčenja določa zmogljivost DSP-ja. Pri kratki periodi vzorčenja je odziv diskretnega sistema praktično enak zveznemu. Pri daljši periodi vzorčenja se nižja frekvenca sistema do katere je le-ta stabilen.

V simulacijskem modelu ni bilo potrebno biti pozoren na maksimalne vrednosti tokov in hitrosti. Pri eksperimentalnem delu so prisotne fizične omejitve sistema (maksimalna hitrost motorja 628 rad/s, maksimalni tokovi skozi tranzistorski most 6 A).

Glede na rezultate lahko ocenimo, da je regulacijska metoda primerna za mehatronske aplikacije, kjer je naloga vnaprej podana. Pri tem mora uporabljeni PI estimator delovati z zadostno frekvenco. Preizkuševališče je se izkazalo za primerno pri testiranju regulacijskih metod pri različni obremenitvah, kjer namesto fizičnega bremena le-tega emuliramo.

5 Literatura

- [1] Chi-Tsong Chen, Analog and Digital Control System Design, State university of New York at Stony Brook, 1993
- [2] Dokumentacija DSP2 na spletu, <http://www.ro.feri.uni-mb.si/projekti/dsp2>
- [3] D. Dolinar, G. Štumberger, Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov, FERi, Univerza v Mariboru, Maribor 2004
- [4] Z.H. Akpolat, G.M. Asher, J.C. Clare, "Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector Controlled Induction Motor-Generator Set", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 46, no. 2, 1999, pp. 370-379.
- [5] Z.H. Akpolat, G.M. Asher, J.C. Clare, "Experimental dynamometer emulation of non-linear mechanical loads", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 35, no. 6, 1999, pp. 1367-1273.
- [6] M. Rodič, K. Jezernik, M. Trlep: Dynamic emulation of mechanical loads: an advanced approach, IEE proc., Electr. power appl., March 2006, vol. 153, num. 2, pp. 159-166.