

ADAPTIVNI BRZINSKO - POZICIONI UPRAVLJAČKI SISTEM MOTORA ZA JEDNOSMJERNU STRUJU

Milutin Ostojić, Boris Marković, *Elektrotehnički fakultet u Podgorici*

Sadržaj - U ovom radu je dat prikaz mikroprocesorskog upravljačkog sistema za adaptivno brzinsko - poziciono upravljanje motorima za jednosmjernu struju. RLS adaptivni filter je korišćen za prepoznavanje vremenskih parametara motora. Proračunata diferencna jednačina, izmjerene vrijednosti napona i momenta, dati zakoni mijenjanja brzine i softverski ograničavač prirataja napona koriste se za definisanje napona napajanja. Razmatrani upravljački sistem je primjenjen za upravljanje motorom jednosmjerne struje sa stalnim magnetima. Dati su simulacioni i eksperimentalni rezultati.

1. UVOD

Mnogi upravljački sistemi za motore za jednosmjernu struju (JSS), podrazumjevaju konstantne parametre motora i radnog opterećenja. Oni su prilagođeni za jednu vrstu motora i radnih zadataka.

Cilj ovog rada je da se pokaže mogućnost realizacije upravljačkih sistema koji mogu vršiti upravljanje raznim tipovima motora za JSS, prilagođavati se promjenama radnog opterećenja i drugih parametara relevantnih za precizno brzinsko - poziciono upravljanje. Upravljački sistem koji zadovoljava prethodno, se adaptira na sve realne uslove radnog okruženja i eventualne promjene parametara motora u realnom vremenu.

Sistem je realizovan korišćenjem mikroprocesora uz minimum analognih elemenata potrebnih za upravljanje. Težnja je bila da se minimalizuju troškovi proizvodnje, pa su zato svi resursi, gdje je to bilo moguće, realizovani softverski. Omogućeno je veoma precizno upravljanje pri normalnim radnim uslovima.

2. DEFINICIJA PROBLEMA

Upravljački sistem treba da omogući precizno brzinsko poziciono upravljanje motorima za JSS, koji mogu biti opisani diferencnom jednačinom.

Fleksibilnost ovakvog sistema se ogleda u jednostavnom zadavanju zakona upravljanja, mogućnosti adaptacije na realne promjene parametara motora i uslova rada u vrijeme radnog procesa i u mogućnosti primjene istog upravljačkog sistema, sa eventualnim malim izmjenama u softveru, za upravljanje drugim sličnim uređajima.

Potrebno je minimizirati cijenu sistema, softverskom emulacijom svih dijelova sistema za koje je to moguće.

Ovako definisan problem je veoma interesantan iz aplikativnih i ekonomskih razloga.

3. PREDLOŽENO RJEŠENJE

U ovom radu će biti izvršena analiza rada upravljačkog brzinsko - pozicionog sistema za kontrolu rada motora za JSS sa stalnim magnetima. Realizovani sistem se može primijeniti za upravljanje svih drugih vrsta motora za JSS, koji se u vremenskom domenu mogu opisati diferencnom jednačinom.

U upravljački sistem je ugrađen RLS adaptivni filter za detekciju diferencne jednačine upravljanog motora. Omogućeno je dinamičko praćenje svih relevantnih parametara motora RLS adaptivnim filtrom uz eventualno korigovanje diferencne jednačine u realnom vremenu. Na osnovu diferencne jednačine motora i zadatog zakona upravljanja, proračunava se napon kojim je potrebno napajati motor da bi ostvario precizno brzinsko - poziciono kretanje. Ugrađen je i softverski moduo koji preuzima upravljanje u abnormalnim situacijama kao što su preopterećenja ili oštećenje motora.

RLS adaptivni filter je korišćen jer konvergira za manje od dvadesetak odbiraka, za razliku od LMS algoritma čije je vrijeme konvergencije za ovakav sistem daleko veće. RLS adaptivni filter je u odnosu na LMS daleko zahtjevniji što se procesorskih resursa tiče, međutim, korišćenjem modernijih mikroprocesora to postaje nebitno. Još jedna prednost RLS adaptivnog filtra je to što on nema potrebe za bilo kakvim podešavanjem parametara pri promjeni upravljanog motora za JSS, što cijeli sistem čini veoma fleksibilnim.

Zadavanje zakona upravljanja je softversko i dato je u obliku proizvoljne matematičke funkcije sa vremenom kao promjenjivom. Podrazumjeva se da pri definisanju te funkcije, moramo voditi računa da ne izvedemo motor iz linearnog režima rada.

4. PRETPOSTAVKE ZA ANALIZU

Pretpostavke za analitičku analizu su da je matematički model motora za JSS sa stalnim magnetima dat sljedećim diferencijalnim jednačinama:

$$U_a = Ri + L \frac{di}{dt} + K_f \omega ; K_f i = E \omega + J \frac{d\omega}{dt} + M_{RM} \quad (1)$$

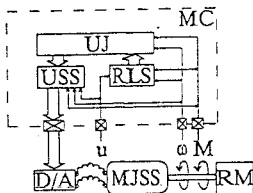
gdje su:

- U_a - napon napajanja
- i - struja rotora
- ω - ugaona brzina obrtanja
- R - otpornost rotora
- L - induktivnost rotora
- K_f - konstanta motora

- B* - koeficijent trenja
J - moment inercije
M_{RM} - moment opterećenja

Pretpostavka za simulacionu analizu je da motor radi u normalnim radnim uslovima. To podrazumeva da motor radi bez preopterećenja, u linearnom režimu, odnosno, da je se ponaša prema matematičkom modelu za koji smo pretpostavili da ga dobro opisuje.

5. ŠEMATSKI PRIKAZ RJEŠENJA



Sl. 1. Šema adaptivnog poziciono brzinskog sistema za upravljanje motorima za JSS

Skraćenice korišćene na šemi su:

- MC - mikrokontroler
 UJ - upravljačka jedinica
 USS - upravljanje u specijalnim slučajevima (preopterećenje itd...)
 RLS - RLS adaptivni filter
 u - napon napajanja motora
 ω - ugaona brzina motora
 M - izmjereni moment opterećenja
 D/A - kontrolisani izvor napona
 MJSS - motor za jednosmjernu struju
 RM - radna mašina

6. ANALITIČKA ANALIZA

Diferencijalne jednačine (1) motora za JSS se prevode u diskretni domen. Transformacija između Z domena i vremenskog domena je data izrazom (2):

$$X(z) \cdot z^{-k} \leftarrow \rightarrow X(n-k) \quad (2)$$

Z-transformacija prvog izvoda je data izrazom:

$$\dot{X}(z) = X(z) \frac{z}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (3)$$

T je period odabiranja napona, momenta i brzine upravljanog motora.

Primjenom Z-transformacije na diferencijalne jednačine motora (1), dobija se diferencna jednačina motora u diskretnom vremenskom obliku:

$$\begin{aligned} \omega(n) = & K_1 U(n) + K_2 U(n-1) + K_3 U(n-2) + \\ & K_4 \omega(n-1) + K_5 \omega(n-2) + K_6 M_{RM}(n) + \\ & K_7 M_{RM}(n-1) + K_8 M_{RM}(n-2) \end{aligned} \quad (4)$$

Koeficijenti *K_i* (*i*=1..8) zavise od konkretnih parametara motora. Iz diferencne jednačine se definišu dvije matrice:

$$K^T(n) = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6 \ K_7 \ K_8]$$

$$W^T(n) = [U(n) \ U(n-1) \ U(n-2) \ \omega(n-1)$$

$$\omega(n-2) \ M_{RM}(n) \ M_{RM}(n-1) \ M_{RM}(n-2)] \quad (5)$$

Diferencna jednačina sada može biti zapisana u matricnom obliku kao:

$$\omega(n) = K^T(n)W(n) \quad (6)$$

Ovakav oblik diferencne jednačine motora je pogodan da se na njega primjeni RLS adaptivni algoritam. On je dat sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} K_{RLS}(n+1) &= K_{RLS}(n) + \\ & G(n)P(n)W(n+1)[\omega(n+1) - W^T(n+1)K_{RLS}(n)] \\ P(n+1) &= [P(n) - G(n)P(n)W(n+1)W^T(n+1)P(n)]\sigma^{-1} \\ G(n) &= [W^T(n+1)P(n)W(n+1) + \sigma]^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Početne vrijednosti za RLS algoritam su:

$$\begin{aligned} P(0) &= \frac{1}{e} I, \quad e \rightarrow 0 \\ \sigma &= 0.9 \\ K_{RLS}^T(0) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (8)$$

U prethodnoj jednačini, *I* je jedinična matrica koja je u konkretnom slučaju ima dimenzije 8x8.

Poslije 5 - 20 iteracija, matrica *K_{RLS}* postiže tačne vrijednosti matrice *K*. Korišćeni identifikovane vrijednosti koeficijenata *K_i*, (*i*=1..8), iz diferencne jednačine motora, izvodi se zakon upravljanja:

$$\begin{aligned} U_N(n) &= \frac{1}{K_1} [\omega_2(n) - [K_2 U(n-1) + K_3 U(n-2) + \\ & K_4 \omega(n-1) + K_5 \omega(n-2) + K_6 M_{RM}(n) + \\ & K_7 M_{RM}(n-1) + K_8 M_{RM}(n-2)]] \end{aligned} \quad (9)$$

gdje je $\omega_2(n)$ zadata ugaona brzina koju motor treba da postigne napajan naponom *U_N(n)*.

Vrijednosti napona, momenta opterećenja i ugaone brzine se mjere na motoru.

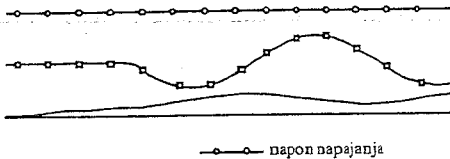
U slučaju da dođe do promjene parametara motora, RLS algoritam vrši korekciju diferencne jednačine, a samim tim vrši adaptaciju zakona upravljanja.

Softverska razlika između ovog sistema i sistema koji bi služili za upravljanje drugim vrstama motora za JSS, čije se ponašanje može opisati diferencnom jednačinom, je samo u dubini RLS adaptivnog filtra. Fleksibilnost po tom pitanju se lako postiže uzimanjem veće dubine RLS filtra, bez obzira dali je to za konkretan slučaj potrebno.

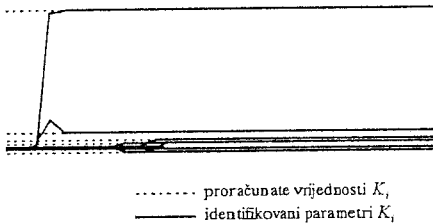
7. SIMULACIONA ANALIZA

Kao referentni ulaz, odnosno kriva brzine motora, u procesu upravljanja, može se uzeti proizvoljna matematička funkcija sa vremenom kao promjenjivom. Za precizno upravljanje je potrebno da ta funkcija ne izvede motor iz normalnog radnog režima. Za simulacionu i implementacionu analizu u ovom radu je korišćena funkcija "podignuti kosinus", zbog njene česte primjene u robotici.

Simulaciona analiza je zasnovana na realnim parametrima motora za JSS sa stalnim magnetima snage 10W. Učestanost odabiranja je 50Hz. Broj odbiraka pri obuci sistema u toku normalnog radnog procesa je manji od 100. Parametri RLS algoritma postizu stabilna stanja najčešće poslije 5-20 odbiraka. Jedan proces obuke sistema u trajanju od 40 odbiraka je prikazan na slikama 2. i 3.

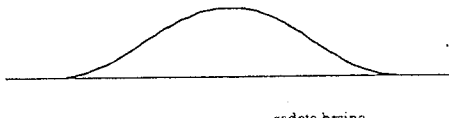


Sl. 2. Grafici momenta opterećenja, napona napajanja i postignute brzine u toku identifikacije sistema

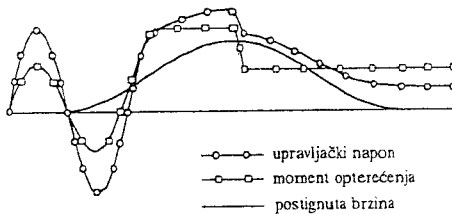


Sl. 3. Grafici koeficijenta diferencne jednačine motora u toku procesa identifikacije

Jedan prikaz rada sistema poslije procesa identifikacije, dat je na slikama 4. i 5. Broj odbiraka u toku kojih se vrši upravljanje, nad matematičkim modelom motora za JSS sa stalnim magnetima, je 1000.



Sl. 4. Grafik zadate brzine



Sl. 5. Grafici momenta opterećenja, zadatog napona i postignute brzine

Sa ovih grafika se vidi da motor precizno prati krivu zadate brzine bez obzira na promjene momenta radne mašine.

Greška brzine matematičkog modela motora je manja od 0,01%, što se može zanemariti uzimajući u obzir namjenu analiziranog sistema.

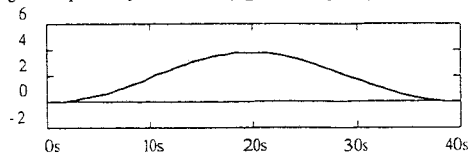
8. IMPLEMENTACIONA ANALIZA

Implementaciona analiza je podrazumjevala realizaciju softverskih i hardverskih resursa upravljačkog sistema i provjeru njegovog rada u praksi.

Za hardverski dio je iskorišćen IBM kompatibilan PC računar sa procesorom Intel 80386. Ugaona brzina motora je mjerena inkrementalnim davačem pozicije rotora koji je učitan svakih 20ms. Korišćeni su digitalni mjeraci postignutog momenta na osovinu i napona napajanja. Svi korišćeni D/A i A/D konvertori su osmobiitni. Učestanost odabiranja i zadavanja napona je od 50Hz naviše. Upravljanje se vrši nad motorom za JSS sa stalnim magnetima, snage 10W. Početna identifikacija sistema se može raditi na isti način kao i za simulacionu analizu. Takođe se sistem može obučavati na snimcima normalnog radnog procesa motora, a poslije procesa identifikacije, sistem bi preuzimao upravljanje. Zbog sporopromjenjive prirode parametara motora, u toku upravljanja, svakih 5 sekundi, vrši se reidentifikacija da bi se omogućilo adaptiranje na njihove eventualne promjene.

U softver je ugrađena podrška za upravljanje svim motorima za JSS, koji se mogu opisati diferencnim jednačinama, na taj način što je dubina adaptivnog RLS algoritma povećana na 10.

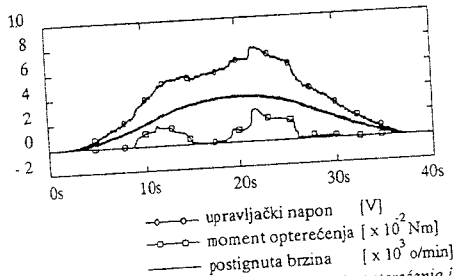
Zbog male preciznosti korišćenih A/D i D/A konvertora, u naponu napajanja se javlja oscilatorna komponenta na učestanosti koja je dvaput manja od učestanosti odabiranja. Ovaj problem je prevažidjen softverski, ugrađnjom limitera priraštaja napona napajanja. U slučaju da je prvi izvod napona napajanja manji nego što je potrebno za postizanje zakona upravljanja, moguće je povećati frekvenciju odabiranja i zadavanja napona, a samim tim i njegov priraštaj u vremenu ili povećati dozvoljeni priraštaj definisan u limiteru napona. Prvi slučaj je precizniji ali i zahtjevniji što se hardverskih resursa tiče. U drugom slučaju je potrebno poslije dostizanja zadate brzine, smanjiti granicu priraštaja da bi se izbjegle oscilacije napona.



Sl. 6. Zadata brzina koju motor treba da postigne

Na slici 6. je dat prikaz zadate brzine koju motor treba da prati poslije procesa početne identifikacije koji se odvija u toku normalnog radnog režima motora. Definisana je identična funkcija kao i za simulacionu analizu. Na slici 7. su dati rezultati rada realizovanog upravljačkog sistema.

Postignuta brzina odstupa od zadate za 1 kvant brzine, pošto se koriste digitalni mjerni i napojni uređaji. Eliminacija akumuliranja greške za poziciju se postiže korekcijom zakona zadavanja brzine u toku procesa upravljanja. Pozicioniranje se postiže sa greškom od 1 kvanta njerene pozicije rotora.



Sl. 7. Snimci upravljačkog napona, momenta opterećenja i postignute brzine

Rezultati rada upravljačkog sistema se poklapaju sa rezultatima simulacione analize.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu je kroz simulacionu i implementacionu analizu sistema za adaptivno upravljanje motorom za JSS sa stalnim magnetima, pokazano da se pomoću jednostavnog softvera i hardvera može realizovati precizno brzinsko - poziciono upravljanje. Softversko zadavanje zakona upravljanja i fleksibilnost po pitanju upravljanih motora za JSS i jednostavnost hardvera, čine ovakav sistem veoma interesantnim iz aplikativnih i ekonomskih razloga.

Moguća primjena ovakvog sistema bi bila u robotici, elektro-mašinskim uređajima sa promjenjivom geometrijom, elektromotornim pogonskim uređajima sa vremenski promjenjivim parametrima itd.

Bilo bi interesantno realizovati sličan sistem za upravljanje asinhronim motorima.

10. REFERENCE

- [1] H., Le-Huy, "Microprocessors and Digital IC's for Motion Control", *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, No. 8, Aug. 1994.
- [2] B., Widrow, S., Stearns, "Adaptive Signal Processing", *Prentice Hall*, 1986.
- [3] A., Bruckwede, "Microprocessor-Based Adaptive Speed and Position Control for Electrical Drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-21, No. 5, Sep/Oct 1985.
- [4] D., Taylor, "Nonlinear Control of Electric Machines: An Overview", *IEEE Control Systems*, pp. 41-48., Dec. 1994.

Abstract - This paper presents microprocessor-based adaptive speed and position control system for direct current motor. The recursive least squares adaptive algorithm is used for on-line identifications of a driven motor. Calculated difference equation, measured value of speed and torque, given laws of changing speed and software limiter of rise of voltage are used to define supplied voltage. The proposed control scheme was implemented on microprocessor system and was applied to control a direct current motor with permanent magnets. Simulational and experimental results are presented.

ADAPTIVE SPEED AND POSITION CONTROL SYSTEM FOR DIRECT CURRENT MOTORS

Milutin Ostojić, Boris Marković