Mr Branko Đedović,
major, dipl. inž.

Mikroračunarska implementacija digitalnog regulatora pozicionog sistema automatskog upravljanja rotacijom

U radu je obrađen problem mikroračunske implementacije digitalnog regulatora sistema automatskog upravljanja obrtnim masama velikog momenta inercije. Definisana je analogna shema upravljanja i projektovan digitalni model sistema. Posebna pažnja posvećena je analizi efekta dužine reči, kvantovanja analognog signala i brzine rada mikroprocesora na performanse sistema. Formiran je opštevažeći kriterijum o generalnoj formulaciji primenljivosti diskretnog regulatora.

Uvod

U savremenim tehničkim sredstvima javljaju se sistemi, odnosno elementi sistema, koji se mogu predstaviti u obliku dve obrtne mase velikih momenta inercije, jedne koja se obrće u horizontalnoj ravni i druge zgloбно vezane za prethodnu, koja se obrće u vertikalnoj ravni. Pri funkcionisanju ovako koncipiranog sistema postavlja se zadatak ostvarivanja preciznog ugao-nog položaja jedne i druge obrtne mase uz maksimalnu brzohodnost i minimalno vreme smirenja, što zahteva automatsko upravljanje obrtanjem ovih masa.

Postavljeni zadaci nameću primenu hidraulike u sistemu automatskog upravljanja. Međutim, s obzirom na današnji stepen razvoja tehnike sa sigurnošću se može tvrditi da simbioza mikroelektronike i hidraulike predstavlja najefikasniji način korišćenja prednosti koje poseduju hidraulični sistemi.

Ovaj rad ima za cilj da koncipira i izvrši analizu elektrohidrauličnog sistema upravljanja na bazi mikroračunara, razmatrajući prednosti i nedostatke ovakvog upravljanja uz programiranje algoritma, razmatranje uticaja konačne dužine reči i numeričkih grešaka na dinamiku regulacije.

Analogna shema upravljanja

Elektrohidraulični servosistemi kao podsistemi automatskog upravljanja (numerički upravljane alatne mašine, valjaonice čelika, radarske antene, i dr.), u novije vreme imaju sve veću primenu u upravljanju pozicijom i brzinom obrtanja masa velikog momenta inercije.

Posebnu prednost ovim sistemima dala je simbioza hidrauličkih i elektoničkih, odnosno mikroelektoničkih komponenata, gde se električnim signalom snage hiljaditog dela vata na ulazu upravlja snagama na izlazu i do više stotina kilovata.

Kao ulazni signali od posebnog su interesa za ovaj rad signali koji se dobijaju na izlazu savremenih mikroračunara u kojima se vrši brza i tačna obrada upravljačkih signala i podataka po zadanom programu, odnosno na osnovu podataka koji dolaze iz sistema za prikupljanje informacija.

Elektrohidraulični sistem automatskog upravljanja obrtnim masama koncipiran je složeni sistem sastavljen od tri podsistema:

- upravljački podsistem;
- podsistem za upravljanje u horizontalnoj ravni;
- podsistem za upravljanje u vertikalnoj ravni.

Upravljački podsistem koncipiran je tako da omogućuje pravovremeno, precizno i tačno dobijanje upravljačkog signala na izlazu iz mikroračunara kojim se utiče na izvršni deo sistema automatskog upravljanja po horizontali i vertikali.

Upravljački podsistem sačinjavaju:

- informacioni sistem;
- upravljački blok operatora;
- mikroračunar sa interfejsima, A/D i D/A konvertorima;
- elektronski pojačavač signala;
- davači informacija povratnih sprega.

Podsistem za upravljanje u horizontalnoj ravni je izvršni deo složenog sistema automatskog upravljanja, koji omogućuje da objekt upravljanja tačno i brzo prati upravljački signal.

Osnovne komponente podsistema upravljanja u horizontalnoj ravni su:

- elektronsko pojačalo signala sa izvorom električne energije;
- elektrohidraulični dvostepeni servorazvodnik sa izvorom hidraulične energije;
- hidromotor;
- reduktor.

Podsistem za upravljanje u vertikalnoj ravni sačinjavaju:

- elektronsko pojačalo signala;
- elektrohidraulični dvostepeni servorazvodnik;
- hidrocilindar.

Analiza i sinteza podsistema upravljanja obrtnim masama u horizontalnoj i vertikalnoj ravni je u potpunosti analogna, te je u radu razmatrano upravljanje u jednoj (horizontalnoj) ravni.

Sl. 1 — Principijelna shema elektrohidrauličnog sistema automatskog upravljanja

Sl. 2 — Blok-dijagram elektrohidrauličnog sistema upravljanja u horizontalnoj ravni

Principijelna shema elektrohidrauličkog sistema automatskog upravljanja obrtnim masama izgleda kao na slici 1.

Matematički opisujući karakteristike komponenata, odnosno dinamički proces sistema upravljanja, koristeći njihove prenosne funkcije, sledi blok-dijagram sistema upravljanja u horizontalnoj ravni koji je prikazan na slici 2.

gde su:

- R — digitalni regulator,
- K_A — faktor pojačanja elektronskog pojačala,
- T_1 — vremenska konstanta hidrauličnog pojačala,
- K_Q — faktor pojačanja protoka hidromotora,
- q_{rm} — specifični protok hidromotora,
- ω — prirodna kružna frekvenca,
- ζ — koeficijent prigušenja,
- k_{tg} — koeficijent tahogeneratora,
- k_p — koeficijent potenciometra.

Polazna veličina od koje se krenulo u statički i dinamički proračun si-

stema upravljanja je moment inercije obrtne mase u horizontalnoj ravni $J_m = 8300 \text{ kgm}^2$.

Nakon statičkog proračuna i izbora hidrauličkih komponenata sledi blok-dijagram sistema upravljanja koji je prikazan na slici 3.

Digitalni model sistema

U projektovanom sistemu automatskog upravljanja primenjen je digitalni regulator, koji je u poređenju sa analognim regulatorom fleksibilniji, jer, zahvaljujući programabilnosti, omogućuje prilagođavanje regulatora karakteristikama objekta i zahtevima upravljanja bez izmene fizičke realizacije.

Primenom ekstrapolatora nultog reda sledi blok-dijagram digitalnog sistema automatskog upravljanja, prikazan na slici 4.

Primenom x transformacije, uz korišćenje bilinearne transformacije, na prenosnu funkciju koja opisuje proces rotacije obrtne mase sledi sinteza digitalnog sistema upravljanja.

Sl. 3 — Blok-dijagram elektrohidrauličnog sistema upravljanja

Sl. 4 — Blok dijagram digitalnog sistema automatskog upravljanja

Prenosna funkcija otvorenog sistema bez korekcije data je relacijom:

$$G_{ho}G_{pr(w)} = 3,32 \frac{(0,664w-1)(1,444w+1)(1,585+1)}{(w+1)(w+1)(w+1)} \quad (1)$$

Posmatrajući prenosnu funkciju datu relacijom (1), uočava se da su sva tri pola u levoj poluravni w ravni, dok se jedna nula nalazi u desnoj poluravni w ravni, te pripada nestabilnom području.

Konstruišući logaritamske karakteristike $G_{ho}G_{pr(w)}$, uočava se zavisnost amplitude i faze od ω_w . Analizom ovih karakteristika određuju se pokazatelji kvaliteta nekorigovanog sistema: rezerva po modulu, rezerva po fazi, pojas propuštanja, rezonantni vrh i rezonantna frekvenca prelaznog režima.

Logaritamska karakteristika sistema upravljanja data je na slici 5.

relacijom (1), sledi prenosna funkcija digitalnog regulatora sledećeg oblika:

$$G_r(w) = \frac{k}{(aw-1)(bw+1)} \quad (2)$$

Na osnovu prelomnih frekvenca amplitudne karakteristike nekorigovanog sistema i njihovog međusobnog odnosa sa koeficijentima a i b sledi: $a = 0,664$ i $b = 0,143$.

Odziv digitalnog sistema upravljanja na jediničnu odskočnu funkciju za vrednost faktora pojačanja $K_A = 2, 4, 8$ i 12 pokazan je na slici 6.

Odskočni odziv sistema za faktor pojačanja $K_A = 2$ izdvojeno je pokazan na slici 7. Analizom ovog dijagrama uočava se da je greška ustaljenog stanja

Sl. 5 — Logaritamska frekventna karakteristika digitalnog sistema automatskog upravljanja
1) bez korekcije, 2) sa korekcijom

Kako za vrednost $K_A = 2$ sistem bez korekcije nema željenu stabilnost, to u odnosu na prenosnu funkciju, datu

$e = 40\%$, što ne odgovara projektnim zahtevima. Greška ustaljenog stanja je posledica neusklađenog skaliranja od-

Sl. 6 — Odziv digitalnog sistema na jediničnu odskočnu funkciju za $K_A=2, 4, 8, 12$

nosa ulazne promenljive i izlaza i otklanja se uvođenjem linearnog pojačanja u sistem. Da bi se dobila željena vrednost $e = 2\%$, analizom se dolazi do zaključka da ovoj korekciji odgovara pojačanje $K = 1,6024$.

Sl. 7 — Odskočni odziv digitalnog sistema za faktor pojačanja $K_A=2$

Odskočni odziv sistema za $K_A = 2$ sa unetom korekcijom pojačanja $K = 1,6024$ pokazan je na slici 8.

Analizom dijagrama odziva sistema na jediničnu odskočnu funkciju, koji je

prikazan na slici 8, slede performanse sistema:

- vreme uspona $T_u = 0,38$ s,
- vreme smirenja za grešku ustaljenog stanja datu projektnim zahtevima $e = 2\%$, $T_s = 1,2$ s,
- preskok sistema, $M_p = 1,14$,
- predominantna vremenska konstanta sistema, $T_d = 0,25$ s,
- vreme kašnjenja, $T_k = 0,04$ s.

Sl. 8 — Odskočni odziv digitalnog sistema za faktor pojačanja $K_A=2$, sa uvedenom korekcijom pojačanja $K=1,6024$

Jedinični impulsni odziv digitalnog sistema izgleda kao na slici 9.

Sl. 9 — Jedinični impulsni odziv digitalnog sistema automatskog upravljanja

Mikroračunarska implementacija izabrane digitalne strukture

Upravljački podsistem sistema upravljanja obrtnim masama sačinjava mikroračunar koji istovremeno obavlja funkciju digitalnog regulatora.

Upravljanje obrtnim masama primenom mikroprocesora ostvaruje se unošenjem u memoriju mikroprocesorskog sistema programa algoritma rada, odnosno korekcije položaja objekta u-

Na osnovu izraza (2), korišćenjem bilinearne transformacije sledi prenosna funkcija regulatora, realizovana na mikroračunaru rednim programiranjem, data relacijom:

$$G_r(z) = \frac{1+z^{-1}}{(1+4,95z^{-1})} \cdot \frac{(-0,38)}{(1+0,75z^{-1})} \quad (3)$$

Kaskadnom realizacijom digitalnog regulatora sledi:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} 4,95 & 0 \\ -3,95 & -0,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} -0,38 \\ -0,38 \end{bmatrix} e_i^*(t) \quad (4)$$

$$e_i^*(t) = -3,95 \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} -0,38 \\ -0,38 \end{bmatrix} e_i^*(t).$$

pravljanja u odnosu na željenu poziciju.

Blok-dijagram regulatora na osnovu izraza (3) dat je na slici 10.

Sl. 10 — Blok-dijagram regulatora

Jedan od najjačih programskih kvaliteta mikroprocesora je mogućnost donošenja odluke o toku daljeg odvijanja programa. Kako su programom uneseni matematički algoritmi svih mogućih situacija u kojima se može naći proces u svom odvijanju, to je mikroprocesor u stanju da donosi odluku na osnovu koje izračunava korekciju i ostvaruje potpunu kontrolu nad procesom.

U upravljanju procesom rotacije zahteva se obrada signala u realnom vremenu, zato je brzina realizovanja programa korekcije kritična komponenta, te upotreba mikroprocesora ima poseban značaj.

Programiranje regulatora

Mikroprocesori u tehnologiji CMOS našli su primenu u različitim sistemima konstruktivno udovoljavajući strogim zahtevima, te je u radu programiranje regulatora izvedeno na bazi procesora COSMAC CDP 1802, proizvođača RCA.

Inverznom transformacijom prenosne funkcije regulatora $G_r(z) = E_2(z)/E_1(z)$ sledi:

$$e_2(kT) = -0,38e_1(kT) - 0,38e_1(k-1)T - 5,7e_2(k-1)T + 3,7e_2(k-2)T. \quad (5)$$

Korekcija se izvodi na osnovu programa datog nizom naredbi:

```

0000  NAM      KOREKCIJA UPRAVLJANJA PROCESOM ROTACIJE
0010  INP  1    UVESTI E1 (KT) NA ULAZNI UREĐAJ 1
0020  LDN  R3    SPREMI E1 (KT) U AKUMULATOR D
0030  LDA  N     SPREMI (-0,38) U REGISTAR N
0040  SEP  R8    IZRAČUNAJ (-0,38)*E1KT
0050  LDN  D     SPREMI REZULTAT U AKUMULATOR D
0060  LDN  P     SPREMI E1 (K-1) T U REGISTAR P
0070  SEP  R9    IZRAČUNAJ (-0,38)*E1 (K-1) T
0080  LDN  Ro    SPREMI REZULTAT U REGISTAR Ro
0090  ADD  R1    IZRAČUNAJ (-0,38)*E1 (KT) -0,38*E1 (K-1) T
0100  LDN  R0    SPREMI REZULTAT U REGISTAR R1
0110  LDN  B4    SPREMI E2 (K-1) T U AKUMULATOR D
0120  LDX  R2    SPREMI (-5,7) U REGISTAR R2
0130  SEP  R10   IZRAČUNAJ (-5,7)*E2 (K-1) T
0140  LDN  D     SPREMI REZULTAT U AKUMULATOR D
0150  SM   R6    IZRAČUNAJ (-0,38)*E1 (KT) -0,38*E1 (K-1) T -5,7*E2 (K-1) T
0160  LDX  R2    SPREMI REZULTAT U REGISTAR R2
0170  LDN  N     SPREMI E2 (K-2) T U REGISTAR N
0180  LDA  R7    SPREMI 3,7 U AKUMULATOR D
0190  SEP  R11   IZRAČUNAJ 3,7*E2 (K-2)T
0200  LDX  D     SPREMI REZULTAT U AKUMULATOR D
0210  SM   R8    IZRAČUNAJ -0,38*E1 (KT) -0,38*E1 (K-1) T -5,7*E2 (K-1) T +
      + 3,7*E2 (K-2)T
0220  OUT  6     PRENESI SADRŽAJ IZLAZNOM UREĐAJU 6
      END.

```

Analiza utjecaja koeficijenata greške na dinamiku regulacije

Mikroračunarska implementacija digitalnog regulatora uslovljena je uticajem konačne dužine REČI i brzine rada mikroračunara, kao faktorima od bitnog značaja za dinamiku regulacije procesa u realnom vremenu. Konačna dužina reči i AD konverzija podataka pri realizaciji programa regulatora za posledicu imaju greške uzrokovane skraćivanjem i zaokruživanjem podataka.

Veličina greške nastale skraćivanjem podataka računa se relacijom:

$$\varepsilon_T = Q_T(x) - x, \quad (6)$$

gde je:

$Q_T(x)$ — realna vrednost podatka,
 x — skraćena vrednost podatka.

Veličina greške nastale zaokruživanjem podatka računa se relacijom:

$$\varepsilon_R = Q_R(x) - x, \quad (7)$$

gde je:

$Q_R(x)$ — realna vrednost podatka,
 x — zaokružena vrednost podatka.

Za primenjeni 8-bitni mikroprocesor slede koeficijenti greške:

$$\begin{aligned} 0 &\geq \varepsilon_T > -2^{-8} & \text{za } x > 0 \\ 0 &\leq \varepsilon_T < 2^{-8} & \text{za } x < 0, \end{aligned} \quad (8)$$

odnosno

$$\frac{-2^{-8}}{2} \leq \varepsilon_R \leq \frac{2^{-8}}{2} \quad (9)$$

Greška kvantovanja uzrokuje određenu veličinu greške na izlazu iz re-

gulatora, definisanu statističkim parametrima $\bar{u}$ i σ_u . Proučavanjem ovih parametara saznaje se da li algoritam upravljanja multiplicira ili slabi šum kvantovanja. Na osnovu zakonitosti matematičke statistike sledi:

$$\bar{u} = \bar{\varepsilon} \sum_{k=0}^{\infty} h_k, \quad (10)$$

gde je h_k impulsni odziv, a ε je ulazni signal okarakterizovan sa ε i σ_ε .

Disperzija slučajne promenljive data je relacijom:

$$\delta_u^2 = \delta_\varepsilon^2 \sum_{k=0}^1 [h_k]^2. \quad (11)$$

Veličine $\bar{u}$ i δ_u^2 računaju se za svaki čvor posebno, a ukupna vrednost jednaka je sumi, odnosno

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + 2\bar{u}_2 + \bar{u}_3 = \frac{4}{(1+\beta_1)(1+\beta_2)} = 0,38\varepsilon. \quad (12)$$

$$\delta_u^2 = \delta_\varepsilon^2 \frac{4}{(\beta_1 - \beta_2(1 - \beta_1\beta_2)) \left[\frac{\beta_1}{1 + \beta_1^2} - \frac{\beta_2}{1 + \beta_2^2} \right]} = -0,04\delta_\varepsilon^2. \quad (13)$$

Digitalna dužina reči $C+1$, definisana je dinamičkim rangom analognog

signala i šumom kvantovanja pri ADC i data relacijom:

$$C = \log_2 \frac{e_{\max}}{e_{\min}} \quad (14)$$

što u datom primeru iznosi $C \geq 8$ bita.

Program digitalnog regulatora, dat relacijom (5), realizuje se u 100 naredbi, što je 1,5 ms i predstavlja vreme kašnjenja.

Zaključak

Na temelju analize realizacije digitalnog regulatora na bazi mikroračunara uočavaju se kao prednosti: velika fleksibilnost u realizaciji korekcionog elementa, prilagodljivost i mogućnost proširenja zasnovana na programabilnosti, pouzdan rad i visok nivo automatizacije u upravljanju procesom. Kao negativne strane primene ističu se: rad s ograničenom dužinom reči i multipliciranje greške nastale kvantovanjem analognog signala. Svi navedeni nedostaci se daljim razvojem mikroračunara postepeno eliminišu i već danas, primenom računara pete generacije, postaju nezamenljivi u upravljanju procesima.

Literatura:

- [1] Abdull, R. i Ciner, P., Elektrohídraulíčki servosistemi, Zagreb, 1985.
- [2] Besekerski, V. A. i Izrancev, V. V., Sistemi avtomatičeskovo upravljenja s mikro EVM, Moskva, 1987.
- [3] Kvakernak, H. i Sivan, R., Linear Optimal Control Systems, J. Wiley, 1972.
- [4] Matko, D., Diskretni regulacijski sistemi, Ljubljana, 1984.
- [5] Ribarić, S. Arhitektura mikroprocesora, Zagreb, 1985.
- [6] Specshart, F. H. i Green, W. L., A GUIDE TO USING CSMP — The Continuous System Modeling Program, Englewood Cliffs 1976.
- [7] Tou, T. J., Digital and Sampled-data Control Systems, Mc Graw-Hill, 1959.
- [8] Tokheim, R. L., Theory and problems of Microprocessor Fundamentals, McGraw-Hill, 1983.
- [9] Grujić, Ž., Hidraulički servosistemi, Zagreb, 1987.