

A. Zdravković⁺
 V. Cvetković⁺
 B. Hadžibabić⁺
 B. Kovačević⁺⁺

DIGITALNI UREDJAJ ZA SIMULACIJU KONTINUALNIH
 PROCESA U REALNOM VREMENU

REAL-TIME DIGITAL SIMULATION OF CONTINUOUS
 PROCESSES

SADRŽAJ - U radu je dat opis realizacije digitalnog simulatora procesa baziranog na osmobarbitnom mikroprocesoru 8085. Simuliraju se procesi koje je moguće opisati funkcijom prenosa četvrtog ili nižeg reda. Za numeričko rešavanje sistema diferencijalnih jednačina u realnom vremenu koristi se Euler-ova metoda. Simulator omogućava analizu rada regulatora i implementiranih algoritama, kao i posmatranje odziva simuliranog sistema na standardne eksitacije.

ABSTRACT - The paper presents the realization of the digital process simulator based on the eight bit up 8085. Processes that are simulated can be described by the fourth and lower order transfer function. Euler method is used for the real-time numerical integration of the system of the differential equations. Usage of the simulator provides for the analysis of a regulator operation and of an implemented algorithm, as well as observations of the simulated system response on the standard excitations.

1. UVOD

Jedan od velikih problema u projektovanju i realizaciji upravljanja industrijskim sistemima je ograničena mogućnost testiranja upravljanja na realnom objektu. Simulator procesa omogućava da razvijamo i testiramo upravljanje i pre nego što je proces postavljen, odnosno bez intervencija na proizvodnom procesu koji je u toku. Korišćenje simulatora nam daje široke mogućnosti testiranja režima rada koji bi mogli da dovedu do oštećenja realnog objekta.

U ove svrhe se uglavnom koriste analogni simulatori. Ovi simulatori imaju unapred definisan skup parametara funkcija prenosa koje mogu realizovati. Simulator opisan u radu je realizovan na bazi mikroprocesora i AD/DA konvertora. Digitalna realizacija omogućava proizvoljno zadavanje parametara, a korišćenje AD/DA konvertora simulaciju kontinualnih sistema. Vrednosti ulaza/izlaza za vreme simulacije se prikazuju na kolorgrafičkom terminalu i memorišu.

⁺ IGA Institut za nove tehnologije, Beograd

⁺⁺ Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Rad je podeljen u četiri dela. U prvom delu je data metodologija modeliranja linearnih kontinualnih sistema i algoritam numeričkog rešavanja sistema diferencijalnih jednačina dobijenog preko funkcije prenosa. U drugom delu je opisana hardverska realizacija simulatora. Treći deo sadrži opis strukture programske podrške. Način korišćenja simulatora ilustrovan je kroz primere u četvrtom delu.

2. MODEL PROCESA I KORIŠĆENI ALGORITAM

Dinamičke karakteristike mnogih industrijskih procesa mogu se aproksimirati funkcijom prenosa prvog ili drugog reda sa realnim polovima i transponiranim kašnjenjem [1,2,3]. Imajući u vidu zahteve za što tačnijim modelom i ograničenja koja nameće realizacija algoritma u realnom vremenu, usvojeno je da maksimalan red funkcije prenosa bude četiri, pri čemu polovi funkcije prenosa mogu biti kompleksni.

Funkcija prenosa četvrtog reda sa kašnjenjem može se predstaviti u razvijenom obliku:

$$G_p^4(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-ws}}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

gde su $Y(s)$ i $U(s)$ Laplasova transformacija izlaza i ulaza sistema, respektivno.

Član koji opisuje vremensko kašnjenje e^{-ws} se ostvaruje nezavisno od prenosne funkcije tako što se upravljačka promenljiva $u(t)$ memoriše, da bi postala aktivna tek u trenutku $t + w$.

Izbor promenljivih stanja i svodjenje modela na normalnu formu izvršen je prema algoritmu predloženom u [4]. Na ovaj način se dobija:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -a_0 x_1 - a_1 x_2 - a_2 x_3 - a_3 x_4 + Ku \end{aligned} \quad (2)$$

Sistem (1) obuhvata i poseban slučaj sistema sa astatizmom.* Funkcije prenosa nižeg reda mogu se predstaviti normalnim formama sistema diferencijalnih jednačina.

* Funkcija prenosa sistema sa astatizmom prvog reda može se predstaviti koristeći (1) i stavljajući $a_0 = 0$. Ovo se analogno primenjuje i za astatizme višeg reda.

jalnih jednačina, koje su posebni slučajevi (2).⁺

Za rešavanje sistema (2) primenjena je numerička metoda Euler-a prema algoritmu :

$$\begin{aligned}
 x_1((k+1)T) &= x_1(kT) + h x_2(kT) \\
 x_2((k+1)T) &= x_2(kT) + h x_3(kT) \\
 x_3((k+1)T) &= x_3(kT) + h x_4(kT) \\
 x_4((k+1)T) &= x_4(kT) + h (a_0 x_1(kT) + a_1 x_2(kT) + a_2 x_3(kT) + \\
 &\quad + a_3 x_4(kT) - K u(kT))
 \end{aligned} \tag{3}$$

sa korakom $h = 0.04$ s.

3. HARDVERSKA REALIZACIJA

Hardverska struktura simulatora prikazana je na slici 1.

Isprekidanom linijom je označen način priključivanja regulatora koji se ispituje na simulatoru.

Kao A/D konvertor korišćen je standardni⁺⁺ analogni ulazni modul. Od opcionih strujnih i naponskih ulaza izabran je naponski ulaz (-10V + 10V). Izabrani modul podržava osmootnu konverziju i trajanje konverzije je 100 μ s.

Za D/A konverziju koristi se standardni analogni izlazni modul devetobitne konverzije (8 bita i bit znaka). Ovaj modul je podešen za rad sa naponskim signalima (-10V + 10V).

Kao procesni računar koristi se standardna konfiguracija μ R LOLA 8 kome je dodato još 6 Kbyte ROM-a u kome se nalaze programi koji podržavaju simulator procesa. Izlazna jedinica računara je televizor.

Kolorgrafički modul služi kao jedinica za on-line prikazivanje ulaza $u(t)$ i izračunatog izlaza $y(t)$. Rezolucija ovog modula je 512·512 tačaka pri čemu svaka tačka može imati jednu od 8 boja. Na RGB monitoru se $u(t)$ i $y(t)$

⁺ Funkcija prenosa trećeg reda se može predstaviti u razvijenom obliku:

$$G_p^3(s) = \frac{K}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

koji se preslikava u sledeću normalnu formu diferencijalnih jednačina:

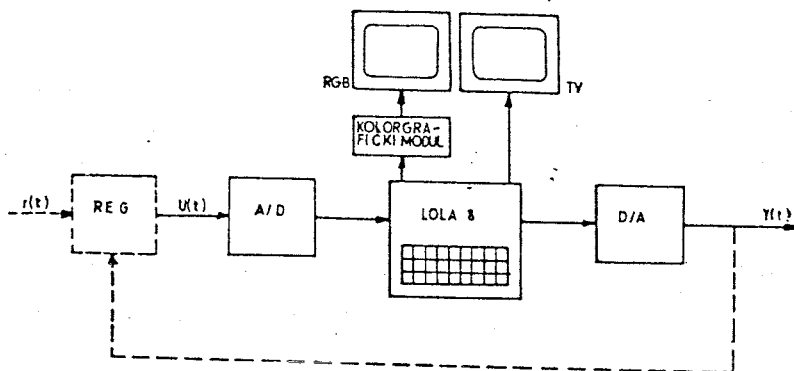
$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= x_3 \\
 \dot{x}_3 &= -a_0 x_1 - a_1 x_2 - a_2 x_3 + K u
 \end{aligned}$$

Korišćenjem druge, treće i četvrte jednačine iz (2) i stavljajući:

$$x_1 \rightarrow x_2, x_2 \rightarrow x_3, x_3 \rightarrow x_4, 0 \rightarrow a_0, a_0 \rightarrow a_1, a_1 \rightarrow a_2 \text{ i } a_2 \rightarrow a_3$$

iz (2) dobijamo normalnu formu funkcije prenosa trećeg reda.

⁺⁺ Pri ovome se misli na standardni IIR modul.



Sl. 1 Hardverska struktura simulatora

prikazuju različitim bojama. Ovaj modul memoriše i prikazuje stanje sistema od početka simulacije. Memorisani i prikazani podaci se mogu koristiti za off-line obrade.

Korak numeričke metode rešavanja sistema diferencijalnih jednačina je 40 ms^* i on se dobija odbrojavanjem časovnika realnog vremena μR LOLA 8 (20 ms).

4. STRUKTURA SOFTVERSKE PODRŠKE

Sa gledišta korisnika simulator ima tri režima rada i to:

- režim zadavanja funkcije prenosa
- režim testiranja
- režim simulacije

Režim zadavanja funkcije prenosa

Od korisnika se traži zadavanje reda sistema n , reda astatizma p i broja parova konjugovano kompleksnih polova m . Maksimalan red sistema je $n = 4$. Ograničenja nametnuta prirodom problema su $n \geq p$ i $m \leq \frac{(n-p)}{2}$.

Ako su podaci n , p i m ispravno uneti, zahteva se unošenje parametara funkcije prenosa definisane sa n , p i m . Realni polovi definišu se vrednošću pola, a konjugovano kompleksni polovi se definišu u parovima preko neprigušene

* Vrednost koraka je uslovičena vremenom izvršavanja softverski realizovane aritmetike sa pokretnim zarezom i eksternim taktom procesora (4 Mhz).

prirodne učestanosti i faktora relativnog prigušenja. Po učitavanju polova funkcije prenosa ispisuje se izračunati slobodni član a_0 i zahteva učitavanje konstante pojačanja K. Potom se učitava i vreme transportnog kašnjenja u se- kundama i traži odluka o izboru sledećeg režima rada.

Interaktivni režim rada ilustrovan je na slici 2.

| | | |
|---|---------------|------------------------------------|
| SIMULATOR PROCESA | ILR | P1 = -1? N |
| M-RED SISTEMA | LOLA RACUNARI | PJ = -2 |
| P-RED ASTATIZNA | | P2 = -2.5? Y |
| TD-VREMENSKO KASNJENJE (SEC) | | KONJUGOVANO KOMPLEKSNI PAR |
| M=1,2,3,4 | MAX(P1)=M | NPV = 1? Y |
| MINIMALNA VREMENSKA KONSTANTA = 0.4 SEC | | FRP = .18 |
| P1,P2,P3,P4 -REALNI POLOVI | | DOSTIŽEN JE SLOBODNI ČLAN = 5.000 |
| FRP,NPV -FAKTOR RELATIVNOG PRIGUŠENJA | | FAKTOR POJAČANJA = 5? Y |
| I NEPRIGUŠENA PRIRODNA | | TD(SEC) = 0? Y |
| UČESTANOST KONJUGOVANO | | SIMULIRANA FUNKCIJA PRENOSA JE |
| KOMPLEKSNOG PARA | | 5 |
| N= 0? N | | |
| M= 4 | | (S+2+5*0.36+1)(S+2.5)(S+2) |
| P= 0 Y | | T-TEST REZIM |
| BROJ KONJUGOVANO KOMPL. PAROVA= 0 N | | S-REZIM SIMULACIJE |
| BROJ KONJUGOVANO KOMPL. PAROVA= 1 | | K-POVRATAK NA ZADAVANJE PARAMETARA |

Sl. 2 Interaktivni režim rada sa simulatorom

Režim testiranja

Ovaj režim omogućava proučavanje odziva zadatog sistema na standardne eksitacije. Tokom test režima računar se ne obraća A/D, D/A konvertoru već korisnik zadaje ulaz u simulator u(t) sa tastature i može ga menjati bez zaustavljanja test simulacije. Na raspolaganju korisniku su kontrolni znaci za promenu boje crtanja odziva, brisanje slike na RGB monitoru, kao i za zaustavljanje i nastavak simulacije.

Režim simulacije

U režimu simulacije u(t) se učitava sa A/D konvertora i izračunato y(t) se izdaje na D/A konvertor. U toku režima simulacije, kao i u toku test režima, u(t) i y(t) se memoriše za off-line obrade. Na raspolaganju korisniku su kontrolni znaci za komunikaciju sa grafičkim modulom.

Opisane funkcije simulatora su realizovane koristeći dva programska nivoa i to:

- komunikacioni nivo i
- izvršni nivo.

Komunikacioni nivo

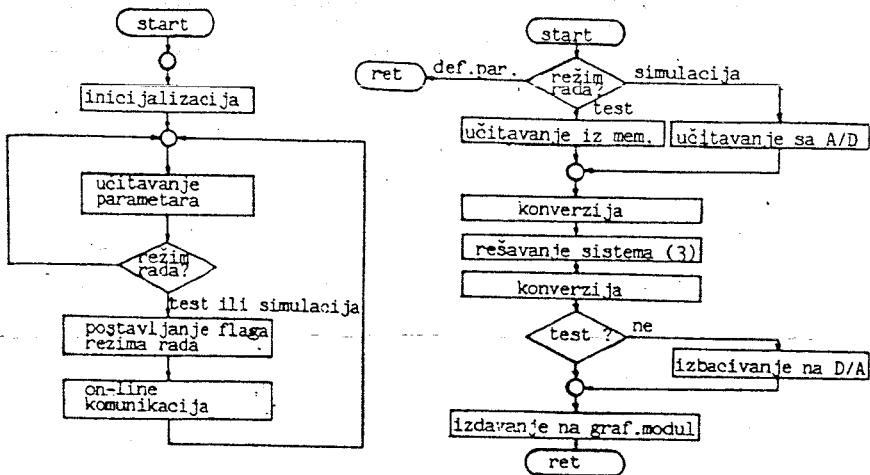
Osnovna namena ovog nivoa je spremanje podataka za izvršni nivo i komunikacija sa korisnikom u toku simulacije. Programi ovog nivoa rade u off-line režimu i to: određuju režime rada prema zahtevima korisnika, učitavaju para-

metre u režimu konfigurisanja sistema i omogućavaju komunikaciju korisnika i simulatora u toku režima testa i simulacije.

Izvršni nivo

Programi izvršnog nivoa izvršavaju se i toku interapske rutine. Na osnovu podataka pripremljenih u toku režima definisanja funkcije prenosa vrši se numeričko rešavanje sistema (3), kao i učitavanje $u(t)$ i izdavanje $y(t)$ na D/A konvertor. U okviru ovog nivoa se prikazuju $u(t)$ i $y(t)$ na RGB monitoru.

Blok dijagrami komunikacionog i izvršnog nivoa prikazani su na slici 3.



Sl. 3 Blok dijagram komunikacionog (a) i izvršnog (b) nivoa

Za sva izračunavanja se koristi paket aritmetike sa pomičnim zarezom. Podaci su predstavljeni dvobajtnom mantisom i jednobajtnim eksponentom.

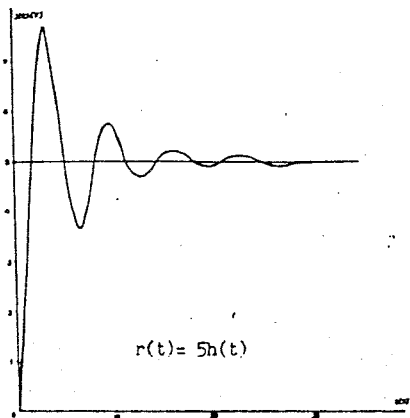
5. PRIMERI

Osnovna funkcija simulatora je ispitana preko odziva sistema, opisanog funkcijom prenosa:

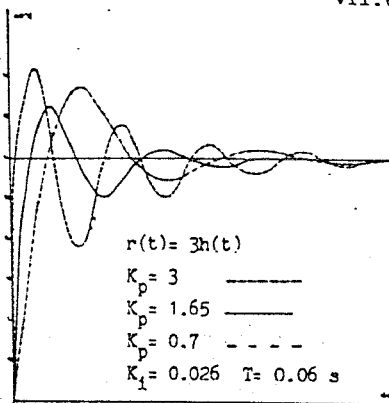
$$G(s) = \frac{1}{(s^2 + s - 0.4 + 1)} \quad (4)$$

na odskočnu pobudu.

Proveru tačnosti izvršili smo poredjenjem inverzne Laplasove transformacije $Y(s) = G(s) \frac{1}{s}$ i izlaza simulatora $y(t)$. Dobijene su apsolutna srednja vrednost modula greške $y_m = 0.18$ i standardna devijacija $\sigma^2 = 0.074$.



Sl. 4 Simulirani odskočni odziv sistema opisanog sa (4)



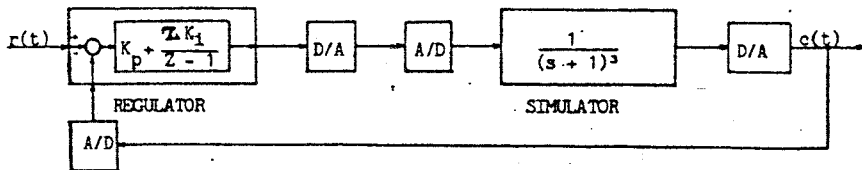
Sl. 5 Odskočni odzivi sistema sa slike 6 za različite K_p

Na slici 4 prikazan simulirani odziv sistema opisanog sa (4).

Simulator je testiran u sprezi sa digitalnim PI regulatorom [5]. Rad digitalnog PI regulatora je prethodno ispitan na analognom simulatoru funkcije prenosa:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad (5)$$

Ponovljeno je testiranje ovog PI regulatora na digitalnom simulatoru funkcije prenosa (5). Ispitivanja su pokazala potpuno kvalitativno i kvantitativno slaganje. Na slici 5 prikazani su odskočni odzivi sistema sa slike 6 za različite vrednosti pojačanja.



Sl. 6 Funkcionalna šema veze regulatora i simulatora

6. ZAKLJUČAK

U radu je opisana realizacija digitalnog simulatora procesa baziranog na standardnim hardverskim modulima ILR i softverskoj aritmetici sa pomičnim

zarezom. Ova koncepcija omogućava simulaciju procesa koji se opisuju funkcijom prenosa četvrtog i nižeg reda. Numerička integracija pridruženog sistema diferencijalnih jednačina vrši se korakom integracije 0.04 s. Moguća hardverska poboljšanja uređaja su ubrzanje rada procesora i korišćenje posebnog časovnika realnog vremena.

Osnovna pretpostavka za korišćenje simulatora je poznavanje funkcije prenosa simuliranog procesa. Ukoliko nam nisu poznati parametri procesa, potrebno ih je identifikovati. Ova konfiguracija omogućava eksperimentalno podešavanje parametara funkcije prenosa kada se raspolaze samo sa snimljenim odzivom procesa na zadatu eksitaciju. Razvijeni simulator, za sada, nema implementirane algoritme za identifikaciju parametara. Predmet budućeg rada je realizacija algoritama parametarske identifikacije.

LITERATURA

- [1] A.Lopez, P.Murill, C.Smith (1968). Optimal tuning of proportional digital controllers. *Instr. Cont. Systems*, 41, 97.
- [2] D.Auslander, Y.Takahashi, M.Tomizuka (1978). Direct digital process control: practice and algorithms for microprocessor application. *Proc. IEEE*, 66, 199.
- [3] M.Stojić (1984). Design of the microprocessor-based system for DC motor speed control. *IEEE Trans. Ind. Elec.*, IE-31, 243.
- [4] M.Stojić (1980). *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*. Naučna knjiga, Beograd.
- [5] A.Zdravković (1984). *Realizacija diskretnog PI regulatora na mikroracunaru LOLA 8*. Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu.