

## JEDNA PRIMJENA ADAPTIVNIH REGULATORA

Darko Stanišić, Vladimir Pavlica  
Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad

**Sadržaj** – U ovom radu predstavljene su rezultati primjene dva realizovana adaptivna regulatora koji su zasnovani na dva različita prediktivna upravljačka algoritma. Upravljački algoritmi koji su korišćeni su generalni prediktivni regulator i regulator produženog horizonta. Realizovani samopodešavajući regulatori primjenjeni su u laboratoriji na pilot postrojenju gdje je vršena regulacija nivoa vode u rezervoaru. Samopodešavajući adaptivni regulatori zasnovani na prediktivnim upravljačkim algoritmima, definišu upravljanje na osnovu pretpostavke o poznatom modelu procesa. Zbog toga je neophodno da se on-line estimiraju parametri procesa. Parametri procesa su estimirani pomoću rekurzivne metode najmanjih kvadrata.

### 1. UVOD

Prediktivni upravljački algoritmi su zasnovani na pretpostavci o poznatom modelu procesa i na pretpostavljenom scenariju za buduće upravljačke signale. Prediktivno upravljanje ima tri osnovna koraka

1. *Predikcija izlaza*: pomoću modela sistema predvidi se buduće ponašanje izlaza na osnovu podataka koji su prikupljeni do tekućeg vremenskog trenutka
2. *Računanje upravljanja*: izračunava se niz budućih upravljačkih signala koji treba da obezbijedi da predviđeni izlaz bude što je moguće bliži željenom budućem izlazu
3. *Primjena upravljanja*: od niza upravljačkih akcija dobijenog u prethodnom koraku samo se prvi primjenjuje na proces dok se ostali zanemaruju.

U sljedećem trenutku odabiranja mjerenjem se dobija nova vrijednost izlaza, što se koristi kao osnova za izračunavanje novog niza upravljačkih signala.

Na početku razvoja prediktivnih regulatora razvijeni su algoritmi koji su obezbjeđivali dobro ponašanje stabilnih sistema, ali nisu bili sposobni da obezbijede prihvatljivo ponašanje nestabilnih sistema. Jedan od prvih prediktivnih algoritama koji je našao primjenu u industriji je regulator produženog horizonta (Extended Horizon Control – EHC). Generalni prediktivni regulator (Generalized Predictive Controller – GPC) projektovan je sa ciljem da se dobije metod koji se može koristiti kao algoritam opšte namjene, odnosno da posluži kao osnova za realizaciju regulatora koji je sposoban da ostvari prihvatljivo ponašanje pri primjeni na većinu realnih procesa. Iako je nakon generalnog prediktivnog regulatora razvijen čitav niz novih prediktivnih algoritama, GPC zahvaljujući svojoj jednostavnosti i efikasnosti ipak ima veću primjenu u industriji. Ove njegove karakteristike čine GPC naročito pogodnim za korišćenje pri realizaciji samopodešavajućih adaptivnih regulatora, dok velika složenost novijih prediktivnih algoritama predstavlja veliku prepreku njihovoj upotrebi pri praktičnoj realizaciji adaptivnih regulatora.

### 2. KRATAK OPIS ALGORITAMA KORIŠĆENIH PRI REGULACIJI

Najbolja polazna osnova za eliminisanje smetnji dobija se kada se interni model smetnji nalazi u upravljačkom zakonu. Model većine praktičnih smetnji je integraljeni bijeli šum koji predstavlja spori slučajaj drift izlazne promjenljive od svoje nominalne vrijednosti [7]. Ovaj model predstavljen je jednačinom.

$$x(z) = \frac{v(z)}{\Delta} \quad (1)$$

gdje je sa  $v(z)$  označen Gausov bijeli šum sa srednjom vrijednošću jednakom nuli i varijansnom  $\sigma_0^2$ . Zbog toga GPC algoritam u upravljačkom zakonu koristi CARIMA (stochastic controlled autoregressive integrated moving-average) model procesa koji u sebi posjeduje pomenuti model smetnji

$$A(z^{-1})y(z) = B(z^{-1})u(z) + C(z^{-1})v(z)/\Delta \quad (2)$$

U ovom radu se, kao i u velikom broju slučajeva [2] zbog pojednostavljenja koristi

$$C(z^{-1}) = 1 \quad (3)$$

Na osnovu ove pretpostavke dobija se sljedeći model posmatranog procesa

$$A(z^{-1})y(z) = B(z^{-1})u(z) + v(z)/\Delta \quad (4)$$

U nekim primjenama [4], [6] koristi se i CARMA model procesa, s tim da se ulazno/izlazni podaci filtriraju prije estimacije parametara.

Regulator produženog horizonta je originalno izveden za CARMA model sistema [1], ali se u ovom radu pri realizaciji EHC regulatora koristi CARIMA model sistema zbog već pomenutih prednosti.

Kod EHC algoritma upravljanje u trenutku  $t=kT$  se dobija na osnovu zahtjeva da predikcija izlaza u trenutku  $t=(k+N_p)T$  ima željenu vrijednost. Parametar  $N_p$  se zove horizont predikcije. Ukoliko je  $N_p$  veće od kašnjenja sistema  $d$  predikcija izlaza pored toga što zavisi od prethodnih vrijednosti upravljanja i izlaza, kao i upravljanja  $u(k)$  koje želi da se odredi, zavisi takođe i od budućih upravljačkih signala. Zbog toga moraju da se uvedu neke pretpostavke ili zahtjevi u pogledu karaktera budućih upravljačkih akcija. U ovom radu je zbog toga pri određivanju zakona upravljanja korišćen zahtjev da je potrebno da izlaz iz sistema u trenutku  $(k+N_p)T$  ima željenu vrijednost uz uslov da se minimizira

$$\sum_{i=0}^{N_p-d} u(k+i) \quad (5)$$

Za razliku od EHC algoritma kod koga se upravljanje izračunava na osnovu željene vrijednosti jednog izlaza, upravljanje u trenutku  $t=kT$  koje se dobija na osnovu GPC algoritma, rezultat je minimizacije sljedećeg kriterijuma optimalnosti

$$I = E \left[ \sum_{j=N_1}^{N_p} (y(k+j) - w(k+j))^2 + \sum_{j=1}^{N_U} \lambda_j \Delta^2 u(k+j-1) \right] \quad (6)$$

gdje je

$y(k+j)$  – predikcija izlaza iz sistema u trenutku  $t=(k+j)T$

$w(k+j)$  – zadana vrijednost izlaza u trenutku  $t=(k+j)T$

$\Delta u(k+j)$  – priraštaj upravljanja u trenutku  $t=(k+j)T$

$\lambda_j$  – težinski faktori za priraštaj upravljačke promjenljive

$N_1$  – minimalni horizont predikcije

$N_p$  – maksimalni horizont predikcije

$N_U$  – horizont upravljanja

U opštem slučaju maksimalni horizont predikcije se bira tako da obuhvati sve izlaze iz sistema na koje značajan uticaj ima tekuće upravljanje, što znači da bi trebalo da je bar veći od stepena  $B(z^{-1})$ , a još bolje je da se izabere tako da je približno jednak vremenu uspona procesa. Minimalni horizont predikcije se obično postavlja na 1, ali ukoliko je poznato minimalno kašnjenje sistema  $d$ ,  $N_1$  može da se postavi na tu vrijednost. To se radi jer prva upravljačka akcija  $u(k)$  nema uticaja na prvih  $d-1$  izlaza pa se na taj način izbacuju nepotrebna izračunavanja.

Jedna od važnih karakteristika GPC algoritma je njegov pretpostavljeni scenario za buduće upravljačke signale. Pretpostavlja se da su nakon intervala određenog sa horizontom upravljanja  $N_U < N_p$  priraštaji upravljanja jednaki nuli odnosno

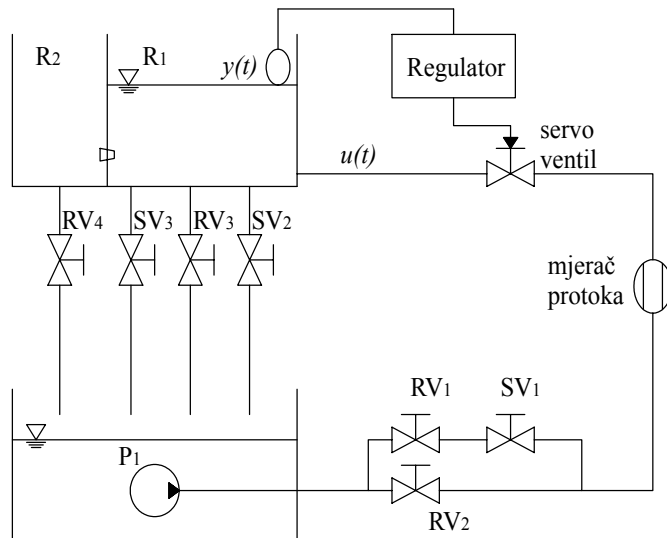
$$\Delta u(t+j-1) = 0 \quad \text{za } j > N_U$$

Za jednostavne procese se sa vrijednošću horizonta upravljanja od 1 u opštem slučaju dobijaju zadovoljavajući rezultati. Povećana vrijednost horizonta upravljanja daje aktivnije upravljanje, a uglavnom se koristi kod složenijih sistema. Dobar kvalitet regulacije dobija se za vrijednost horizonta upravljanja koja je bar jednaka broju nestabilnih polova.

Pošto se generalni prediktivni regulator zasniva na poznatom modelu procesa potrebno je izvršiti estimaciju parametara sistema za koji je pretpostavljen CARIMA model. Za estimaciju parametara korišćen je rekurzivni algoritam najmanjih kvadrata sa eksponencijalnim zaboravljanjem.

### 3. SISTEM KORIŠĆEN U EKSPERIMENU

Regulator je primjenjen na pilot postrojenju koje se nalazi u laboratoriji Katedre za automatiku i upravljanje sistemima. Principijelna šema ovog postrojenja prikazana je na slici 1



Slika 1. Principijelna blok šema test postrojenja za upravljanje nivoom tečnosti

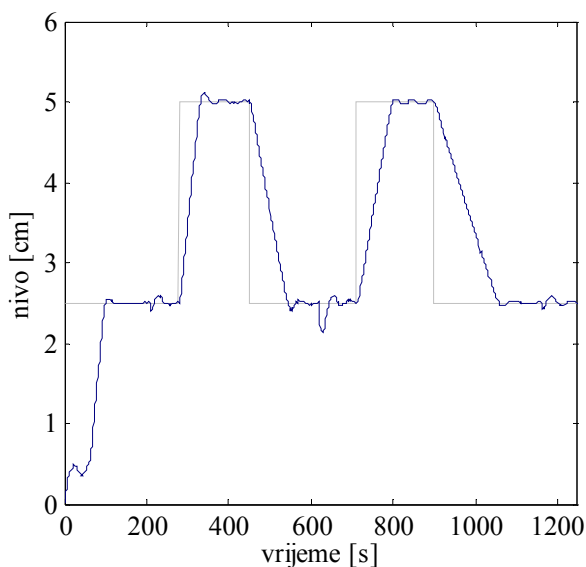
U eksperimentima se vrši regulacija nivoa tečnosti  $y(t)$  u rezervoaru  $R_1$ . Pomoću pumpe  $P_1$  koja se nalazi u rezervoaru  $R_3$  obezbjeđen je dotok tečnosti  $u(t)$  u rezervoar. Regulator može vršiti promjenu dotoka tečnosti pomoću servo ventila, kao i zatvaranjem i otvaranjem solenoidnog ventila  $SV_1$ . Izbor načina promjene dotoka vrši se pomoću ručnih ventila  $RV_1$  i  $RV_2$ . Količina tečnosti koja ističe iz rezervoara  $R_1$  određuje se pomoću ručnog ventila  $RV_3$  i solenoidnih ventila  $SV_2$  i  $SV_3$ . Rezervoari  $R_1$  i  $R_2$  mogu da se povežu pomoću otvora koji se nalazi na približno četvrtini visine rezervoara. Ručni ventil  $RV_4$  omogućava isticanje vode iz rezervoara  $R_2$ .

Pri izvođenju eksperimenata regulacija nivoa se vršila pomoću promjene položaja servo ventila tako da je tokom čitavog eksperimenta ventil  $RV_2$  bio u otvorenom, dok su ventil  $RV_1$ , kao i solenoidni ventil  $SV_1$  bili u zatvorenom položaju.

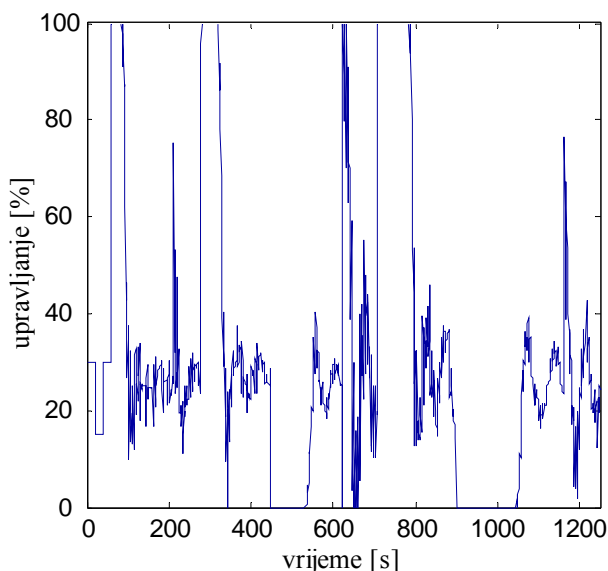
### 4. REGULACIJA NIVOA TEČNOSTI

Samopodešavajući regulatori sa prediktivnim upravljačkim algoritmima i on-line estimacijom parametara pomoću rekurzivne metode najmanjih kvadrata realizovani su na PC-u. Regulatori su realizovani kao virtuelni instrumenti u programskom paketu LabVIEW. Na taj način, za povezivanje sa procesom može da se iskoristi bilo koji modul za akviziciju firme National Instruments. Pri izvođenju eksperimenata koji su prikazani u ovom radu korišćen je modul za akviziciju PCI-6024E. Kao veza modula sa procesom koristi se poseban interfejs projektovan na Katedri za automatiku i upravljanje sistemima.

Pri regulaciji nivoa upotrebom servo ventila upravljački signal vrši promjenu dotoka vode u rezervoar otvaranjem i zatvaranjem servo ventila. Na početku eksperimenta rezervoari  $R_1$  i  $R_2$  nisu bili povezani, a od ventila koji omogućavaju isticanje vode iz rezervoara bio je otvoren samo  $SV_3$ . Da bi se unijele smetnje u sistem, u periodu od 210 do 212 sekunde eksperimenta  $SV_2$  je držan u otvorenom stanju. Nakon 620 sekundi eksperimenta, rezervoar  $R_1$  je povezan sa rezervoarom  $R_2$  koji je do oko 20% zapremine bio napunjen vodom. Rezervoari su ostali spojeni do kraja eksperimenta. U sistem su unijete nove smetnje tako što je ponovo držan otvoren  $SV_2$  u periodu od 1160 do 1164 sekunde eksperimenta.



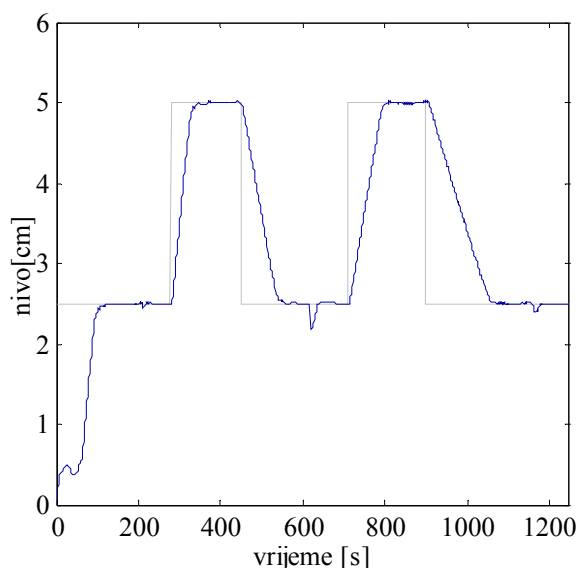
Slika 2. Ponašanje sistema kada se regulacija nivoa vrši EHC regulatorom



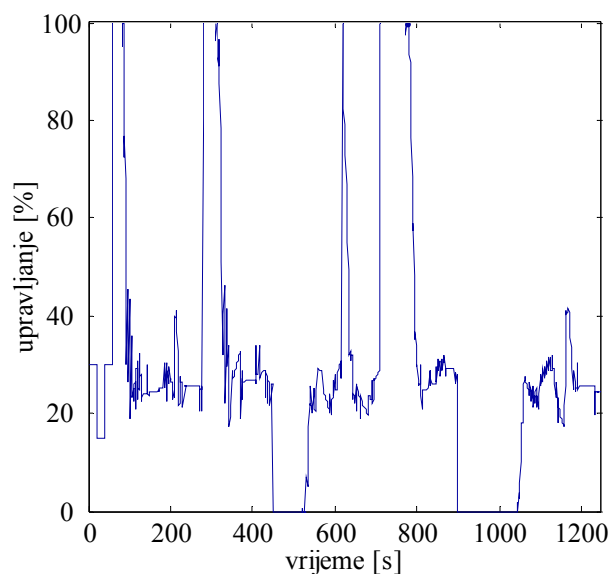
Slika 3. Primjenjeno upravljanje kada se regulacija nivoa vrši EHC regulatorom

Vrijeme odabiranja kod oba regulatora je bilo 1s, a pretpostavljen je model sistema koji je imao broj parametara  $n_a=2$ ,  $n_b=3$ . Kod EHC regulatora najbolje ponašanje sistema je ostvareno kada je horizont predikcije bio  $N_p=10$ . Na slici 2 je prikazano ponašanje sistema, a na slici 3 primjenjeno upravljanje za taj slučaj.

Parametri generalnog prediktivnog regulatora koji je korišćen pri regulaciji nivoa bili su  $N_f=1$ ,  $N_2=20$ ,  $N_U=1$  i  $\lambda=0.3$ . Na slici 4 predstavljeno je ponašanje sistema kada je regulacija vršena sa ovim regulatorom, a na slici 5 je dato primjenjeno upravljanje



Slika 4. Ponašanje sistema kada se regulacija nivoa vrši GPC regulatorom



Slika 5. Primjenjeno upravljanje kada se regulacija nivoa vrši GPC regulatorom

## 5. ZAKLJUČAK

Samopodešavajući regulatori koji su primjenjeni na problem regulacije nivoa pokazali su sposobnost da se prilagode promjenama dinamike sistema i da eliminišu uticaj poremećaja. Dobijeni rezultati u eksperimentima pokazuju da je GPC regulator doveo do najboljeg ponašanja sistema. Kada je korišćen ovaj regulator nije dolazilo do preskoka pri promjeni zadate vrijednosti za razliku od EHC regulatora kod koga je pri promjeni zadate vrijednosti uvijek dolazilo do pojave preskoka. Bolje ponašanje sistema sa GPC

regulatorom je bilo i pri pojavi smetnji, kao i pri promjeni zapremine rezervoara.

Maksimalna brzina punjenja rezervoara određena je karakteristikama pumpe i postiže se kada je upravljanje maksimalno, odnosno potpuno otvoren servo ventil. Maksimalna brzina pražnjenja rezervoara koja se postiže kada je upravljanje 0, odnosno potpuno zatvoren servo ventil, određena je karakteristikama ventila koji omogućuju isticanje tečnosti. Pošto pri eksperimentima tečnost ističe samo kroz SV<sub>3</sub>, maksimalna brzina pražnjenja rezervoara koja može da se postigne je dosta mala, tako da je pražnjenje rezervoara relativno sporo u odnosu na najveću brzinu punjenja. Zbog toga pri promjeni zadate vrijednosti, u svim eksperimentima, sistem brže reaguje pri povećanju zadate vrijednosti, nego pri smanjenju.

## 6. LITERATURA

- [1] K. J. Astrom, B. Wittenmark, "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [2] D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs, "Generalized predictive control – Part I. The basic algorithm", *Automatica* 23, 137-148, 1987.
- [3] D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs, "Generalized predictive control – Part II. extensions and interpretations", *Automatica* 23, 149-160, 1987.
- [4] M. Suichies, D. Leroux, C. Dechert, A. Trusiak "An implementation of generalized predictive control in a flotation plant", *Control Engineering Practice* 8, 319-325, 2000.
- [5] T. Y. Chen, "Application of adaptive predictive control to a floor heating system with larg thermal lag", *Energy and Buildings* 34, 45-51, 2002.
- [6] S.N. Huang, K.K. Tan, T.H. Lee, "Adaptive GPC control of melt temperature in injection moulding", *ISA Transactions* 38, 361-373, 1999.
- [7] D. W. Clarke, "Self-Tuning Control", *The Control Handbook*, 827-846, CRC Press, 1996.

**Abstract** – In this paper, the application of two adaptive controllers based on two different predictive control algorithms is presented. Predictive control algorithms used are generalized predictive controller and extended horizon control. Adaptive controllers were applied in the laboratory on water level control problem. Self-tuning adaptive controllers based on predictive control algorithms calculate control based on assumption that the model of process is known. Because of that it was necessary to estimate the process parameters on-line. The recursive least squares algorithm was used for estimation.

## ONE APPLICATION OF ADAPTIVE CONTROL

Darko Stanišić, Vladimir Pavlica