

# REGULACIJA TEMPERATURE ELEKTROTOPORNE KOMORNE PEĆI KORIŠĆENJEM MIKROPROCESORSKE TEHNIKE MICROPROCESSOR CONTROL OF TEMPERATURE IN CHAMBER ELECTRIC FURNACE

Zoran Radaković, Nikola Parojčić, Dragan Stevanović, Elektrotehnički fakultet, Beograd

**Sadržaj** - U radu se prikazuje jedno rešenje petlje digitalne regulacije temperature u elektrootpornoj komornoj peći snage 5 kW. Opisuju se ostvareni merni i izvršni interfejsi između objekta regulacije (peći) i mikroprocesorskog uređaja u kome je sadržan upravljački algoritam. Daju se karakteristike regulacije dobijene primenom elementarnog histerezisnog regulatora i konvencionalnih digitalnih zakona upravljanja za linearne sisteme. Takođe, prikazuju se i temperaturne promene pri različitim snagama zagrevanja. Numerički obrađeni eksperimentalni rezultati ukazuju na nelinearnost toplotnih karakteristika, što objašnjava rezultate nemogućnosti primene konvencionalnih linearnih digitalnih zakona upravljanja.

**Abstract** - The paper presents digital control system for temperature in chamber electric furnace of 5 kW power. The measuring and the power output interfaces between regulated object (furnace) and microprocessor device, containing control algorithm, are exposed. The elementary on/off regulator and conventional digital control for linear systems are applied. For different constant powers transient thermal characteristics are recorded. Numerical calculations based on recorded temperatures showed that the thermal characteristic of the furnace is nonlinear, which explains why the application of conventional linear digital control is not possible to be applied.

## 1. UVOD

Zagrevanje predmeta toplotne obrade (šarže) u elektrootpornim pećima ima za cilj da joj se temperatura dovede na željenu vrednost na kojoj se odvija očekivani fizički ili hemijski proces [1]. Zadatak regulacionog sistema je da se u svakom trenutku podese snaga peći radi ostvarenja zadate promene temperature. Mesto u kome se meri temperatura mora biti pažljivo odabrano, s obzirom na nehomogeno temperaturno polje u peći i složene zakonitosti prenosa toplote [2]. Zbog nelinearnih zakonitosti prenosa toplote [2, 3] peć kao objekat upravljanja predstavlja nelinearni sistem.

Mikroprocesorska digitalna tehnika upravljanja se pokazuje kao pogodna za primenu u regulaciji temperature ovakvih sistema, jer pruža mogućnost implementacije složenih zakona upravljanja.

U radu je izloženo ostvareno hardversko rešenje digitalnog regulatora temperature i početni rezultati njegove primene kao jednostavnog histerezisnog regulatora i kao

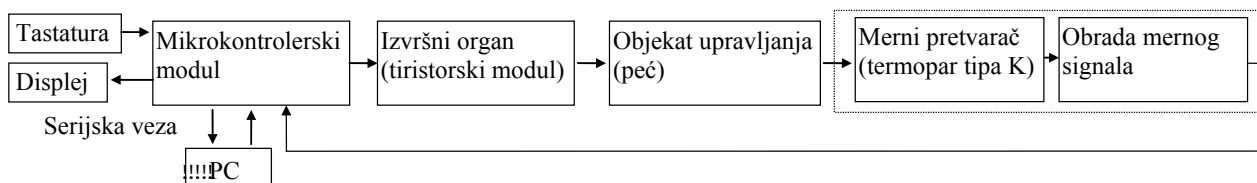
konvencionalnog linearnog digitalnog PID upravljanja. Na nizu probnih ekperimentalnih primera su prikazane greške do kojih dovodi primena konvencionalnih linearnih zakona upravljanja na ovaj nelinearni sistem. U zaključku se izlažu dalji nameravani pravci rada.

## 2. OBJEKAT REGULACIJE I REGULACIONI HARDVERSKI SKLOP

Korišćena je standardna elektrootporna komorna peć, predviđena za temperaturu do 1000 °C. Konstrukcija peći je takva da se oko centralnog prostora za smeštaj šarže nalazi šamot koji nosi elektrootporni izvor toplote (5 kW, 220 V)), a oko njega toplotno izolacioni (penušavi) šamot, čija je uloga da smanji prenos toplote ka okolini.

Sa zadnje strane peći je postavljen senzor za merenje temperature, izveden kao termopar tipa K (NiCr-Ni). Vrh termopara se nalazi u unutrašnjem prostoru peći, na oko trećini dužine (od zadnjeg zida peći).

Elementi sistema upravljanja temperaturom peći su prikazani na slici 1.



Sl. 1. - Elementi ostvarenog sistema upravljanja

Mikrokontrolerski modul čini osmobaritni mikrokontroler SAB 80C535 sa svojim periferijama; on sadrži: 256 bajtova internog RAM-a, šest osmobaritnih ulazno/izlaznih portova, dva šesnaestobitna tajmera opšte namene, šesnaestobitni tajmer sa funkcijom poređenja, dupleks serijsku vezu, šesnaestobitni watch-dog tajmer, 12 izvora interapta sa četiri nivoa prioriteta, A/D konvertor sa 8 multipleksiranih ulaza i programabilnim referentnim naponom.

Tastatura sadrži osam tastera, a displej je dvoredni, sa po 16 karaktera u jednom redu. Osim ovog komunikacionog interfejsa sa korisnikom, ostvarena je i dvostrana serijska veza sa PC-jem.

Merni pretvarač je termopar tipa K, čija granična temperatura iznosi 1372 °C. Izmerena vrednost termoelektromotorne sile je reda veličine nekoliko desetina mV, pa se na A/D konvertor za desetobitnu

konverziju dovodi preko pojačavačkog modula. Za prilagođenije signala, uz automatsku korekciju temperature hladnih krajeva, korišćeno je integralno kolo AD 595. Ono se postavlja direktno na hladne krajeve termopara (neposredno na izlasku iz peći), kako bi se do mikrokontrolera prenosio signal reda veličine nekoliko volti. Ovo prilagođavačko kolo daje na izlazu napon koji je linearno zavisen od temperature toplog spoja termopara.

Izvršni organ je tiristorski modul čiji energetska deo čini triak BTA 40/600; modulom se upravlja kolom MOC 3040; ovo kolo vrši optokaplersko razdvajanje; takođe, ono uključuje grejač pri prolasku napona kroz nulu, bez obzira na aktivnu vrednost ulaznog signala na ovo kolo, čime se izbegavaju nagli skokovi struje pri uključanju.

### 3.SISTEMSKA PROGRAMSKA PODRŠKA

Za mikrokontroler su razvijene sve funkcije za uspešan rad tastature, displeja i serijske veze sa PC-jem, za koji je takođe napisan odgovarajući softver. Perioda odabiranja je podesiva i uglavnom je rađeno sa vrednošću od 15 ili 60 s; svakih 15 (60) s se vrši merenje, izračunavanje potrebne snage zagrevanja i njeno podešavanje.

Vrednost temperature se iz izmerenog signala na AD konvertoru, a zatim preračunatog prema poznatoj funkciji kola AD 595, određuje na osnovu standardizovane tabele ili standardizovanog aproksimujućeg polinoma [4] zavisnosti temperature toplog spoja od termoelektromotorne sile. Rezolucija merenja sa internim osmootnim AD konvertorom u mikrokontroleru je 1023 tačke, odnosno oko 1 °C, jer se vrši desetobitna konverzija putem programiranja internih referentnih napona.

Izračunata snaga se podešava širinskom modulacijom na 15 s - obzirom na način izrade kola MOC 3040, rezolucija podešavanja snage iznosi (10 ms/15 s) 5000 W = 3.33 W.

Celokupna programska podrška za mikrokontroler je urađena u programskom jeziku C [5].

### 4.KARAKTERISTIKA PEĆI I ALGORITAM UPRAVLJANJA

Na osnovu eksperimenata izvršenih u otvorenoj povratnoj sprezi dobijen je niz karakteristika temperaturnog odziva peći pri različitim konstantnim snagama zagrevanja sto je prikazano na slici 2 (merenja su vršena na 15 s).

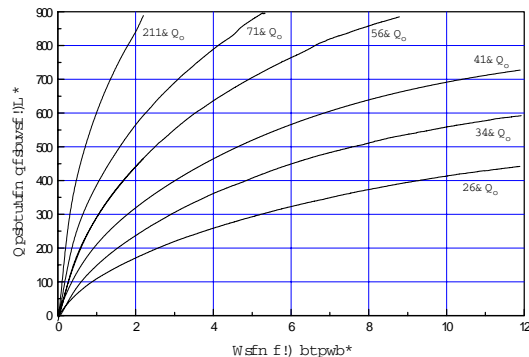
Registronim karakteristikama odgovaraju analitičke funkcije oblika

$$\theta(t) = \left( \theta_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + \theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \right) h(t - T_M), \quad (1)$$

pri čemu trenutku  $t=0$  odgovara početak zagrevanja, odnosno

$$\frac{\theta(s)}{P(s)} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-N T_s}. \quad (2)$$

Procenom mrtvog vremena  $T_M$ , jednakog  $N$  perioda odabiranja trajanja  $T$ , a zatim numeričkim metodama minimizacije sume kvadrata odstupanja korišćenjem [6] za svaku od snaga zagrevanja su određeni parametri funkcija oblika (1), koji su prikazani u tabeli 1.



Sl. 2. - Termičke karakteristika peći

$P$ (%)	15	23	30	45	60	100
$\theta_1$ (K)	69	86	125	181	222	336
$\theta_2$ (K)	481	605	699	885	1002	1365
$T_1$ (h)	0.69	0.62	0.56	0.56	0.38	0.30
$T_2$ (h)	7.92	6.38	6.03	5.51	4.72	4.24
$T_M$ (min)	2	2.25	2	2	1.75	1.5
$(\theta_1 + \theta_2)/P$	0.73	0.60	0.55	0.47	0.41	0.34

Tabela 1 - Parametri analitičkih funkcija odziva peći

Iz ovih rezultata se zaključuje da se mrtvo vreme  $T_M$  i vremenske konstante  $T_1$  i  $T_2$  menjaju sa promenom snage, kao i odnos  $(\theta_1 + \theta_2)/P$ , odnosno  $K/P$ . Dakle, sistem je nelinearan, pri čemu svakoj od konstantnih snaga odgovara karakteristika oblika za koji se primenjuje poznati Dalinov algoritam upravljanja [7]. Iako to nije korektno, izvršen je pokušaj primene Dalinovog algoritma za podešavanje parametara PID regulatora na opisani sistem. Parametri regulatora se po ovom algoritmu određuju tako da odziv sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi bude aperiodičan po zadatoj vremenskoj konstanti  $1/\lambda$ . U sledećem odeljku su prikazani rezultati primene Dalinovog algoritma.

Pored primene konvencionalnog digitalnog PID zakona upravljanja, izvršena je regulacija po elementarnom industrijskom histerezisnom regulatoru, za više temperaturnih nivoa.

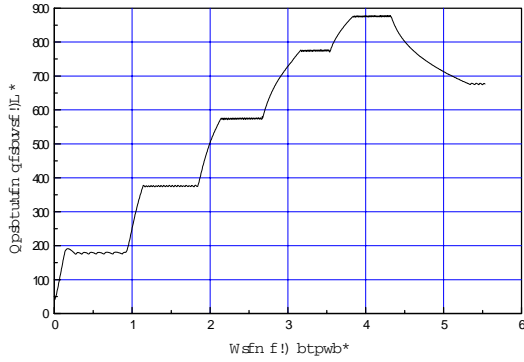
### 5. REZULTATI REGULACIJE TEMPERATURE

Na slici 3 je prikazan rezultat primene histerezisnog regulatora, pri čemu je perioda odabiranja bila 1 s, a histerezis  $\pm 1$  °C oko zadate vrednosti. Varijacije temperature su bile najveće na najnižoj referenci od 178 °C kada su iznosile 2.5 °C (prvi prebačaj je iznosio 13 °C).

Parametri digitalnog PID regulatora, oblika

$$D(z) = k_p \left( 1 + \frac{T/T_I}{1-z^{-1}} + \frac{T_D}{T} (1-z^{-1}) \right), \quad (3)$$

određeni prema Dalinovom algoritmu [7] za četiri različite analitičke funkcije objekta upravljanja (tabela 1) su prikazani u tabeli 2.



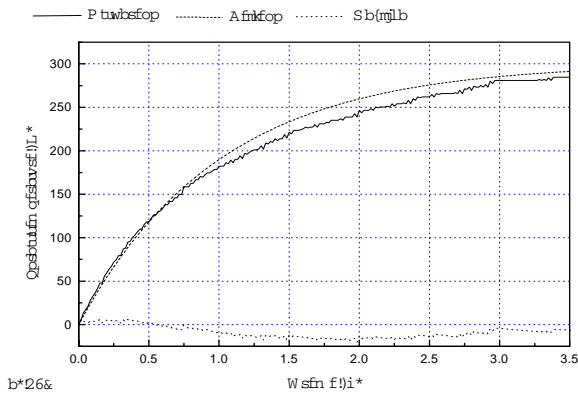
Sl. 3. - Rezultat primene histerezisnog regulatora

$P$ (%)	15	30	60	100	
$T$ (s)	60	60	15	60	60
$1/\lambda$ (h)	1	1	1	1.075	
$k_p \times 10^{-3}$	2.23	2.30	2.32	2.41	2.40
$T_D/T$	34.1	30.5	123.3	20.8	16.3
$T/T_D \times 10$	1.96	2.53	0.632	3.27	3.68

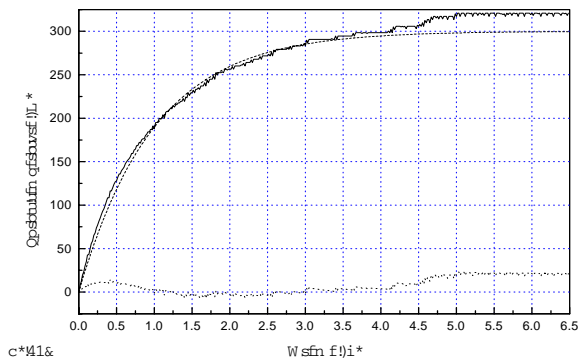
Tabela 2 - Parametri Dalinovog PID regulatora

Na slici 4 je prikazan rezultat primene opisanog PID regulatora za referencu temperature 300 K veću od početne temperature u hladnom stanju, pri  $T = 60$  s i  $1/\lambda = 1$  h.

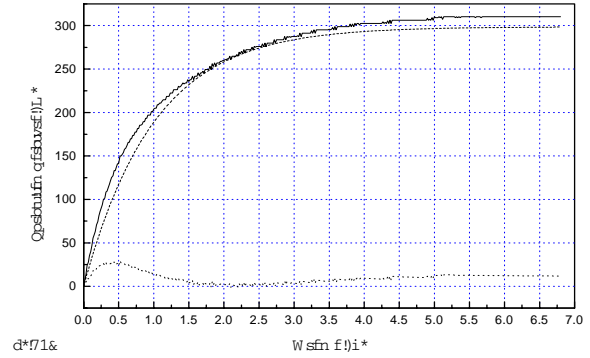
Sa slika a) - d) se jasno uočava da je u početnom delu nagib regulisane temperature veći od zadatog i da raste sa povećanjem snage prema kojoj je određena prirodna karakteristika peći.



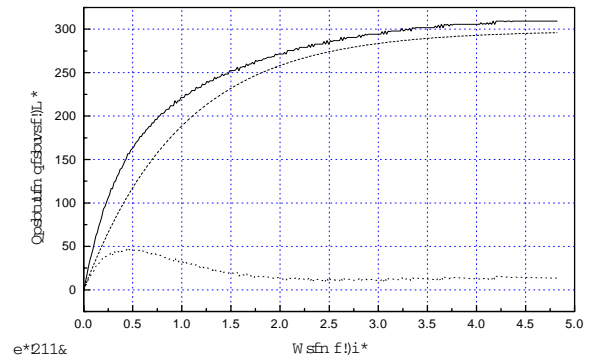
b\*26&



c\*41&



d\*71&

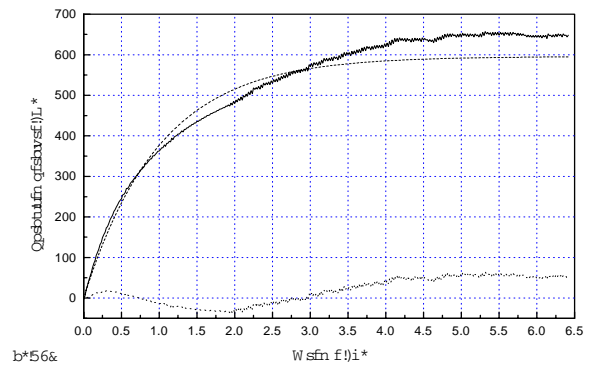


e\*211&

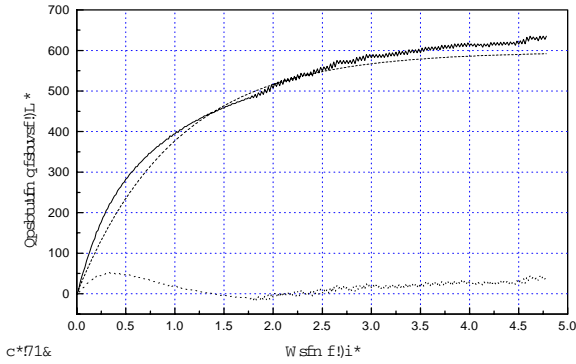
Sl. 4. - Rezultati primene Dalinovog PID regulatora

Osim za snagu od 15 % kod svih ostalih odziva se uočava prebačaj referentne temperature u blizini stacionarnog stanja. Slično se uočava i kod prelaznog stanja za referentni porast temperature od 600 K, što je prikazano na slici 5.

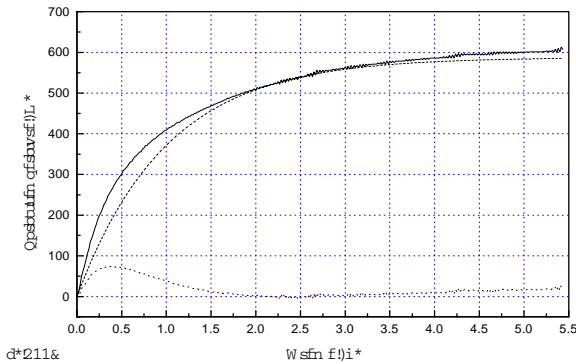
Prebačaj referentne temperature je posledica nelinearnosti peći i diferencijalnog dejstva regulatora. Naime, pojava mernog šuma u blizini referentne temperature (kada greška ima malu vrednost, pa time i proporcionalni član regulatora) može da dovede do negativne vrednosti upravljačke promenljive. S obzirom na to da fizički nije moguće da snaga zagrevanja bude negativna, zahtevana negativna vrednost se svodi na nultu. Sa druge strane, odstupanje temperature (šum) na nižu vrednost dovodi do ostvarljivog signala (manjeg od gornjeg limita snage).



b\*56&



c\*71&



d\*211&

Sl. 5. - Rezultati primene Dalinovog PID regulatora

Sumarno, efekat je povećanje snage zagrevanja i porast temperature, čije smanjenje izaziva jedino inertni integralni član regulatora. Ovaj problem je izraženiji kada je vrednost  $T_D/T$  veća, što je slučaj kada se uzima karakteristika peći prema odzivu pri manjoj snazi (najmanja je 15%) - za primer, videti sliku 6, koja odgovara regulaciji prikazanoj na slikama 5 a) i 5 c). Takođe, nepovoljan je i efekat smanjenja periode odabiranja, što rezultira povećanjem vrednosti  $T_D/T$ . Negativne posledice mernog šuma se mogu umanjiti korišćenjem više, na primer četiri, odbirka, prema formuli [7],

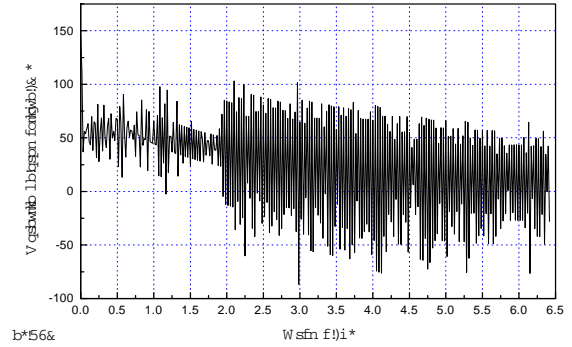
$$e_k = \frac{1}{6}(e(k) + 3e(k-1) - 3e(k-2) - e(k-4)) \quad (4)$$

umesto dva člana (izraz (3)), kao i povećanjem tačnosti merenja - upravo je izrađen dvanaestobitni serijski eksterni AD konvertor, koji se priključuje na port.

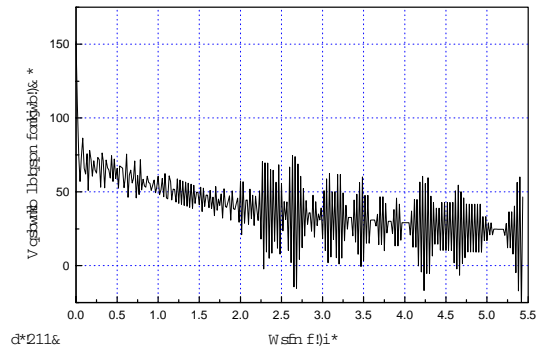
Sa slika 4 i 5 se vidi da se optimalna karakteristika peći (odnosno parametri regulatora), za početni deo regulacione eksponencijalne krive, menja sa promenom reference - od 15% na 45%. Dakle, kada bi se primenjivala opisana regulacija, trebalo bi vršiti selekciju karakteristike peći, odnosno seta parametara regulatora, na osnovu zadate referentne temperature. Tehnika promene je jednostavna za izvođenje zahvaljujući primeni mikroprocesora.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je opisan razvijeni laboratorijski prototip mikroprocesorskog regulatora temperature elektrootporne komorne peći.



b\*56&



d\*211&

Sl. 6. - Izlaz iz regulatora

Zadatak regulacije temperature elektrootporne peći, zbog njene nelinearnosti, ne može biti jednostavno rešen upotrebom konvencionalnog digitalnog Dalinovog PID regulatora. Ipak, zbog sopstvenog odziva peći, koji za jednu konstantnu vrednost snage odgovara modelu za koji je razvijen Dalinov algoritam, njegovu modifikovanu varijantu ne bi trebalo isključiti.

Osnovni cilj ovog rada je da se prikaže ostvareni razvojni sistem na kome se mogu testirati razni algoritmi upravljanja, pri čemu se menja samo upravljačka programska celina. Trenutno se radi na primeni fazi upravljanja, za koje su izvršene pripremne numeričke simulacije na računaru [8].

## LITERATURA

- [1] M. S. Jovanović, *Osnovi elektrotermije i elektrotermička postrojenja*, Beograd, Nauka, 1994.
- [2] S. Pralas, Đ. Kalić, "Simulation of electric resistance furnace operation by means of numerical modelling," *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 70, pp. 425-432, 1987.
- [3] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass transfer*, Singapore, John Wiley&Sons, 1985.
- [4] T. D. McGee, *Principles and methods of temperature measurement*, US A, John Wiley & Sons, 1988.
- [5] Keil Elektronik GmbH, *C-Compiler-51 - User's guide 10.90*, München.
- [6] *EasyPlot*, ver 2.04, 1990.
- [7] M. Stojić, *Digitalni sistemi upravljanja*, Beograd, Naučna knjiga, 1989.
- [8] *Matlab*, ver. 5.0, 1996.