

## EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA SRT METODE PODEŠAVANJA PI REGULATORA

G. Kvašček, *Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet*

B. Đačić, *Institut Mihajlo Pupin, Beograd*

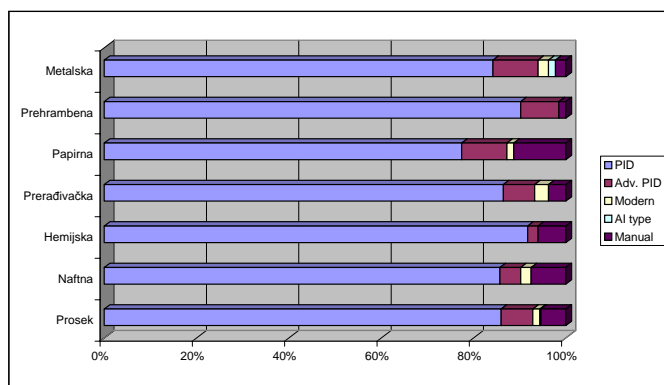
S. Turajlić, *Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet*

**Sadržaj** – Izvršen je kratak prikaz metode za podešavanje PI regulatora na osnovu odskočnog odziva. Data je eksperimentalna verifikacija podešavanja na temperaturnom procesu Feedback PT-326. Pokazano je da je moguće jednostavnim eksperimentom izvršiti podešavanje PI regulatora, ostvariti visoke performanse i robusnost.

### 1. UVOD

U cilju planiranja istraživanja u oblasti automatike u Japanu, krajem prošlog veka, organizacija JEMINA (Japan Electric Measuring Instrument Manufacturers Association) je izvršila temeljnu i sveobuhvatnu analizu koja je obuhvatila anketiranje preduzeća japanske industrije, u kojima su implementirana različita dostignuća iz oblasti automatike [1]. Istraživanje je kao rezultat prikazalo trenutno stanje sistema automatskog upravljanja, potrebe i budući trend razvoja u toj oblasti. Anketom je obuhvaćeno 330 preduzeća iz oblasti matalurgije, čelične industrije, rafinerije nafte i gasa, prehrambene industrije, elektroprivrede, prerade vode, teške industrije, brodogradnje, itd.

Na slici 1 prikazani su pojedini tipovi upravljanja, posebno razvrstani po granama industrije gde su primenjeni. Sa slike



Slika 1. Rasprostranjenost tipova upravljanja u industriji, po pojedinim granama industrije

se vidi da su regulatori zasnovani na modernoj teoriji automatskog upravljanja i regulatori na bazi veštačke inteligencije primenjeni sa manje od 5%. U okviru tog malog procenta najviše su zastupljeni prediktivni regulatori. Više od 90% petlji regulacije realizovano je kao PID ili kao napredna klasa PID regulatora. Ako se uzme u obzir da procenat procesa koji su upravljani u ručnom režimu iznosi oko 5%, sledi da prethodne dve klase regulatora pokrivaju oko 95% procesa koji nisu vođeni u ručnom režimu. U prilog ovoj tezi ide i istraživanje da u tipičnoj fabrici papira u Kanadi ima više od 2000 petlji

upravljanja i da je od toga 97 procenata zatvoreno upotrebom PI regulatora [2].

Iz ovih podataka jasno se vidi motiv za razvoj efikasnog eksperimentalnog postupka za podešavanje PI regulatora, koji će biti izložen u ovom radu i eksperimentalno verifikovan na temperaturnom procesu, Feedback Temperature Process Rig 38-600. [1]

### 2. POSTUPAK PODEŠAVANJA PI REGULATORA NA OSNOVU ODSKOČNOG ODSIVA (SRT)

Proces kojim se upravlja je predstavljen funkcijom prenosa astatizma nula, ne poseduje rezonantne polove i predstavlja sistem minimalne ili neminimalne faze, i sisteme sa ili bez transportnog kašnjenja. Ovim zahtevima je pokrivena većina industrijskih procesa.

Model korišćen za projektovanje i podešavanje sistema upravljanja (određivanje pojačanja PI regulatora,  $K_p$  i  $K_i$ ) je FOPDT model (First Order Plus Dead-Time):

$$G_m(s) = G_{m0}(s) e^{-\tau s} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

gde  $G_{m0}(s)$  označava deo modela bez transportnog kašnjenja.

Za FOPDT model (1), koji predstavlja aproksimaciju procesa  $G_p(s)$ , se vrši projektovanje regulatora [3],  $G_{PI}(s)$ , tako da se integralno dejstvo  $T_i$  usvoji da odgovara vremenskoj konstanti modela  $G_m(s)$ , tj.

$$T_i = T. \quad (2)$$

Ovakav izbor integralnog dejstva regulatora se zasniva na činjenici da se nulom regulatora poništi pol procesa, pod pretpostavkom da je model dobra aproksimacija procesa. Ova ideja je poznata u literaturi i veoma često primenjivana za projektovanje regulatora [4], [5], [6], [7], [8].

Proporcionalno pojačanje regulatora  $K_p$  je

$$K_p = \frac{\mu T}{K\tau}. \quad (3)$$

gde je preporučeni opseg slobodnog parametra  $\mu$

$$0.32 \leq \mu \leq 0.54. \quad (4)$$

Određivanje parametara FOPDT modela vrši se na osnovu odskočnog odziva sistema u otvorenoj sprezi, u nominalnom režimu rada, primenom sledećih pravila (pretpostavka je da je odskočna pobuda amplitude  $u$  dovedena u trenutku  $t = 0$ ):

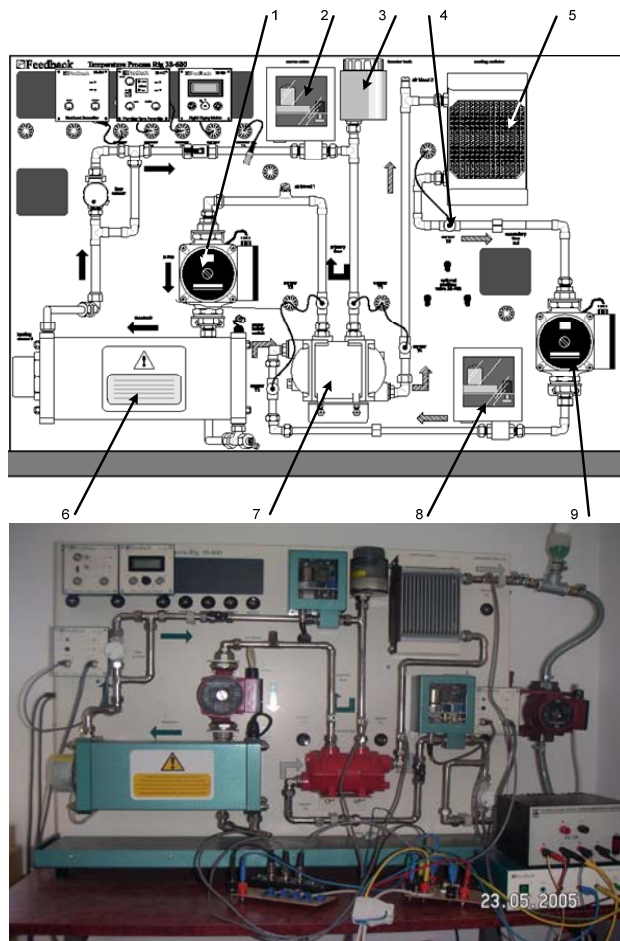
R0 Statičko pojačanje  $K$  se određuje kao odnos promene izlaza  $y_{ss}$  i ulaza  $u$

R1 Transportno kašnjenje  $\tau$  je vreme  $\tau = t_1$ , potrebno da se dostigne  $p_1 = 10\%$  ustaljenog stanja odskočnog odziva procesa,  $y_{ss}$

R2 Vremenska konstanta modela  $T$ , je definisana kao  $T = t_2 - t_1$ , gde je  $t_2$  vreme potrebno do dostizanja  $p_2 = 63\%$  od  $y_{ss}$ .

### 3. OPIS TEMPERATURNOG PROCESA, FEEDBACK TEMPERATURE PROCESS RIG 38-600

Feedback-ov temperaturni proces 38-600 verni je simulator procesa grejanja sa izmenjivačem toplote, gde se vrši regulacija temperature potrošača. Sistem se sastoji od primarnog i sekundarnog kola grejanja.



Slika 2. Šema makete grejnog sistema, 1-pumpa u primarnom toku, 2-servoventil u primarnom toku, 3-kompensaciona posuda, 4-senzor temperature, 5-radijator sa čije zadnje strane se nalazi ventilator, 6-grejač, 7-izmenjivač toplote, 8-servoventil u sekundarnom toku, 9-pumpa u sekundarnom toku

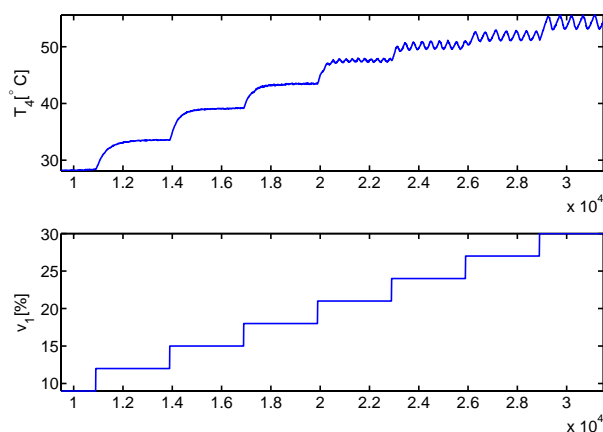
U primarnom kolu se nalazi grejač (koji poseduje on-off (dvokoračni) regulator), pumpa, izmenjivač toplote, servoventil kojim se reguliše protok vode u primarnom kolu, merač protoka, kao i PTC senzori temperature. U sekundarnom kolu se nalazi potrošač, pumpa, servoventil za zadavanje protoka vode u kolu potrošača, senzori temperature i protoka. Potrošač ima dva režima rada, sa uključenim ventilatorom ili bez ventilatora, kada je potrošnja praktično svedena na desetinu u odnosu na režim rada kada je ventilator na potrošaču uključen.

Ovakva konfiguracija je uobičajena u praksi. Regulacijom protoka, tj. otvorenosti ventila u primarnom kolu, određuje se količina predate energije sekundarnom kolu, a samim tim i temperatura potrošača.

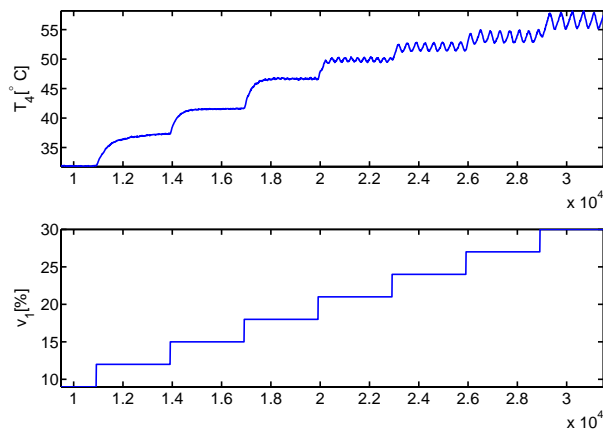
Prvo je izvršena kalibracija PTC senzora, a zbog realizacije sistema upravljanja na dSpace sistemu upravljajna, napravljeni

su i strujno naponski pretvarači za konverziju mernih i upravljačkih signala.

Da bi se izvršila gruba karakterizacija procesa, izvršeno je snimanje odskočnih odziva u otvorenoj sprezi. Upravljački signal je bio otvorenost ventila u primarnom kolu  $v_1$ , a posmatrana je temperatura na potrošaču  $T_4$ . Zbog izrazite nelinearnosti procesa, opseg promene upravljanja ventila je bio od 9% do 30%. Na Slikama 3 i 4 prikazana je serija odskočnih odziva pri promeni upravljanja od 9% do 30%, gde je potvrđena pretpostavka izrazite nelinearnosti procesa. U zavisnosti od otvorenosti ventila u sekundarnom toku, dobijaju se različiti odskočni odzivi. Menjanjem protoka, tj. potrošnje, bitno se utiče na karakteristike sistema, kao što je i prikazano na slikama 3 i 4.



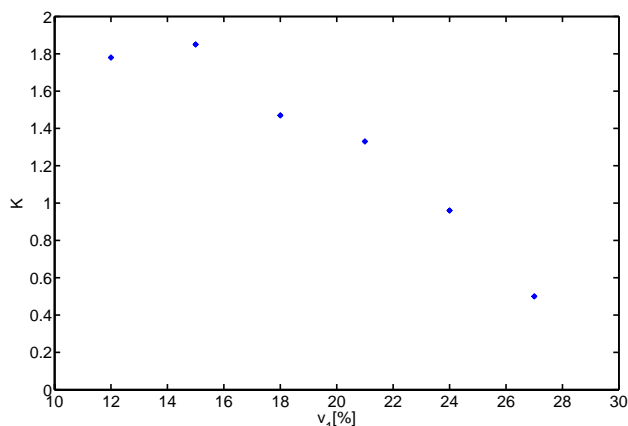
Slika 3. Odskočni odzivi temperature potrošača  $T_4$  u zavisnosti od upravljanja ventila  $v_1$  u primarnom kolu, u opsegu od 9% do 30% otvorenosti, pri otvorenosti ventila  $v_2$  u sekundarnom kolu od  $v_2 = 50\%$ . Obe pumpe se nalaze u režimu najniže brzine.



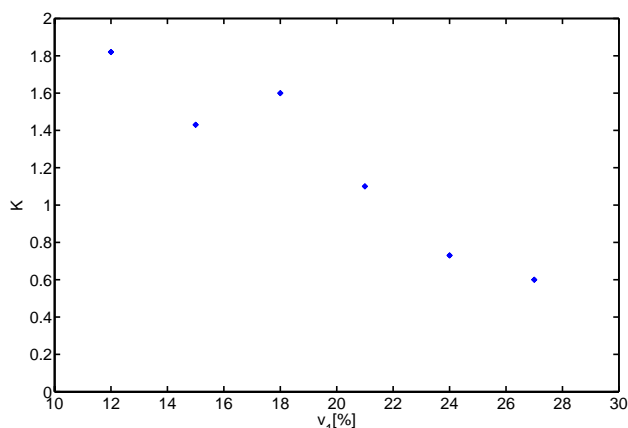
Slika 4. Odskočni odzivi temperature potrošača  $T_4$  u zavisnosti od upravljanja ventila  $v_1$  u primarnom kolu, u opsegu od 9% do 30% otvorenosti, pri otvorenosti ventila  $v_2$  u sekundarnom kolu od  $v_2 = 30\%$ . Obe pumpe se nalaze u režimu najniže brzine.

Na osnovu ovih odziva, određeno je statičko pojačanje sistema (za ova dva radna režima), koje je prikazano na Slikama 5 i 6 u zavisnosti od otvorenosti ventila  $v_2$  u sekundarnom kolu,  $v_2 = 50\%$  i  $v_2 = 30\%$ , respektivno. Sa ovih grafika, evidentna je nelinearnost procesa i vrlo brzo zasićenje procesa koje nastupa već pri upravljanju  $v_1 = 30\%$ . Pojava oscilacija vezana je za dvokoračno upravljanje temperaturom grejača u

primarnom toku, koje je izraženije pri višim temperaturama, kada je perioda uključenja i isključenja grejača znatno kraća, kao i veća amplituda oscilacija temperature kako u primarnom, tako i u sekundarnom toku.

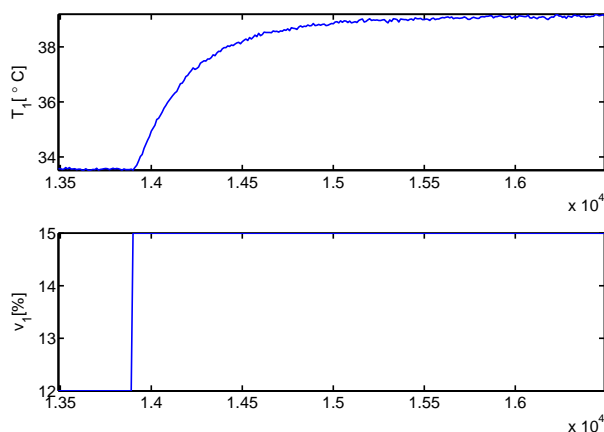


Slika 5. Statičko pojačanje sistema za otvorenost ventila u sekundarnom kolu  $v_2 = 50\%$ .



Slika 6. Statičko pojačanje sistema za otvorenost ventila u sekundarnom kolu  $v_2 = 50\%$ .

Nakon određivanja radnog režima, izvršena je identifikacija parametara FOPDT modela, na osnovu odskočnog odziva (Slika 7) kao što je prikazano pravilima R0-R2. Određeno je



Slika 7. Odskočni odziv sistema u okolini nominalnog režima  $T_4 = 37^\circ C$ , otvorenost ventila u sekundarnom kolu  $v_2 = 50\%$

pojačanje procesa, vremenska konstanta i transportno kašnjenje procesa. Zatim se pristupilo projektovanju PI regulatora, po SRT metodi, a kako se želelo postizanje performansi u zatom režimu rada, usvojeno je da je parametar  $\mu = 0.54$ . U slučaju da se želi robusna regulacija u širokom opsegu radnih režima, potrebno je usvojiti manje vrednosti parametra  $\mu$ , do  $\mu = 0.32$ .

Za projektovani PI regulator, prikazan je eksperiment u zatvorenoj sprezi pri promeni reference sa  $T_4 = 37^\circ C$  na  $T_4 = 40^\circ C$ , a zatim vraćanje na referencu  $T_4 = 37^\circ C$ . U trenutku  $t = 5200 \text{ sec}$  uveden je poremećaj u vidu promene protoka sekundarnog kola sa  $v_2 = 50\%$  na  $v_2 = 40\%$ . Regulator se uspešno izborio sa ovim poremećajem.

Pokazano je da se za veoma kratko vreme može isprojektovati jednostavan PI regulator koji će zadovoljiti visoke performanse i robusnost.

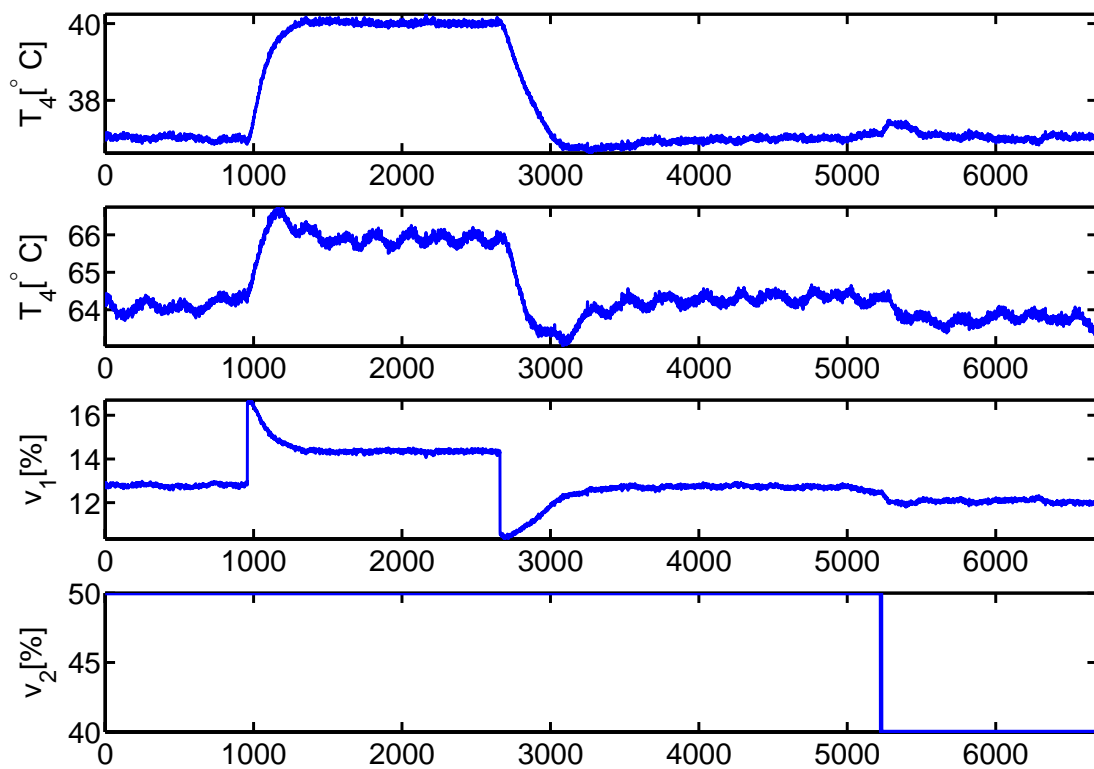
## REFERENCES

- [1] S. Yamamoto and I. Hashimoto, "Recent status and future needs: The view from japanese industry," in *Proceedings of the fourth International Conference on Chemical Process Control* (Arkun and Ray, eds.), (Texas), Chemical Process Control – CPCIV, 1991.
- [2] W. L. Bialkowski, "Dreams versus reality: A view from both sides of the gap," *Pulp and Paper Canada*, vol. 11, pp. 19–27, 1994.
- [3] M. R. Mataušek and G. S. Kvaščev, "A unified step response procedure for autotuning of pi controller and smith predictor for stable processes," *Journal of process control*, vol. 13, pp. 787–800, 2003.
- [4] Z. Palmor and M. Blau, "An auto-tuner for smith dead-time compensator," *Int. Journal of Control*, vol. 60, pp. 117–135, 1994.
- [5] S. Majhi and D. Atherton, "Obtaining controller parameters for a new smith predictor using autotuning," *Automatica*, vol. 36, pp. 1651–1658, 2000.
- [6] T. Hagglund, "A predictive pi controller for processes with long deadtimes," *IEEE Contr. Syst. Magazine*, no. 12, pp. 57–60, 1992.
- [7] D. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal model control for pid controller design," *Ind. Eng. Process des. dev.*, vol. 25, pp. 252–265, 1986.
- [8] W. Bialkowski, *The control handbook, ch. Control of the pulp and paper making process*, pp. 1219–1242. CRC Press Inc., 1996.

**Abstract** – In this paper a short review of tuning procedure for PI controller based on step response is given. Experimental verification of this procedure is based on experiment on Feedback Temperature Process Rig 38-600. It is shown that is possible, in a short time, to tune PI controller, with high performance and robustness.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF SRT TUNING PROCEDURE FOR PI CONTROLLER

G. Kvaščev, B. Dačić, S. Turajlić



Slika 8. Eksperiment u zatvorenoj sprezi.  $T_4$  - temperatura u sekundarnom kolu,  $T_1$  - temperatura u primarnom kolu,  $v_1$  - upravljanje ventilom u primarnom kolu,  $v_2$  - upravljanje ventilom u sekundarnom kolu