

# Primena modifikovane fazno zaključane petlje za adaptaciju sistema upravljanja temperaturnih procesa

Milica P. Jovanović, Maja B. Trumić, Tomislav B. Šekara

Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu, Srbija

[jovanovicpmilica@gmail.com](mailto:jovanovicpmilica@gmail.com), [majat@hotmail.rs](mailto:majat@hotmail.rs), [tomi@etf.rs](mailto:tomi@etf.rs)

**Sažetak**— U radu je prikazana primena modifikovane fazno zaključane petlje (PLL) za karakterizaciju temperaturnog procesa i adaptaciju sistema automatskog upravljanja (SAU) istog procesa. Bez prekidanja regulacione konture određeni su kritično pojačanje procesa  $k_u$ , kritična učestanost  $\omega_u$ , ugao tangente Nikvistove krive  $\varphi$  u kritičnoj tački i statičko pojačanje sistema  $G_p(0)$ . Na osnovu procenjenih parametara dobijen je model procesa pomoću kojeg su projektovani optimalni PI i PID kontroleri, u cilju adaptacije postojećeg SAU procesa, i testirani na realnom procesu.

**Ključne reči**— karakterizacija procesa; modifikovana fazno zaključana petlja; PI regulator; PID regulator

## I. UVOD

U industriji je često nepoznata funkcija prenosa sistema koji treba regulisati. U cilju projektovanja regulatora, koji uspešno prati referencu i potiskuje poremećaj, neophodno je dobro poznavanje parametara procesa.

Ziegler i Nichols su ostvarili značajan napredak polovinom 20. veka pronalaskom veze između odziva sistema na neprigušene oscilacije i parametara PID kontrolera [1]. Åström i Hägglund konstruišu prvi relejni eksperiment 1984. [2], koji uprkos brojnim manama nalazi mesto u industriji zahvaljujući brznoj identifikaciji procesa. Netačnost konvencionalnog relejnog eksperimenta pri šumu, prisustvu poremećaja i izobličenjima, kao i potrebu za prekidom regulacione konture uspeva da se prevaziđe u [3] i [4] primenom fazno zaključane petlje za identifikaciju procesa.

Fazno zaključana petlja prvi put se pominje krajem 20. veka kada je korišćena za detekciju frekvencijski moduliranih signala i zatvaranje povratne sprege po brzini. Cilj fazno zaključane petlje je da za zadatu fazu sistema  $\theta_{ref} = \arg\{G_p(i\omega)\}$  odredi učestanost  $\omega$ .

Poželjno je da se već postojeći kontroler koji reguliše proces adaptira bez zaustavljanja procesa i prekida regulacije. U radu je korišćena fazno zaključana petlja za karakterizaciju procesa projektovana prema radu [5]. Za razliku od [6] gde je u modifikovanom relejnom eksperimentu korišćen proporcionalni kontroler, za inicijalnu regulaciju procesa u ovom radu je korišćen PI kontroler.

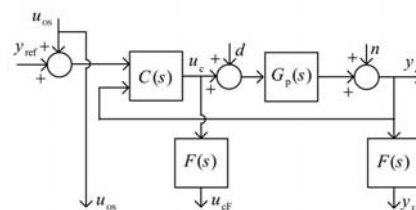
Eksperimentalno je izvršena karakterizacija temperaturnog procesa (sušare) koji ima veliku primenu u prehrambenoj,

hemijskoj, tekstilnoj, drvnoj industriji, termoelektranama itd. Dobijeni parametri : kritično pojačanje  $k_u$ , kritična učestanost  $\omega_u$ , ugao tangente Nikvistove krive  $\varphi$  u kritičnoj tački i  $A = \omega_u k_u G_p(0) / (1 + k_u G_p(0))$  određuju funkciju prenosa modela sušare :

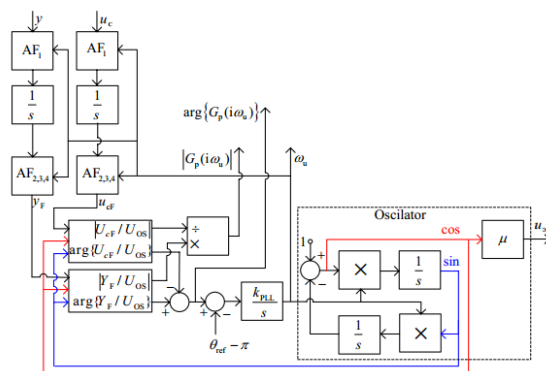
$$G_m(s) = \frac{A\omega_u e^{-\tau s}}{s^2 + \omega_u^2 - A\omega_u e^{-\tau s} k_u}, \tau = \frac{\varphi}{\omega_u}, \omega_u = \omega_\pi \quad (1)$$

gde je  $\arg(G(i\omega_\pi)) = -\pi$ .

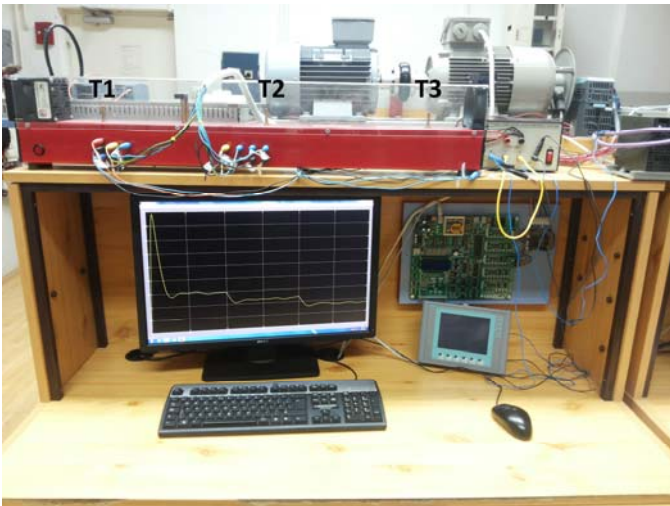
Postupak karakterizacije korišćenjem modifikovane fazno zaključane petlje opisan je u poglavlju II za proces sa tri različita transportna kašnjenja. Dobijeni model procesa omogućava projektovanje optimalnih PI i PID kontrolera pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na merni šum, [7], a zatim su za svako transportno kašnjenje uporedno prikazani dobijeni odzivi i upravljanja sistema u poglavlju III. Testirana je robusnost regulacije sa PID kontrolerom.



Slika 1. Sistem u zatvorenoj sprezi sa regulatorom koji se povezuje sa PLL-om



Slika 2. Šema sa modifikovanim PLL-om za karakterizaciju procesa, gde su AF adaptivni filtri tipa propusnika opsega, koji vode u blokove za određivanje amplitude i faze procesa iz [5]



Slika 3. Eksperimentalna postavka temperaturnog procesa

## II. KARAKTERIZACIJA PROCESA PRIMENOM MODIFIKOVANE FAZNO ZAKLJUČANE PETLJE

Karakterizacija parametara temperaturnog procesa je vršena kao što je prikazano u strukturnom blok dijagramu na Sl. 1 i Sl. 2. Temperaturni proces za koji je vršena karakterizacija prikazan je na Sl. 3. Aparatura se sastoji od cevaste komore u kojoj se nalaze tri senzora temperature, grejač i ventilator. Grejač i ventilator su smešteni na jednom kraju komore, dok je suprotni kraj komore otvoren. Senzori su raspoređeni tako što se prvi nalazi blizu grejača, drugi je na sredini komore, dok je treći neposredno do otvora komore. Na Sl. 3 su označeni sa  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$  i predstavljaju tri različita transportna kašnjenja procesa. Uzima se da tri različita transportna kašnjenja opisuju tri procesa  $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  i  $G_{p3}$ .

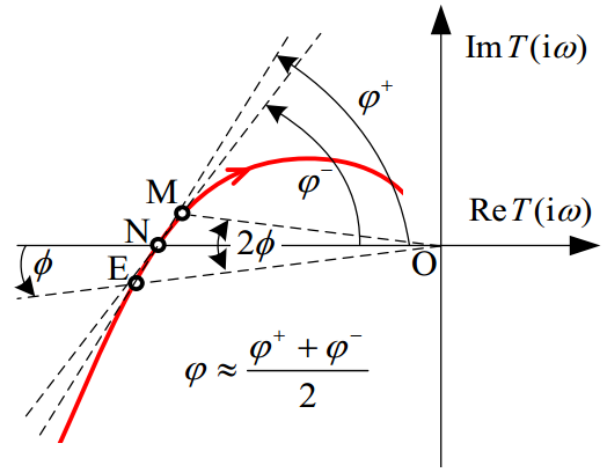
Upravljanje procesom se obavlja promenom napona grejača u opsegu od 0 do 10 V, upravljanje ventilatorom promenom napona od 0 do 10 V, a temperatura sa senzora se dobija u opsegu od 0 do 100 °C.

Karakterizacija je izvršena za sva tri procesa sa različitim transportnim kašnjenjem i posmatran je uticaj kašnjenja na dobijene parametre modela sistema. Parametri modela procesa (1) koji su procenjeni su  $k_u$ ,  $\omega_u$ ,  $\varphi$  i  $G_p(0)$ . Parametar  $G_p(0)$  je statičko pojačanje procesa i određuje se eksperimentalno kao  $G_p(0) = \Delta r / \Delta u$ , gde je  $\Delta r$  mala promena referentne temperature, a  $\Delta u$  promena upravljanja prilikom promene reference.

Za zadatu referencu faznog stava  $\theta_{ref} = -\pi$  dobija se kritično pojačanje  $k_u$  i kritična učestanost  $\omega_u$ . Primenom metode tangenti, prikazane na Sl. 4 i obrađene u radovima [7]–[9], eksperimentalno se dobija ugao  $\varphi$ . Relacija na osnovu koje je procenjen ugao je :

$$\varphi \approx \frac{\varphi^+ + \varphi^-}{2}, \quad (2)$$

$$\varphi^\pm = \arctan\left(\frac{\rho^\pm \sin \phi^\pm}{\rho^\pm \cos \phi^\pm - 1}\right), \quad 0 < \varphi^\pm < 2\pi, \quad \rho^\pm = \frac{k_u}{k_u^\pm}. \quad (3)$$



Slika 4. Procena parametra  $\varphi$  iz tri tačke na Nikvistovoj krivi [6]–[8]

gde je  $\square^+ = \square$ ,  $\square^- = -\square$ ,  $\square > 0$ ,  $k_u = 1/|G_p(i\omega_u^\pm)|$  i iskustveno određena vrednost za  $\square$  koja iznosi  $\pi/18$ .

Na osnovu jednačine (1) potrebno je za svaki model proceniti i transportno kašnjenje  $\tau$  koje će biti korišćeno prilikom izračunavanja parametara kontrolera.

Mana ove metode je određivanje parametara  $k_{PLL}$ . Parametar  $k_{PLL}$  je specifičan za svaki proces i moguće ga je samo odrediti metodom pokušaja i pogreški. Parametar  $\mu$  se određuje tako da izlaz poseduje male oscilacije. Potrebno je da oscilacije budu dovoljno veće od šuma procesa, a opet dovoljno male da se vide promene na izlazu tako da ne naruše regulacioni proces.

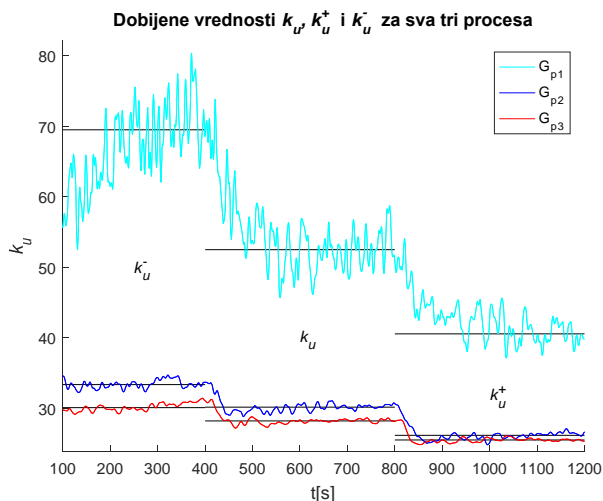
Pronađena vrednost za parametar  $k_{PLL} = 0.05$ . Parametar  $\mu$  se povećava sa količinom šuma kojoj je senzor izložen. Najmanja vrednost  $\mu=1$  je za drugi proces jer je on najmanje izložen šumu u sredini cevi. Najveća vrednost  $\mu=3$  je za prvi proces zato što je on najbliži ventilatoru, dok je za treći proces  $\mu=2$ .

Na Sl. 5 i Sl. 6 su prikazane vrednosti parametara  $k_u$ ,  $k_u^+$ ,  $k_u^-$ ,  $\omega_u$ ,  $\omega_u^+$  i  $\omega_u^-$  dobijene PLL karakterizacijom procesa sa tri transportna kašnjenja.

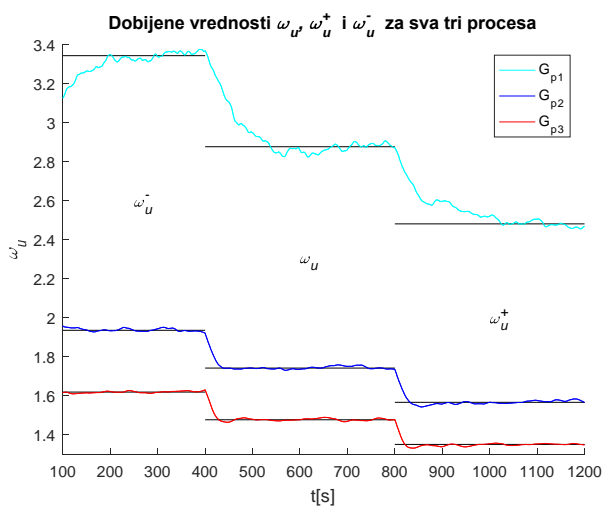
Usrednjavanjem dobijenih vrednosti kritičnog pojačanja i kritične učestanosti, u tabeli 1 prikazani su finalni parametri.

TABELA 1. PROCENJENI PARAMETRI MODELA PROCESA  $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  I  $G_{p3}$

Procenjeni parametri	$k_u$	$\omega_u$	$A$	$\tau$
$G_{p1}$	52.4928	2.8754	2.7926	0.2020
$G_{p2}$	30.2107	1.7412	1.6501	0.5575
$G_{p3}$	28.2627	1.4766	1.3950	0.7676



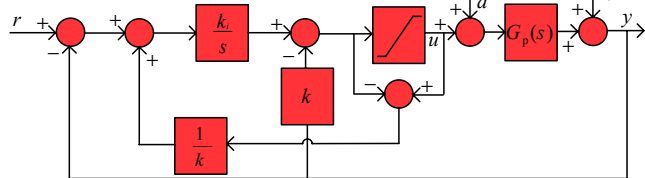
Slika 5. Prikaz parametara  $k_u$ ,  $k_u^+$  i  $k_u^-$  za sva tri procesa



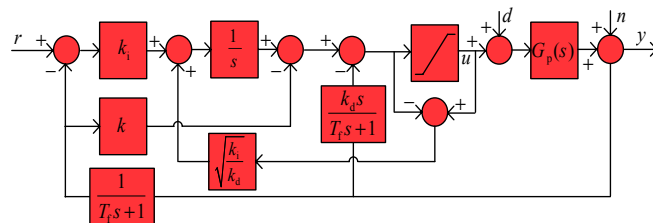
Slika 6. Prikaz parametara  $\omega_u$ ,  $\omega_u^+$  i  $\omega_u^-$  za sva tri procesa

### III. ADAPTACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA

Struktura SAU sa PI kontrolerom, koja je regulisala temperaturni proces pri njegovoj karakterizaciji je sporo pratila referencu i slabo potiskivala poremećaj. Na osnovu dobijenih parametara iz prethodnog poglavlja projektovani su optimalni SAU sa PI i PID kontrolerima, čiji su strukturni blok dijagrami prikazani na Sl. 7 i Sl. 8.



Slika 7. Strukturni blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa PI regulatorom u kome je uvedena zaštita od navijanja integratora



Slika 8. Strukturni blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa PID regulatorom u kome je uvedena zaštita od navijanja integratora

Regulatori su projektovani optimalno pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na merni šum na osnovu [7]-[9].

Za maksimalnu vrednost funkcije osetljivosti uzeto je  $M_s=2$ . Maksimalna vrednost funkcije osetljivosti na merni šum je  $M_n=2k_u$ . Parametri PI i PID kontrolera dati su u tabeli 2.

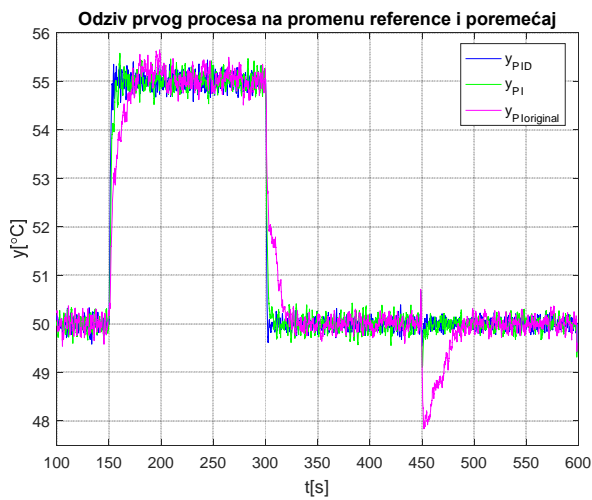
TABELA 2. PARAMETRI PI/PID REGULATORA ZA PROCESSE  $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  I  $G_{p3}$

Parametri	$k$	$k_i$	$k_d$	$T_f$
$G_{p1}$	10.0257	4.3960	-	-
	26.8202	16.3365	10.6520	0.1015
$G_{p2}$	10.0467	3.2824	-	-
	13.6073	4.8835	3.4186	0.0566
$G_{p3}$	10.7608	3.0196	-	-
	12.7984	3.4513	2.1532	0.0381

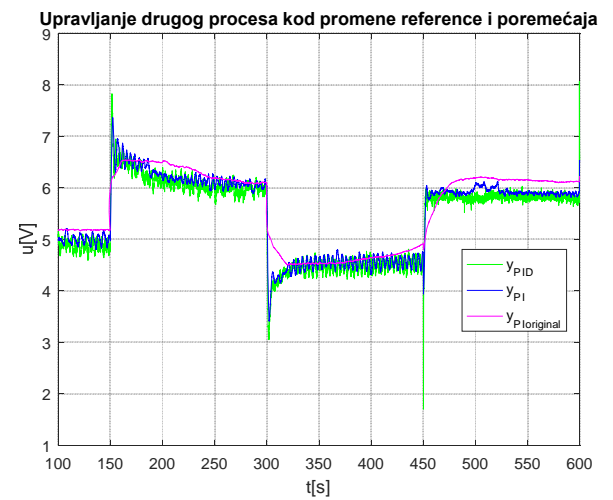
Temperaturni proces je doveden u nominalni režim rada na  $50^\circ\text{C}$ , a zatim je testiran odziv na pozitivnu promenu reference u  $t=150$  s i negativnu promenu reference u  $t=300$  s od  $5^\circ\text{C}$ , kao i na dejstvo poremećaja u  $t=450$  s, koje je realizovano povećavanjem brzine ventilatora (hlađenjem). Dobijeni odzivi sva tri procesa, kao i odgovarajuća upravljanja prikazani su od Sl. 9 do Sl. 14.

Za sva tri procesa se može zapaziti na osnovu odziva sistema da su adaptirani PI i PID kontroleri brži i da bolje potiskuju poremećaj u odnosu na početni PI kontroler. Za prvi proces se može primetiti na osnovu odziva i upravljanja sistema da poseduje najviše šuma u odnosu na druga dva procesa. Sistem automatskog upravljanja sa PID kontrolerom, za razliku od projektovanog SAU sa PI kontrolerom, ima malo brži odziv i brže potiskuje poremećaj ali po cenu jačeg upravljanja.

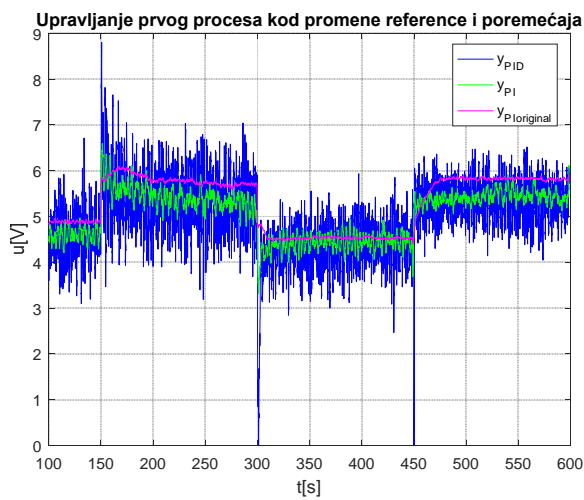
Pokazano je da je sistem automatskog upravljanja sa PID regulatorom drugog procesa robusan tako što je testiran za regulaciju trećeg procesa. Na Sl. 15 i Sl. 16 se može videti da su odzivi i upravljanja ova dva sistema jako slični.



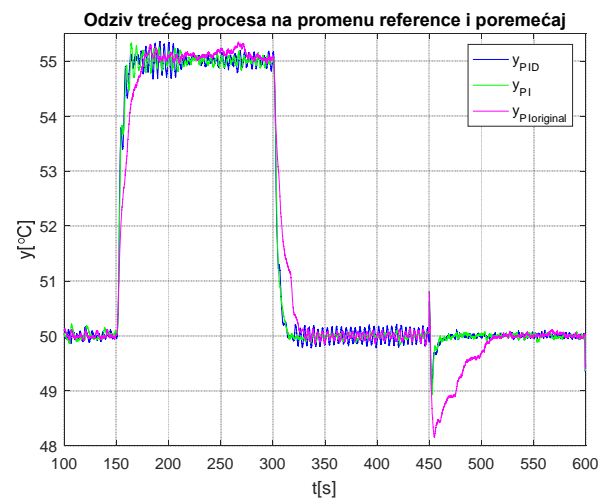
Slika 9. Odziv prvog procesa na promenu reference i poremećaj



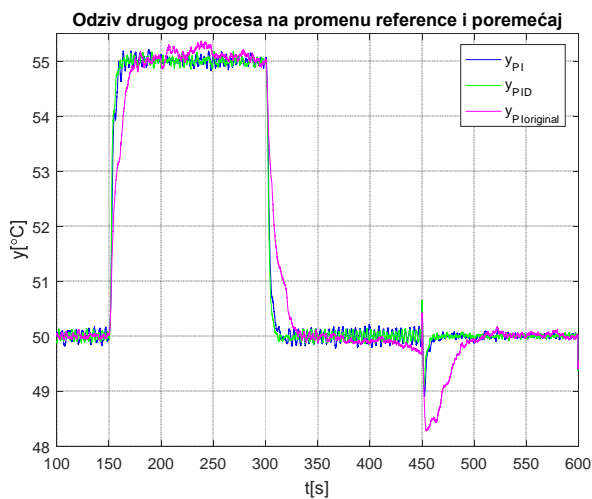
Slika 12. Upravljanje drugog procesa kod promene reference i poremećaja



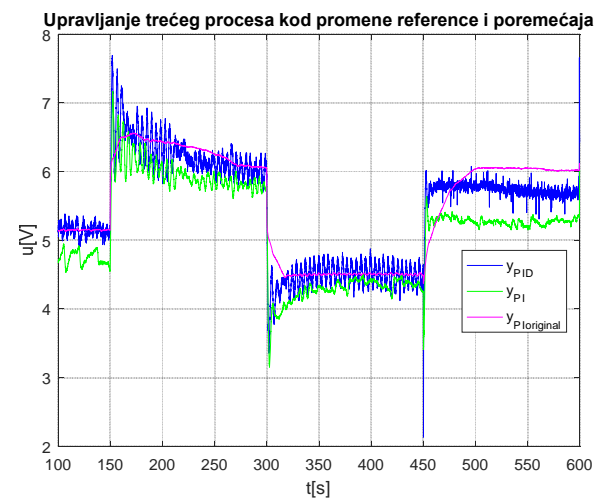
Slika 10. Upravljanje prvog procesa kod promene reference i poremećaja



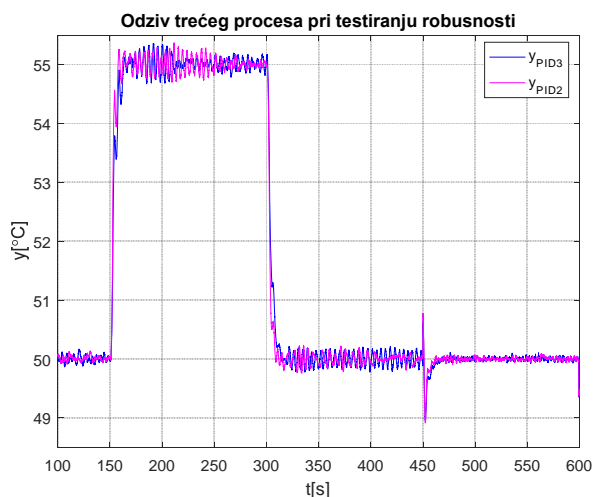
Slika 13. Odziv trećeg procesa na promenu reference i poremećaj



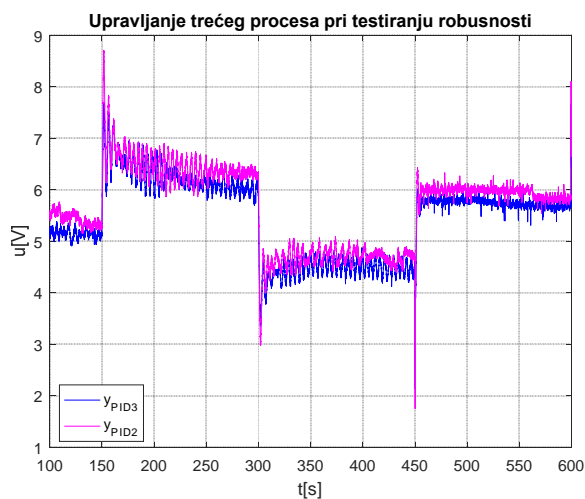
Slika 11. Odziv drugog procesa na promenu reference i poremećaj



Slika 14. Upravljanje trećeg procesa kod promene reference i poremećaja



Slika 15. Odziv trećeg procesa pri testiranju robusnosti kada se primeni PID projektovan za drugi proces na promenu reference i dejstvo poremećaja



Slika 16. Upravljanje trećeg procesa pri testiranju robusnosti kada se primeni PID projektovan za drugi proces kod promene reference i dejstva poremećaja

#### IV. ZAKLJUČAK

Pomoću modifikovane fazno zaključane petlje karakterizovan je temperaturni proces sa tri različita transportna kašnjenja. Ova metoda je pogodna zbog toga što nije potrebno prekidati regulacionu konturu i poznavati linearni regulator. Procenjeni parametri modela procesa su iskorišćeni za dobijanje parametara PI i PID kontrolera. Na osnovu dobijenih grafika odziva i upravljanja sistema može se

zaključiti da projektovani kontroleri ostvaruju zadovoljavajuće performanse i robusnost. Uoprednom analizom se zaključuje da je SAU sa PI kontrolerom prihvatljiviji od onog sa PID kontrolerom po pitanju varijacije upravljanja i da su im odzivi slični. Za optimalan izbor regulacije ovog tipa temperaturnog procesa odabran je PI kontroler.

#### LITERATURA

- [1] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-765, 1942.
- [2] K.J. Åström, T. Häggglund, Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica*, vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [3] J. Crowe, M.A. Johnson, Process identifier and its application to industrial control, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 147, pp.196-204, 2000.
- [4] D. W. Clarke, J. W. Park, "Phase-locked loops for plant tuning and monitoring". *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, Vol. 150, pp. 155-169, 2003.
- [5] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Robusna identifikacija procesa primjenom fazno zaključane petlje, *Infoteh-Jahorina*, vol. 10. Ref. A-4, pp. 18-21, Mart 2011.
- [6] N. Lukić, J. Dragojević, Z. Gordić, Regulacija temperaturnog procesa identifikovanog modifikovanim relearnim eksperimentom, *Infoteh-Jahorina*, vol. 15, p. 18-21, Mart 2016.
- [7] M.R. Mataušek, T.B. Šekara, PID controller frequency-domain tuning for stable, integrating and unstable processes, including dead-time, *J. Process Control* vol. 21, pp. 17-27, 2011.
- [8] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization, *J. Process Control* vol. 20, pp. 360-363, 2010.
- [9] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Classification of dynamic processes and PID controller tuning in a parameter plane, *J. Proc. Control* vol.21 pp. 620-626, 2011.

#### ABSTRACT

In the paper is presented application of the robust phase-locked loop (PLL) for characterization of the temperature process and the control system adaptation. Without interrupting the control loop ultimate amplification  $k_u$ , ultimate frequency  $\omega_u$ , angle  $\varphi$  of the tangent line to the Nyquist curve in the ultimate frequency and static gain of the system  $G_p(0)$  are determined. Optimal PI and PID controllers are designed on the basis of estimated parameters, with aim of the existing control system adaptation, and then tested for the real process.

#### APPLICATION OF MODIFIED PHASE-LOCKED LOOP FOR TEMPERATURE PROCESS CONTROL SYSTEM ADAPTATION

Milica P. Jovanović, Maja B. Trumić, Tomislav B. Šekara