

Uporedna analiza modifikovanog Smitovog prediktora i optimalnog PI regulatora za adaptaciju sistema upravljanja primenom fazno zaključane petlje za temperaturne procese sa dominantnim transportnim kašnjenjem

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

Šekara

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu, Srbija

majat@hotmail.rs, jovanovicpmilica@gmail.com,
tomi@etf.rs

Marko Bošković

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, BIH

marko.boskovic@etf.unssa.rs.ba

Sažetak—U radu je prikazana primena Smitovog prediktora i optimalnog PI regulatora za adaptaciju regulacije temperaturnog procesa (sušare) u slučaju kada je transportno kašnjenje procesa dominantno. Sistem je karakterizovan primenom fazno-zaključane petlje, a zatim je određen model procesa na osnovu procenjenih parametara: kritičnog pojačanja procesa, kritične učestanosti, ugla tangente Nikvistove krive u kritičnoj tački i statičkog pojačanja sistema. Smitov prediktor i PI kontroler su projektovani pomoću procenjenih parametara modela procesa a potom testirani na realnom sistemu.

Ključne reči—karakterizacija procesa; modifikovana fazno zaključana petlja; Smitov prediktor; PI regulator

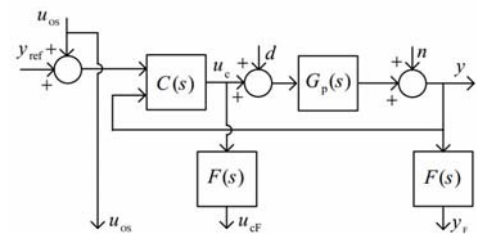
I. UVOD

Temelje karakterizacije procesa u cilju optimalne regulacije postavili su Ziegler i Nischols, [1]. Relejni eksperiment i fazno zaključana petlja (PLL), [2] i [3], predstavljaju unapređene metode karakterizacije procesa.

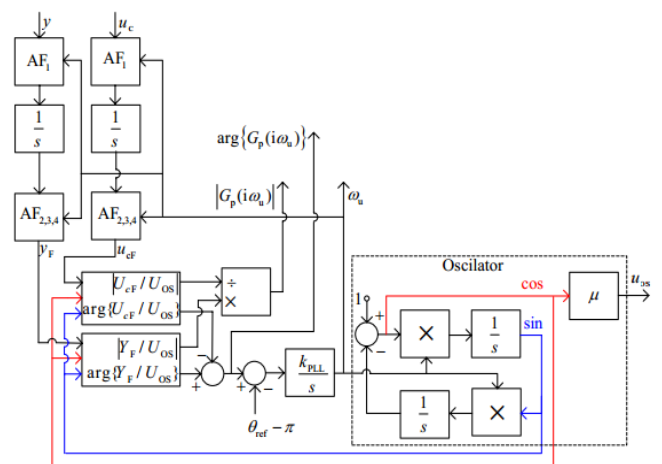
U radu je karakterizacija temperaturnog procesa izvršena pomoću modifikovane fazno zaključane petlje, [4]. Ova metoda omogućuje dobijanje procenjenih parametara modela procesa bez prekidanja regulacione konture. Takođe, nije neophodno poznavati parametre inicijalnog kontrolera procesa.

Pri zadatoj referenci relativne faze θ_{ref} , PLL metoda određuje učestanost ω za koju je $\theta_{ref} = \arg(G_p(i\omega))$. Ako je faza $\theta_{ref} = -\pi$, dobija se kritična učestanost ω_u . Posredno, pronalazanjem modula funkcije prenosa modela sistema i njegovom inverzijom, određuje se kritično pojačanje procesa k_u . Vremenske konstante procesa i transportno kašnjenje procenjuju se na osnovu k_u i ω_u .

U industriji proces često poseduje veliko transportno kašnjenje, usled transporta mase, energije i prenosa informacija. U slučaju temperaturnog procesa, senzor može



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 [4]

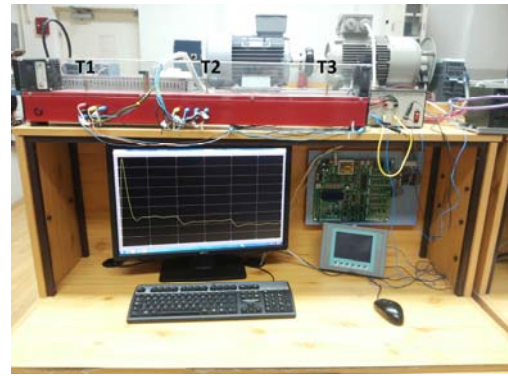
biti jako udaljen od izvora toplote (grejača) te je neophodno vreme da topao vazduh dođe do senzora.

Izazov je kontrolisati procese sa izraženim transportnim kašnjenjem. Ako je transportno kašnjenje t , to znači da

kontroler t sekundi nakon što je poslao upravljanje dobija povratnu informaciju od procesa. Kada postoji kašnjenje može se koristiti prediktivna struktura, poput Smitovog prediktora, koji ima ulogu kompenzatora transportnog kašnjenja u povratnoj grani.

Polovinom 20. veka otkrivena je prva struktura sa Smitovim prediktorom. U radu je korišćena unapređena struktura Smitovog prediktora, [5]. Sistem automatskog upravljanja sa PI kontrolerom projektovan je pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na meri šum, [6].

U poglavlju II opisan je postupak karakterizacije procesa pomoću fazno zaključane petlje. Projektovanje i uporedna analiza projektovanog SAU sa PI regulatorom, Smitovim prediktorom i ručno podešenim PI kontrolerom data je u poglavlju III.



Slika 3. Eksperimentalna postavka temperaturnog procesa

II. KARAKTERIZACIJA TEMPERATURNOG PROCESA PRIMENOM MODIFIKOVANE FAZNO ZAKLJUČANE PETLJE

Karakterizacija parametara temperaturnog procesa je izvršena prema strukturnom blok dijagramu sa Sl. 1 i Sl. 2. za temperaturni proces prikazan na Sl. 3. Za proveru rezultata projektovanja korišćena je sušara ručne izrade, napravljena na Katedri za Signale i sisteme. Laboratorijska postavka se sastoji od komore na metalnoj podlozi u kojoj se nalaze tri platinska senzora temperature Pt100 označena sa T_1, T_2 i T_3 , grejača i ventilatora. Komora je napravljena od krilita, duga je 1 m i ima kvadratni poprečni presek, stranice 8 cm. Grejač snage 400 W sa ventilatorom, upravljani prekidačkim uglom paljenja trijaka, se nalazi na jednom kraju komore, dok je suprotni kraj komore otvoren. Senzori su raspoređeni duž komore kao na Sl.3 i demonstriraju transportno kašnjenje pri eksperimentima.

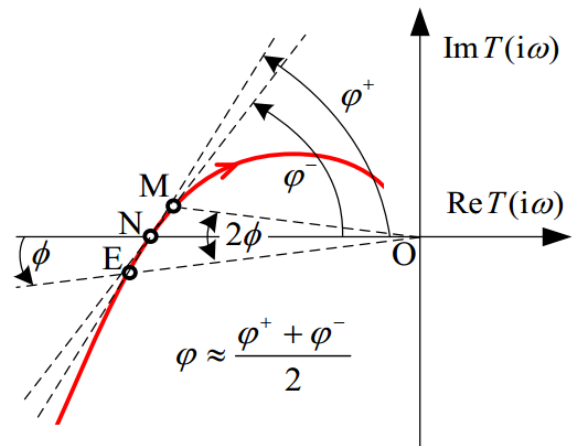
Upravljanje procesom se obavlja promenom napona grejača u opsegu od 0 do 10 V, upravljanje ventilatorom promenom napona od 0 do 10 V, a temperatura sa senzora se dobija analogno u opsegu od 0 do 10 V, što odgovara opsegu od 0 do 100 °C. Maksimalna temperatura koju grejač može postići je 80 °C.

Karakterizacija je izvršena za proces $G_p(s)$ sa srednjim transportnim kašnjenjem (senzor T_2). Funkcija prenosa modela sušare, definisana u [7], je opisana kao:

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

gde je $\arg(G(i\omega_\pi)) = -\pi$ i $A = \omega_u k_u G_p(0) / (1 + k_u G_p(0))$. Parametri modela procesa koji su procenjeni su k_u, ω_u, φ 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 Δr mala promena referentne temperature, a Δu promena upravljanja prilikom promene reference.

Za zadatu referencu faznog stava $\theta_{ref} = -\pi$ dobija se kritično pojačanje k_u i kritična učestanost ω_u . Primenom metode tangenti, prikazane na Sl. 4 i obrađene u radovima [6]–[8], eksperimentalno se dobija ugao φ . Relacija na osnovu koje je procenjen ugao je :



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

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

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

gde je $\phi^+ = \phi$, $\phi^- = -\phi$, $\rho > 0$, $k_u = 1/|G_p(i\omega_u^\pm)|$ i polazeći od [4], metodom pokušaja i pogreški, određena vrednost za ϕ koja iznosi $\pi/18$.

Mana ove metode je mogućnost da se pogrešno identifikuje kritična učestanost. Umesto da se nađe kružna učestanost ω_u kada je fazni stav procesa $-\pi$, veliko kašnjenje može prouzrokovati da se identifikuje učestanost za $\arg(G(i\omega)) = -k\pi$, gde je k pozitivan realan broj. Ovaj nedostatak se može uočiti crtanjem Nikvistove krive. Poteškoću može predstavljati i određivanje parametra k_{PLL} , koji je specifičan za svaki proces i moguće ga je samo iskustveno odrediti. Parametar μ se određuje tako da izlaz poseduje male oscilacije. Potrebno je da oscilacije budu dovoljno velike da bi algoritam radio, ali ne tolike da naruše regulacioni proces.

Iskustveno je pronađena vrednost parametara $k_{PLL} = 0.05$. Parametar $\mu=1$ je eksperimentalno dobijen.

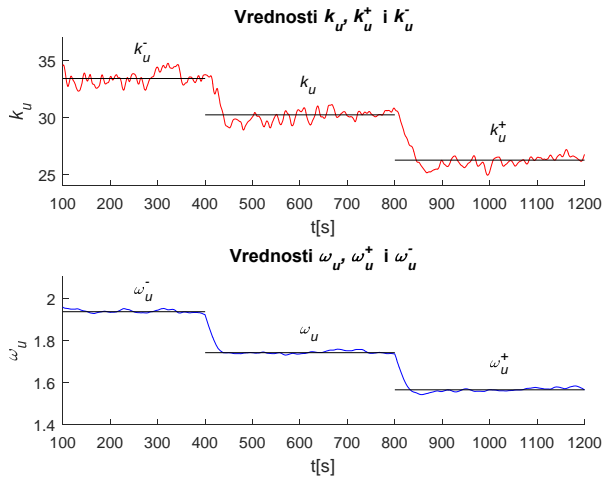
Na Sl. 5 su prikazane vrednosti parametara k_u , k_u^+ , k_u^- , ω_u , ω_u^+ i ω_u^- dobijene PLL karakterizacijom procesa $G_m(s)$ bez dodatog kašnjenja.

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

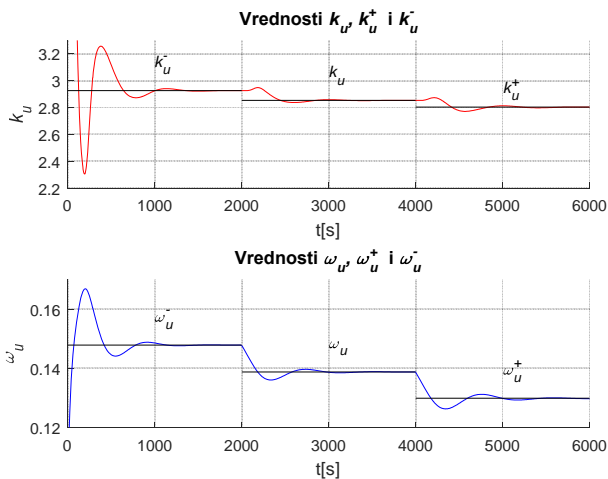
TABELA 1. PROCENJENI PARAMETRI MODELA PROCESA $G_m(s)$ BEZ DODATOG TRANSPORTNOG KAŠNjenja

Procenjeni parametri	k_u	ω_u	A	T
$G_m(s)$	30.2107	1.7412	1.6501	0.5575

U cilju simulacije senzora na velikoj udaljenosti od grejača u linearizovani model, dobijen prethodnom karakterizacijom,



Slika 5. Prikaz parametara k_u , k_u^+ , k_u^- , ω_u , ω_u^+ i ω_u^- za proces $G_m(s)$ bez dodatog transportnog kašnjenja



Slika 6. Prikaz parametara k_u , k_u^+ , k_u^- , ω_u , ω_u^+ i ω_u^- za proces $G_m(s)$ sa dodatim transportnim kašnjenjem

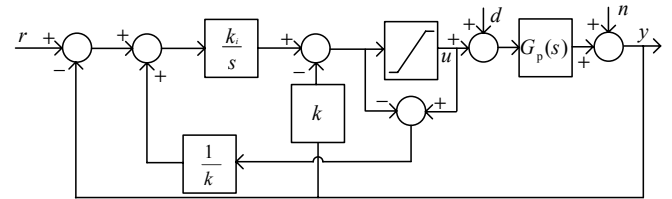
dodaje se transportno kašnjenje od 15 s. Kako dodato transportno kašnjenje menja dinamiku sistema neophodno je ponovo izvršiti karakterizaciju sistema. Procena parametara modifikovanog sistema prikazana je na Sl. 6, a dobijene vrednosti parametara modela $G_{mod}(s)$ su prikazani u tabeli 2.

TABELA 2. PROCENJENI PARAMETRI MODELA PROCESA $G_{mod}(s)$ SA DODATIM TRANSPORTNIM KAŠNjenjem

Procenjeni parametri	k_u	ω_u	A	τ
$G_{mod}(s)$	2.8534	0.1388	0.0909	10.4425

III. ADAPTACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA PRIMENOM PI KONTROLERA I SMITOVOG PREDIKTORA

Početno projektovani PI kontroler za stabilizaciju procesa pri karakterizaciji ne ostvaruje performanse u vidu brzog praćenja reference i potiskivanja poremećaja. Na osnovu dobijenih parametara modifikovanog modela procesa iz prethodnog poglavlja projektovani su optimalni SAU sa PI kontrolerom i Smitovim prediktorom.



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

PI regulator je projektovan optimalno pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na merni šum na osnovu [6]-[8]. Strukturni blok dijagrama SAU sa PI regulatorom prikazan je na Sl. 7.

Maksimalna vrednost funkcije osetljivosti je $M_s=2$, a maksimalna vrednost funkcije osetljivosti na merni šum je $M_n=2k_u$. Dobijeni parametri PI kontrolera dati su u tabeli 3.

TABELA 3. PARAMETRI PI REGULATORA

Parametri	k	k_i
PI	1.0149	0.0722

Za potrebe projektovanja Smitovog prediktora dobijeni model procesa je predstavljen u sledećem obliku:

$$G_{ms}(s) = \frac{e^{-Ls}}{as^2 + bs + c} \quad (4)$$

Data struktura modela je opisana u radu [6]. Parametri modela su dobijeni na osnovu formula :

$$\min_L \left| \arctan\left(\frac{4(\omega_u - A)\sin(\omega_u L) + A\sin(2\omega_u L) + 2A\omega_u L}{4(\omega_u - A)\cos(\omega_u L) + A\cos(2\omega_u L) + 3A}\right) - \varphi \right| \quad (5)$$

$$a = \frac{k_u(\omega_u - A + A\cos(\omega_u L))}{A\omega_u^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{k_u \sin(\omega_u L)}{\omega_u} \quad (7)$$

$$c = \frac{k_u(\omega_u - A)}{A} \quad (8)$$

Vrednosti parametara modela $G_{ms}(s)$ prikazani su u tabeli 4.

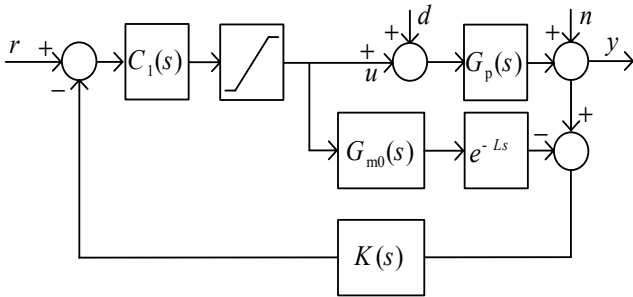
TABELA 4. PROCENJENI PARAMETRI MODELA PROCESA $G_{ms}(s)$

Procenjeni parametri	L	a	b	c
$G_{ms}(s)$	15.3094	0	17.4933	1.4999

Pošto je parametar a nula zaključuje se da je model procesa prvog reda i predstavlja se na sledeći način:

$$G_{ms}(s) = G_{m0}(s)e^{-Ls} = \frac{e^{-Ls}}{bs+c} \quad (9)$$

Na osnovu [5], odabrana je struktura Smitovog prediktora data na Sl. 8.



Slika 8. Strukturni blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa unapređenim Smitovim prediktorom

Dobijeni model procesa $G_{ms}(s)$ je prvog reda, pa regulatori $C_1(s)$ i $K(s)$ imaju sledeću strukturu:

$$C_1(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2} \frac{1}{G_{m0}}, \quad (10)$$

$$K(s) = \frac{\eta s + 1}{\lambda s + 1}. \quad (11)$$

Nepoznate vremenske konstante regulatora su λ i η . Za maksimalnu vrednost funkcije osetljivosti $M_s=1.7$ dobijen je parametar $\lambda=4.648$ u okolini procenjenog transportnog kašnjenja. Parametar $\eta=9.959$ dobija se rešavanjem sledeće jednačine:

$$((\lambda s + 1)^3 - (\eta s + 1)) \Big|_{s=-\frac{1}{T_p}} = 0 \quad (12)$$

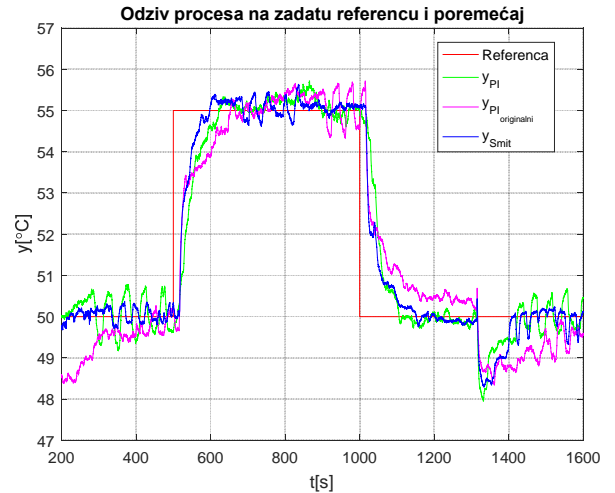
gde je $T_p=b/c$ vremenska konstanta modela procesa.

Dobijeni uporedni odzivi i upravljanja SAU sa PI regulatorom i Smitovim prediktorom prikazani su na Sl. 9 i Sl. 10. Temperaturni proces je doveden u nominalni režim rada na 50 °C, a zatim je testiran odziv na pozitivnu promenu reference u $t=500$ s i negativnu promenu reference u $t=1000$ s od 5 °C, kao i na dejstvo poremećaja u $t=1300$ s, koje je realizovano povećavanjem brzine ventilatora (hlađenjem).

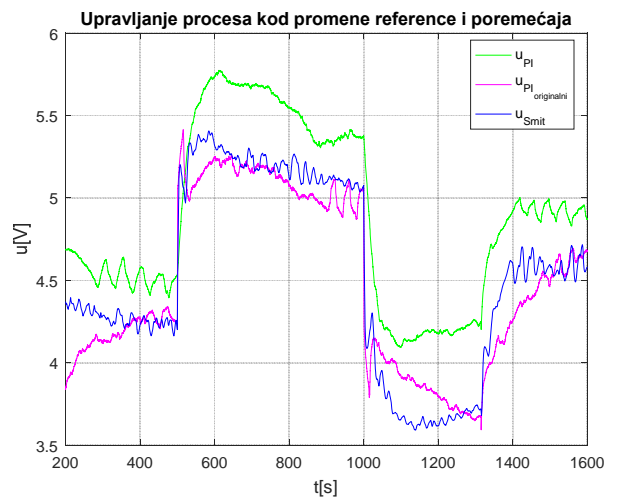
Na Sl. 9 se zapaža da proces SAU sa Smitovim prediktorom ima manju amplitudu oscilacija u nominalnom režimu radu, pre promene reference, za razliku od SAU sa PI kontrolerom. Kada se zada pozitivna promena reference Smitov prediktor omogućuje odziv brži za oko 20 sekundi.

Prilikom otklanjanja poremećaja primećuje se da je SAU sa Smitovim prediktorom brži i da ima manje oscilacija. U poređenju sa originalnim, ručno projektovanim, PI kontrolerom SAU sa Smitovim prediktorom i adaptiranim PI kontrolerom su brži prilikom praćenja reference i otklanjanja poremećaja.

Na Sl. 10, gde je prikazano upravljanje, zapaža se da SAU sa adaptiranim PI kontrolerom ima veće zahteve, ali da ni u jednom slučaju upravljanje ne ulazi u zasićenje.



Slika 9. Odziv procesa na promenu reference i poremećaj



Slika 10. Upravljanje procesa kod promene reference i poremećaja

IV. ZAKLJUČAK

Pomoću modifikovane fazno zaključane petlje karakterizovan je temperaturni proces sa dominantnim transportnim kašnjenjem. 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 kontrolera i Smitovog prediktora. Pregledom dobijenih grafika odziva i upravljanja sistema zapaža se da projektovani kontroleri ostvaruju zadovoljavajuće performanse u vidu praćenja reference i

potiskivanja poremećaja. Uporednom analizom se zaključuje da je Smitov prediktor znatno brži prilikom praćenja reference i otklanjanja poremećaja.

LITERATURA

- [1] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-765, 1942.
- [2] J. Crowe, M.A. Johnson, Process identifier and its application to industrial control, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 147, pp.196-204, 2000.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] T.B. Šekara, Predavanja iz predmeta Distribuirani i frakcioni sistemi upravljanja, 2016.
- [6] 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.
- [7] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization, *J. Process Control* vol. 20, pp. 360-363, 2010.

- [8] 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 Smith predictor and the optimal PI controller for the adaptation of the temperature process regulation with dominant time delay. Model of the process is determined on the basis of these parameters ultimate amplification, ultimate frequency, angle of the tangent line to the Nyquist curve in the ultimate frequency and static gain of the system. Smith predictor and PI controller, designed using model parameters, are tested on the real process.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODIFIED SMITH PREDICTOR AND OPTIMAL PI REGULATOR FOR THE CONTROL ADAPTATION OF THE TEMPERATURE PROCESSES WITH DOMINANT TIME DELAY USING PHASE-LOCKED LOOP

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