

Регулација температурног процеса идентификованог модификованим релејним експериментом

Наталија Лукић^{1,2)}

Јелисавета Драгојевић¹⁾

Завиша Гордић¹⁾

Универзитет у Београду

1) Електротехнички факултет

2) Институт Михајло Пупин

Београд, Србија

natalija.lukic@pupin.rs

jelisavetad7@gmail.com

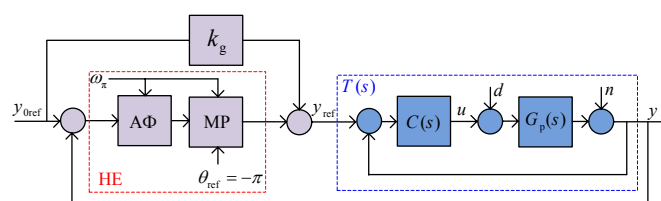
zavisa@etf.bg.ac.rs

Сажетак—У овом раду је представљена метода за идентификацију процеса заснована на модификованом релејном експерименту. Процедура експеримента се изводи над реалним системом у затвореној повратној спреси са пропорционалним регулатором. Процењене су вредности критичне учестаности ω_u , критичног појачања k_u и угла тангенте на Никвистову криву, ϕ , чиме је омогућена карактеризација процеса у номиналном режиму рада. После идентификовања процеса извршено је оптимално пројектовање ПИД регулатора под ограничењима на робусност и осетљивост на мерни шум. Експериментално добијени резултати су адекватно приказани и дискутовани у раду.

Кључне речи- идентификација; модификовани релејни експеримент; ПИД регулатор;

1. УВОД

Познавање природе процеса је од кључне важности за пројектовање одговарајућег регулатора. Значај методе која би омогућила поуздану експерименталну процену динамичких карактеристика процеса је препознат још у првој половини 20. века од стране Зиглера и Николса (Ziegler-Nichols) [1]. Развојем и унапређењем њихове методе бавили су се Остром и Хеглунд (Åström и Hägglund), који су 1984. године представили конвенционални релејни експеримент (КР). Побољшање КР представљено је 1995. године у виду методе модификованог релејног експеримента (МР) којом се отклања утицај виших хармоника на тачност процене [3]. Преостали недостаци КР који су утицали на тачну процену параметара, а пре свега утицај присуства поремећаја оптерећења и мерног шума, успешно су отклоњени увођењем адаптивног филтра АФ типа пропусника опсега [4],[5] у комбинацији са МР. Међутим, методе [1] и [2] подразумевају “краткотрајно” искључење регулатора $C(s)$ из процеса регулације, што је неприхватљиво за велику класу процеса. Ипак и овај недостатак је решен у [4]-[6], модификацијом КР и МР која



Слика 1. Блок шема естиматора k_u , ω_u и ϕ процеса са пропорционалним регулатором $C(s)=k_p$ и нелинеарним елементом НЕ, при чему је $\omega_u = 1/T(0)$, АФ адаптивни филтри типа пропусника опсега у грани са модификованим релејом (МР) из [7]

је примењена на процес $G_p(s)$ у затвореној спреси са пропорционалним регулатором $C(s)$ као у [7].

У оквиру рада извршена је идентификација параметара модела сушаре, као примера система који је распрострањен у различитим областима индустрије. Сушаре се користе на местима где је потребно управљати температуром, влажношћу и протоком ваздуха, а пре свега у прехранбеној, дрвној и хемијској индустрији. Идентификација је обављена применом модификованог релејног експеримента са адаптивним филтром (МР-АФ) [7].

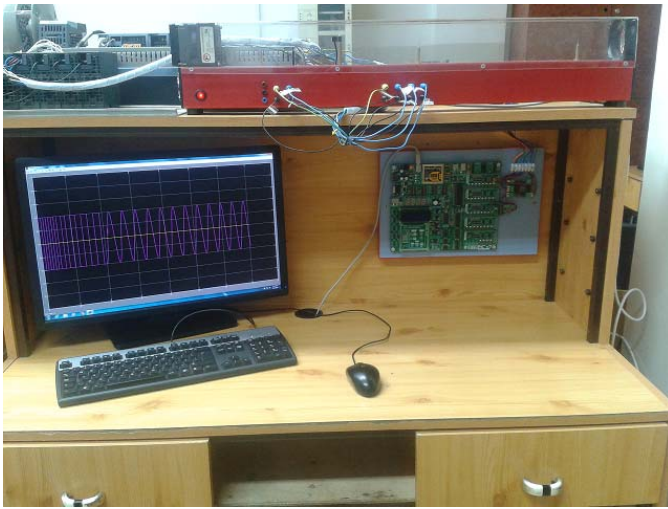
Опис система и ток експеримента дат је у другом поглављу овога рада, као и резултати процене параметара функције преноса модела процеса.

Пројектовање оптималног ПИД регулатора под ограничењима на робусност и осетљивост на мерни шум на основу добијеног модела процеса као и резултати тестирања перформанси регулисаног система су приказани и дискутовани у трећем поглављу [8]-[10]. У закључку су изнесена запажања и коментари везани за спроведени експеримент и коришћену методу регулације.

II. ОПИС ТЕМПЕРАТУРНОГ ПРОЦЕСА И ПРОЦЕДУРЕ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЈУ ПРИМЕНОМ МР-АФ

Експериментална поставка на којој је вршено тестирање се састоји од цевасте коморе на чијем се једном

Овај рад је написан на основу активности реализованих у оквиру пројекта ТР32038 финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.



Слика 2. Апаратура температурног процеса

крају налазе грејач и вентилатор, док је други крај отворен. Дуж коморе постављена су три сензора температуре и један сензор протока ваздуха. Ово се може уочити на апаратури приказаној на Сл. 2.

Идентификација параметара је вршена за температурски процес управљан напоном грејача као што је приказано структурним блок дијаграмом на Сл. 1. Мерења температуре се добијају са сензора постављеног најближе отвору коморе. Циљ експеримента је идентификација параметара k_u , ω_u , φ и $G_p(0)$ функције преноса $G_m(s)$ модела као у раду [7]-[9]:

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

Угао φ се одређује експериментално, применом методе тангенти из [7]-[9] на основу следеће формуле:

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

где су

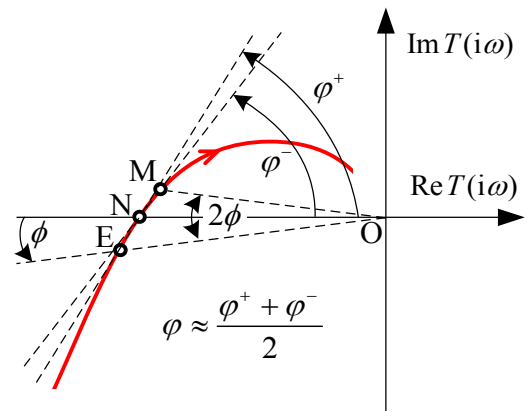
$$\rho^\pm = \frac{k_u}{k_u^\pm}, \phi^+ = \phi, \phi^- = -\phi, \phi > 0, k^\pm = 1/|G_u(i\omega_u^\pm)|$$

Углови \square^+ и \square^- се користе за израчунавање параметара процеса у околини критичне учестаности као на слици Сл. 3. а угао φ рачуна се као средња вредност углова φ^+ и φ^- .

Важна особина МР-АФ методе је то што се приликом њеног извођења не прекида регулациона петља и идентификација се може извршити на процесу који се налази у затвореној спрези са пропорционалним регулатором у номиналном режиму рада. Параметар k_g обезбеђује праћење референце у номиналном режиму рада и рачуна се на основу релације [7].

$$k_g = 1/T(0) \quad (3)$$

где је



Слика 3. Процена параметра φ из три тачке на Никвистовој криви [8],[9]

$$T(0) = \frac{y(0)}{y_{ref}(0)} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{k_g G_p(0)}{1 + k_g G_p(0)} \quad (4)$$

док су вредности параметара A и A_c дефинисане изразима [7]

$$A_c = \frac{\omega_c k_c T(0)}{1 + k_c T(0)}, \quad (5)$$

$$A = \frac{\omega_u k_u G(0)}{1 + k_u G(0)}. \quad (6)$$

Комбинујући једначине (3), (5) и (6) следи

$$A = (1 + 1/k_c) A_c. \quad (7)$$

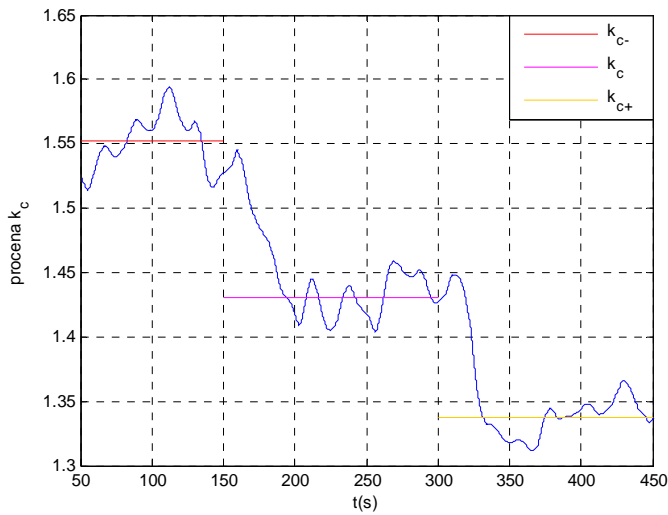
Параметри модела $G_m(s)$ процеса су дати у табели 1 у функцији процењених параметара система $T(s)$.

ТАБЕЛА 1. РЕЛАЦИЈЕ КОЈЕ ПОВЕЗУЈУ ПРОЦЕЊЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА СИСТЕМА $T(s)$ СА ПАРАМЕТРИМА ПРОЦЕСА $G_i(s)$

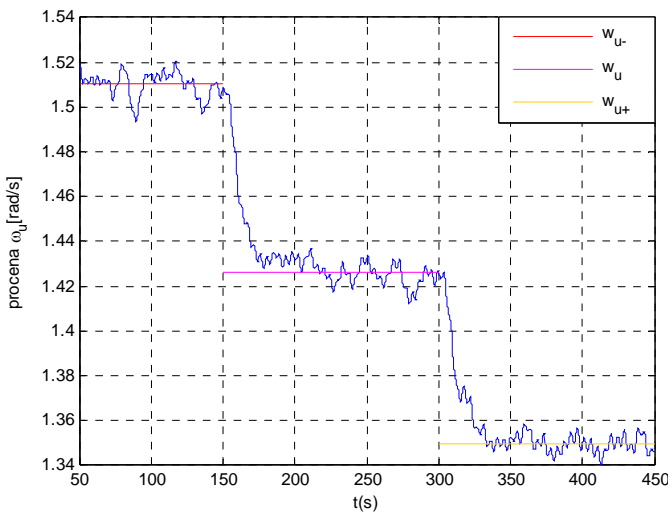
Параметри $T(s)$	k_c	ω_c	A_c	τ_c
Параметри $G_m(s)$	$k_u = (1 + k_c)k_p$	$\omega_u = \omega_c$	$A = (1 + 1/k_c)A_c$	$\tau = \tau_c$

Напоменимо да приликом одређивања k_g може се доћи до лоших резултата услед деловања поремећаја па се зато његова вредност снима за неколико референтних вредности у стационарном стању.

Приликом извођења експеримента искуствено је узето $k_p = 10$, а затим су одређене вредности статичког појачања $T(0)$ чија вредност износи приближно 0,9 односно на основу (3) $k_g = 1,1$. За процену угла φ у три тачке одабрана је вредност $\square^{\square} = \pi/18$ на основу Сл. 3. Експериментални резултати су илустровани на Сл. 4 и Сл. 5 на којима се виде процењене вредности параметара k_c^-, k_c, k_c^+ и $\omega_u^-, \omega_u, \omega_u^+$.



Слика 4. Пресеца параметра k_c^-, k_c, k_c^+



Слика 5. Пресеца параметра $\omega_u^-, \omega_u, \omega_u^+$

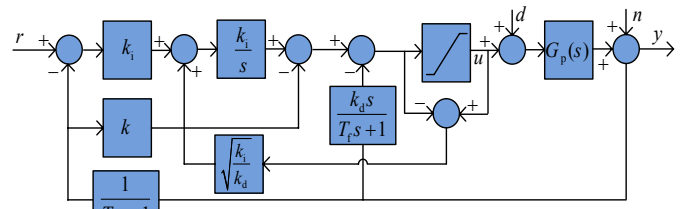
На основу (1)-(7) и табеле 1 добијени су следећи резултати за параметре k_u , ω_u , A и ϕ дате у табели 2

ТАБЕЛА 2. ПРОЦЕЊЕНИ ПАРАМЕТРИ

Процењени параметри	k_u	ω_u	A	ϕ
Вредности	24,3090	1,4261	1,2932	1,1689

III. РЕГУЛАЦИЈА ТЕМПЕРАТУРНОГ ПРОЦЕСА

За регулацију температурног процеса одабран је ПИД регулатор са укљученим елементима против навијања интегралног дејства чија је структура управљања приказана на Сл. 6.



Слика 6. Структурни блок дијаграм система аутоматског управљања са укљученим елементима против навијања интегралног дејства [2]

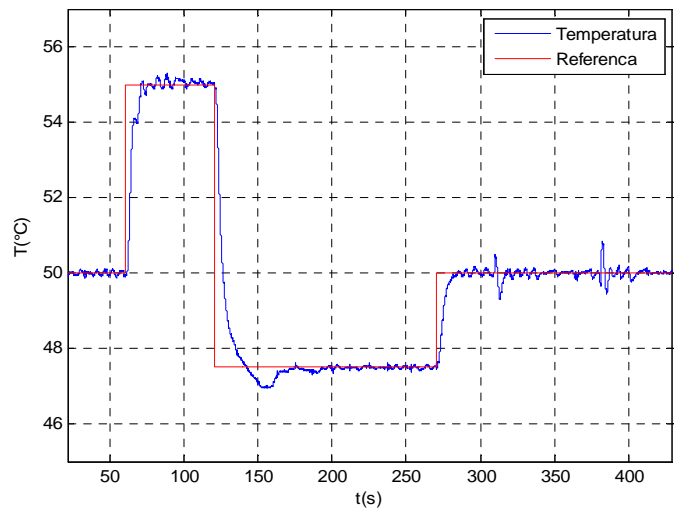
Регулатор ПИД је пројектован оптимално под ограничењима на робусност и осетљивост на мерни шум [8]-[10]. Искуствено је одабрано: максимална вредност функције осетљивости $M_s = \max_{\omega} |1/(1+C(s)G_p(s))| = 2$ и максимална вредност функције осетљивости на мерни шум $M_n = \max_{\omega} |C(s)/(1+C(s)G_p(s))| = 10$.

Израчунати параметри регулатора су приказани у табели 3 на основу којих су добијени експериментални резултати регулације температурског процеса приказаног на Сл. 7.

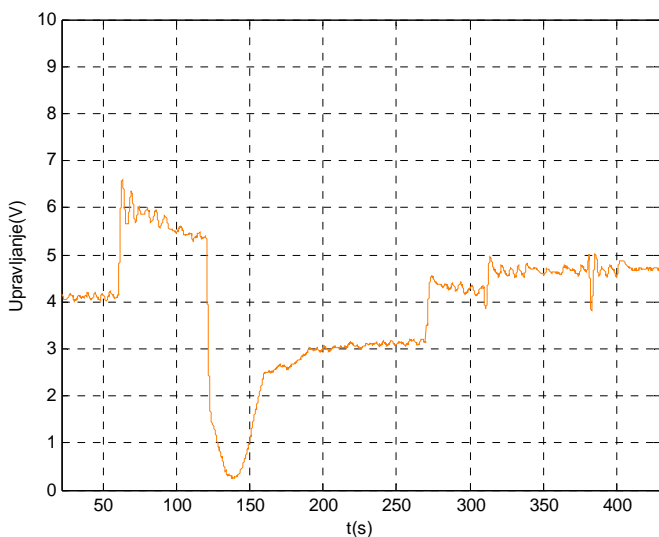
ТАБЕЛА 3. ПАРАМЕТРИ ПИД РЕГУЛАТОРА

Параметар	k	k_d	k_i	T_f
Вредност	8,9500	0,2701	2,5938	0,1136

Управљана величина, температура процеса, као што се види са Сл. 7. адекватно прати задату референтну вредност за дато управљање у дозвољеним границама извршног органа приказано на Сл. 8.



Слика 7. Управљана величина за задату референтну вредност



Слика 8. Управљачка величина

Претходне слике су добијене тако што се термички процес прво налази у номиналном режиму рада, а затим у тренутку $t=60$ s долази до скоковите промене референтне вредности у износу од 10% номиналне вредности, тј. са 50°C на 55°C. После тога, у тренутку $t=120$ s, референтна вредност скоковито опада на 47,5°C и у $t=270$ s се враћа скоковито на номиналну вредност. На Сл. 7 и Сл. 8 могу се уочити и остале перформансе САУ. Праћење референце је остварено са занемарљивим прескоком и одговарајућом брзином одзива. Такође се показује и ефикасно потискивање немерљивог поремећаја, које је изведено физички, укључивањем вентилатора у $t=320$ s и пригушењем струјања ваздуха у $t=380$ s термичког процеса.

IV. ЗАКЉУЧАК

Применом модификованог релејног експеримента извршена је одговарајућа идентификација реалног процеса у затвореној спреси са пропорционалним регулатором. На основу процењених параметара процеса испројектован је оптимални ПИД регулатор и експериментално тестиран на лабораторијској поставци. Добијени резултати показују да систем управљања остварује задовољавајуће перформансе и робусност, односно да у номиналном режиму рада успешно потискује поремећај и прати задату величину са одговарајућом брзином одзива.

ЗАХВАЛНИЦА

Аутори рада се захваљују Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, за финансирање пројекта TR32038 чији је резултат овај рад. Аутори се посебно захваљују професору др Томиславу Шекари на корисним саветима и сугестијама приликом израде овога рада.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-765, 1942. J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [2] K.J. Åström, T. Hägglund, Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica*, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [3] T.H. Lee, Q.G. Wang, K.K. Tan, A modified relay-based technique for improved critical point estimation in process control, *IEEE Trans. Control Syst. Technology*, Vol. 3, pp. 330-337, 1995. R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [4] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Uporedna analiza relejnog eksperimenta i fazno zaključane petlje za određivanje kritične učestanosti i kritičnog pojačanja procesa, *Infoteh-Jahorina*, Vol. 9. Ref. A-2, p. 13-16, Mart 2010. M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [5] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Comparative analysis of the relay and phase-locked loop experiment used to determine ultimate frequency and ultimate gain, *Electronics*, Vol. 14, No. 2, December 2010.
- [6] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, Relay-based critical point estimation of a process with the PID controller in the loop, *Automatica*, Vol. 47, no. 5, pp. 1084-1088, 2011.
- [7] N.D. Pešić, T. B. Šekara, Identifikacija procesa u zatvorenoj sprezi sa proporcionalnim regulatorom, *Infoteh-Jahorina, Bosna I Hercegovina*, Vol. 11, SUP-2., March 2012.
- [8] T. B. Šekara, M.R. Mataušek, Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization, *J. Process Control* vol. 20, pp. 360-363, 2010.
- [9] 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.
- [10] Tomislav B. Šekara, Miroslav R. Mataušek, Classification of dynamic processes and PID controller tuning in a parameter plane, *J. Proc. Control* Vol.21(2011) 620-626.

ABSTRACT

This paper presents a method for identification of process based on a modified relay experiment. The procedure of the experiment was performed on the real system in a closed loop with a proportional controller. Values of the critical frequency ω_c , critical gain k_c and the angle of the tangent to the Nyquist curve ϕ were estimated in order to enable characterization of processes in nominal regime. After the identification of process optimal PID controller was designed under constraints on robustness and sensitivity to measurement noise. The results of experiments are adequately presented and discussed in the paper.

REGULATION OF TEMPERATURE PROCESS IDENTIFIED BY MODIFIED RELAY EXPERIMENT

Наталија Лукић, Јелисавета Драгојевић, Завиша Гордић