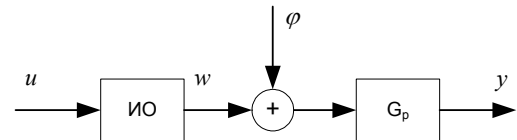


НОВИ ПРИЛАЗ ПРОЈЕКТОВАЊУ ИНДУСТРИЈСКИХ РЕГУЛАТОРА

Александар И. Рибич, *Институт Михајло Пупин, Београд*
 Мирослав Р. Матаушек, *Електротехнички факултет, Београд*

Садржај – У раду је приказан нови прилаз пројектовању регулатора, чији су структура и параметри дефинисани параметрима експериментално одређених модела првог или другог реда, са кашњењем. Дата је упоредна анализа са ПИД регулатором и Смитовим предиктором. Експериментална провера извршена је на термоелектрани «МОРВА».



Слика 1. Процес у отвореној спрези: u – варијација управљања, φ – поремећај, y – варијација излаза, ИО – извршни орган, G_p – процес.

1. УВОД

У индустријској примени система аутоматског управљања (САУ), крајем прошлог и почетком овог века доминирају две чињенице. Прва је да се око 95% повратних спрега у индустрији затвара применом ПИД регулатора [1]. Друга је да «посета постројењима уобичајено показује да је велики број ПИД регулатора лоше подешен» [2, 3]. С обзиром да је анализа стања дата у [1] усвојена у свету као референтна, а да се констатација о неподешености регулатора [2,3] односи на развијене земље, сасвим је сигурно да је већина повратних спрега код нас не лоше, већ изузетно лоше подешена. Преовлађујући оптимизам у стручној јавности, у погледу квалитета рада САУ у нашој индустрији, неутемељен је у стварности. Што је још горе, полазећи од тога да је код нас, за разлику од развијених земаља, на том основном нивоу управљања процесима све решено, пажња се посвећује готово искључиво савременим средствима реализације САУ, у шта спадају савремени извршни органи и сензори, као и рачунарска и комуникациони хардвер. У исто време, у свету, све више напора и ресурса посвећује се изналажењу ефикасних процедура подешавања ПИД регулатора, самосталних или у склопу Смитовог предиктора [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Усвајајући постојеће стање у развијеним земљама као чињеницу, у овом раду се предлаже нови прилаз пројектовању регулатора, чији су структура и параметри дефинисани параметрима експериментално одређених модела првог (FOPDT) или другог (IFOPDT/SOPDT) реда, са кашњењем.

2. ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ПОДЕШАВАЊЕ РЕГУЛАТОРА

Од превасходног значаја за праксу је функционални опис процеса, у околини радног режима, приказан сликом 1. Извршни орган је локално регулисан, односно има статичко појачање $K_{ИО} = 1$, али је $W_{\min} \leq W(t) \leq W_{\max}$.

2.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ

Процес $G_p(s)$ апроксимиран је моделом

$$G_m(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

Ако је $T_2 \neq 0$, претпостављено је да ће пол $p_2 = -1/T_2$, бити скраћен деловањем диференцијалног дејства у повратној грани регулатора [3], односно

$$Y_d(s) = \begin{cases} Y(s), T_2 = 0 \\ \frac{T_2 s + 1}{T_2} Y(s), T_2 \neq 0, \\ 10 \end{cases} \quad (2)$$

те је, према [13], процена поремећаја φ_p дата релацијом

$$\Phi_p(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \left[\frac{T_1 s + 1}{K_0} Y_d(s) - e^{-\tau s} W(s) \right], \quad (3)$$

где је T_f подесив параметар. Нека је затим управљање:

$$U(s) = \frac{1}{K_0} R(s) + K_\alpha [R(s) - Y_d(s)] - \Phi_p(s). \quad (4)$$

Први члан представља feedforward управљање $R(s)/K_0$, други члан представља пропорционално дејство $K_\alpha [R(s) - Y_d(s)]$, а трећим чланом $\Phi_p(s)$ елиминише се дејство поремећаја. Из (3)–(4) добија се регулатор у облику

$$U(s) = K_\beta [R(s) - Y_d(s)] - \frac{K_f s}{T_f s + 1} Y_d(s) + \frac{e^{-\tau s}}{T_f s + 1} W(s), \quad (5)$$

$$K_f = \frac{T_1 - T_f}{K_0}.$$

2.2 ПОДЕШАВАЊЕ

С обзиром да је $K_{HO} = 1$, у линеарној области $W_{\min} < W(t) < W_{\max}$ има се $U(s) = W(s)$ и тада, уз апроксимацију $e^{-\tau s} \approx 1 - \tau s$, следи

$$U(s) = K_1 \frac{T_f s + 1}{T_f s} [R(s) - Y_d(s)] - K_2 Y_d(s), \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{K_\beta T_f}{T_f + \tau}, K_2 = \frac{K_f}{T_f + \tau}. \quad (7)$$

Регулатор подешавамо за дати радни режим, те се узима да је $R(s) = 0$, а релације (6)-(7) свODE се на

$$U(s) = -K_c \left(1 + \frac{1}{T_c s} \right) Y_d(s), \quad (8)$$

$$K_c = K_1 + K_2, T_c = \left(1 + \frac{K_2}{K_1} \right) T_f. \quad (9)$$

На (8)-(9) могу се директно применити недавно предложена модификована правила Ламбда подешавања [2,3]

$$K_c = \frac{T_1}{2K_0 \tau}, T_c = \min\{T_1, 8\tau\}. \quad (10)$$

Када се процес апроксимира моделом (1), параметри регулатора дати су релацијама

$$T_f = \begin{cases} \left(7 + 8 \frac{\tau}{T_1} \right) \tau, & T_1 \geq 8\tau \\ T_1, & T_1 < 8\tau \end{cases}, \quad (11)$$

$$K_\beta = \begin{cases} \frac{7T_1 + \tau}{16K_0 \tau} \cdot \frac{T_f + \tau}{T_f}, & T_1 \geq 8\tau \\ \frac{T_1 + \tau}{2K_0 \tau}, & T_1 < 8\tau \end{cases}. \quad (12)$$

Када се процес апроксимира моделом са интегралним дејством [8, 9, 13] или заиста има интегрално дејство, то значи да је у моделу (1) $\lim_{K_0 \rightarrow \infty, T_1 \rightarrow \infty} \frac{K_0}{T_1} = K'$, односно из (1) следи модел

$$G_m(s) = \frac{K' e^{-\tau s}}{s(T_2 s + 1)}, K' = \frac{K_0}{T_1}. \quad (13)$$

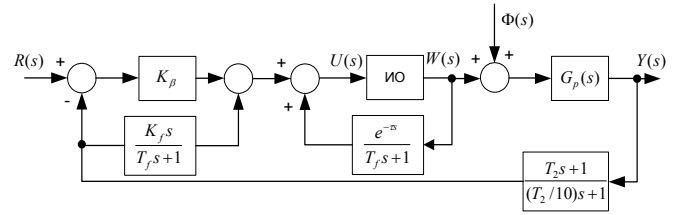
Када је процес апроксимиран моделом (13), параметри регулатора су

$$T_f = 7\tau, K_f = \frac{1}{K'}, \quad (14)$$

$$K_\beta = \frac{1}{2K' \tau}. \quad (15)$$

Конечно, регулатор је дефинисан моделима (1) и (13), релацијама (2), (11)-(12) и (14)-(15) и шемом на слици 2.

3. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНАТА



Слика 2. Структура новог регулатора. У реализацији елемент за кашњење $e^{-\tau s}$ апроксимира се

$$\text{са } e^{-\tau s} = (1 - \tau s / 2) / (1 + \tau s / 2).$$

Упоредна анализа предложеног регулатора извршена је за ПИД из [3] и за модификовани Смитов предиктор НМСП-ДО из [13], за процесе

$$G_{p_1}(s) = \frac{e^{-s}}{(20s + 1)(2s + 1)}, \quad (16)$$

$$G_{p_2}(s) = \frac{1}{s(s + 1)^2}, \quad (17)$$

$$G_{p_3}(s) = \frac{e^{-1.5s}}{s(s + 1)^2}, \quad (18)$$

апроксимиране за ПИД и нови регулатор моделима

$$G_{m_{1,1}}(s) = G_{p_1}(s), G_{m_{1,2}}(s) = \frac{1}{20} \frac{e^{-s}}{s(2s + 1)}, \quad (19)$$

$$G_{m_2}(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s(1.5s + 1)}, \quad (20)$$

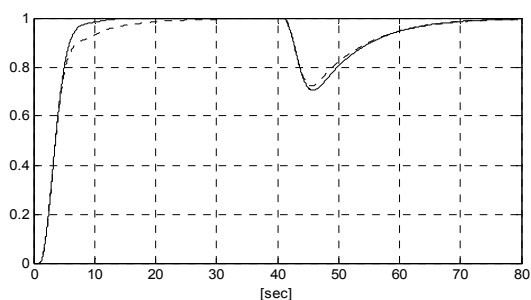
$$G_{m_3}(s) = \frac{e^{-2s}}{s(1.5s + 1)}, \quad (21)$$

како је предложено у [3], а за НМСП-ДО према [13]. Усвојено је да је пренос извршног органа дат са $G_{IO}(s) = 1$. Када постоји ограничење $W_{\min} \leq W(t) \leq W_{\max}$, шема на слици 2 очигледно реализује anti-windup.

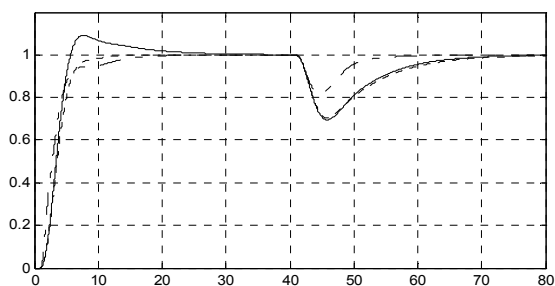
На слици 3 анализиран је процес $G_{p_1}(s)$, за $R(s) = \frac{1}{s}$ и $\Phi(s) = \frac{-4e^{-40s}}{s}$.

На слици 4 анализирани су за $R(s) = \frac{1}{s}$ процеси $G_{p_2}(s)$, са $\Phi(s) = \frac{-0.5e^{-20s}}{s}$, слика 4(а) и $G_{p_3}(s)$, са $\Phi(s) = \frac{-0.1e^{-40s}}{s}$, слика 4(б).

Очигледно је значајно побољшање које нови регулатор даје у односу на ПИД, уз незнатно усложњавање структуре. Јасно је да модификовани Смитов предиктор са опсервером (НМСП-ДО), са значајним усложњавањем структуре, даје и значајно боље потискивање поремећаја. Такође треба уочити сличност

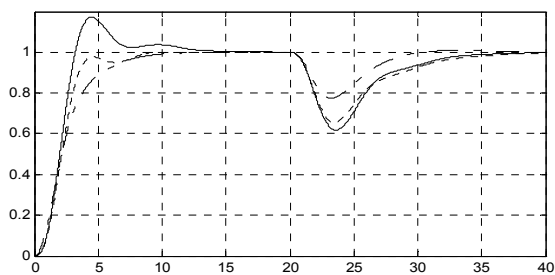


(a)

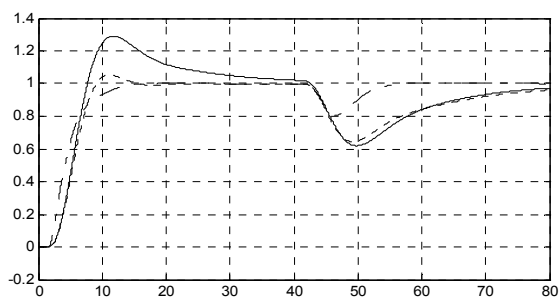


(б)

Слика 3. Одзив $G_{p_1}(s)$ са: (а) нови регулатор са $G_{m_1}(s)$ (-----) и $G_{m_2}(s)$ (- - - -); (б) ПИД (-----), нови регулатор (- - - -), оба са $G_{m_1}(s)$, и НМСП-ДО (-.-.-).



(a)



(б)

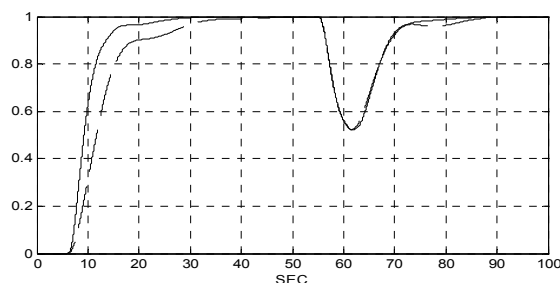
Слика 4. (а) Одзив $G_{p_2}(s)$, (б) одзив $G_{p_3}(s)$. На обе слике ПИД (---), нови регулатор (- - -), НМСП-ДО (-.-.-). одзива на референцу између новог регулатора и НМСП-ДО, а незнатно боље потискивање поремећаја од ПИД-а.

Експериментална провера новог регулатора извршена је на термоелектрани «МОРАВА», за више регулационих кругова. У овом раду на слици 5 приказани су експериментални резултати примене новог регулатора на регулацију притиска свеже паре. **Са подешеним САУ остварена је за 35%/25% већа производња у периоду децембар/јануар, у односу на планирану производњу, са само једним застојем у току та два месеца**

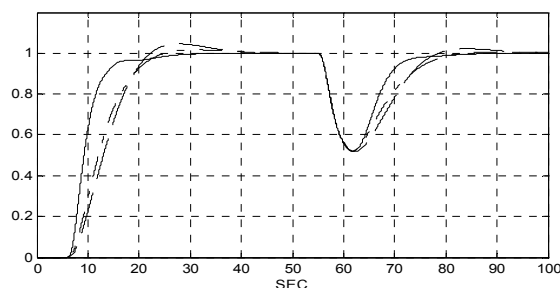
4. ЗАКЉУЧАК

Предложени регулатор је незнатно сложенији од ПИД-а, а знатно једноставнији од модификованог Смитовог предиктора са опсервером. Успешно је примењен на затварање више кола повратне спреге на термоелектрани «Морава». У раду је приказан само резултат регулације притиска свеже паре.

На крају, мада не по важности, апроксимирајући кашњење у FOPDT моделу $K_0 e^{-\tau s} / (T_1 s + 1)$, добијеном према [10], са $e^{-\tau s} = e^{-\tau s / 2} / (1 + \tau s / 2)$, добија се диференцијално дејство $(1 + \tau s / 2) / (1 + \tau s / 20)$. Тада се, полазећи од релације (2), подешава ПИ дејство за модел $G_m(s) = K_0 e^{-\tau s / 2} / (T_1 s + 1)$ према [10]. На слици 6(а) упоређен је, за $G_{p_4}(s) = e^{-5s} / (s + 1)^3$, тако добијени СРТ-ПИД са Смит-ом из [10], а на слици 6(б) са тим Смит-ом упоређени су ПИД регулатори из [3] и [12], најбоље што се до сада могло постићи са ПИД-ом. Нови прилаз пројектовању и подешавању ПИД-а обећава да у потпуности реafirмише примену ПИД регулатора.

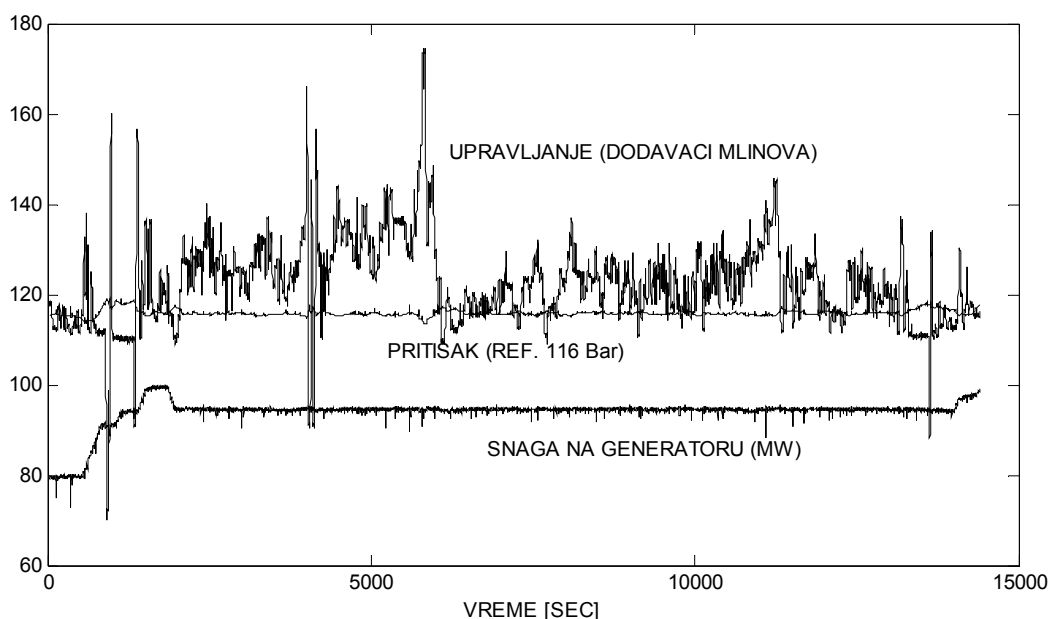


(a)



(б)

Слика 6. Даљи развој пројектовања и подешавања ПИД регулатора: (а) Смит(---), СРТ-ПИД(- - -); (б) Смит(---), Скогестад-ПИД(- - -), Острем-ПИД(-.-.-).



Слика 5. Експериментални резултати регулације притиска свеже паре

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Yamamoto, I. Hashimoto "Present status and future needs: the view from Japanese industry", Proc. IV Int. Conf. on *Chemical process control*, Texas, USA 1991, pp. 1-28.
- [2] S. Skogestad, "Probably the best simple PID tuning rules in the world", AICHE Annual Meeting, Reno, Nevada, USA 2001.
- [3] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning", *Journal of Process Control*, vol.13, pp. 291-309, 2003.
- [4] K.J. Åström, H. Panagopoulos, T. Hägglund, "Design of PI controllers based on non-convex optimisation", *Automatica*, vol. 34, pp. 586-601, 1998.
- [5] H. Panagopoulos, K.J. Åström, T. Hägglund, "Design of PID controllers based on constrained optimisation", *IEE Proc. Control Th. and Appl.*, vol.149, pp. 32-40, 2002.
- [6] A. Ingimudarson, T. Hägglund, "Robust tuning procedure for dead-time compensating controllers", *Control Eng. Practice*, vol. 9, pp. 1195-1208, 2001.
- [7] Q. C. Zhong, J. E. Normey-Rico, "Control of integral process with dead-time; Part 1: Disturbance observer-based 2DOF control scheme", *IEE Proc. Control Th. and Appl.*, vol.149, pp. 285-290, 2002.
- [8] M. R. Mataušek, A. D. Micić, "A modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 41, pp. 1199-1203, 1996.
- [9] M. R. Mataušek, A. D. Micić, "On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, pp. 1603-1606, 1999.
- [10] M. R. Mataušek, G. S. Kvaščev, "A unified step procedure for autotuning of PI controller and Smith predictor for stable process", *Journal of Process Control*, vol. 13, pp. 787-800, 2003.
- [11] B. Kristianson, B Lennartson, "Robust and optimal tuning of PI and PID controllers", *IEE Proc. Control Th. and Appl.*, vol.149, pp. 17-25, 2002.
- [12] K.J. Åström, K. H. Johansson, Q.-G. Wang, "Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems", *IEE Proc. Control Th. and Appl.*, vol.149, pp. 74-81, 2002.
- [13] M. R. Mataušek, G. S. Kvaščev, A. Ž. Rakić, "A new easy to tune high performance controller for stable, integrating and unstable plants", Proc. XLVIII ETRAN Conf., Čačak, 2004, vol. I.

Abstract – A new design and tuning of industrial controllers is presented. The controller structure and parameters are defined by experimentally determined FOPDT and IFOPDT models. Experimental results from power plant "MORAVA" and comparison with PID and Smith predictor are used to illustrate advantages of the proposed approach.

NEW APPROACH TO DESIGN INDUSTRIAL CONTROLLERS

Aleksandar I. Ribić, Miroslav R. Mataušek