

# Prediktivna regulacija temperiranja šaržnega reaktorja v farmacevtski industriji

Gregor Klančar, Igor Škrjanc  
Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana  
gregor.klancar@fe.uni-lj.si, igor.skrjanc@fe.uni-lj.si,

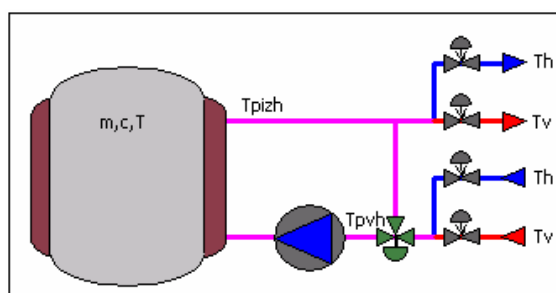
Borut Fortuna, Borut Jereb  
Liko Pris d.o.o., Verd 100A, 1360 Vrhnika  
borut.fortuna@likopris.si, borut.jereb@likopris.si

## *Predictive control of industrial batch reactor process in pharmaceutical industry*

**Abstract:** *In this paper an application of predictive control algorithm to an industrial batch reactor process is presented. Some fundamentals of predictive control design applied to the batch reactor together with accompanying problems are given. The process is a typical industrial process with relatively simple and robust design. However the control of this process is a challenge because the process exhibits mixed continuous dynamics and discrete states. The obtained predictive controller considers operation requirements such as energy efficiency, robustness and minimal switching of discrete actuators for instance on-off valves. Comparing to previous control technique it improve quality and robustness performance and parameterization is easy and quick. Computational efficient algorithm is implemented on industrial programmable logic controllers to control the batch reactor plant.*

## 1 Uvod

Namen članka je predstavitev praktične izvedbe regulacije temperature v reaktorju s pomočjo prediktivnega diskretnega regulatorja. Sistem je sestavljen iz reaktorja s plaščem, obtočne črpalke, mešalnega ventila in dovoda ogrevalnega ter ohlajevalnega medija. Shema obravnavanega procesa je podana na Sliki 1. Glavni del sistema predstavlja reaktor, ki je namenjen pripravi raztopin.



Slika 1: Shema sistema

Zaradi kemičnih reakcij, ki nastajajo v reaktorju je temperatura produkta zelo pomemben parameter, ki vpliva na njegovo kvaliteto, zato je potrebno regulacijsko strategijo zasnovati na način, da ne prihaja do prevzponov, ki so večji od dovoljenih toleranc. Poleg tega je potrebno nadzorovati največjo dovoljeno temperaturo produkta, ki nastopa na stičišču produkta in reaktorja (uravnavamo največjo dovoljeno temperaturo plašča). Pri regulaciji temperature je potrebno upoštevati dejstvo, da prihaja do zakasnitev odziva sistema, kar je posledica fizikalnih lastnosti.

Temperaturo produkta v reaktorju uravnavamo posredno z gretjem/hlajenjem plašča reaktorja. Skozi plašč se dovaja temperirni medij s konstantnim pretokom  $\phi_p$  in temperaturo  $T_{pvh}$ . Mešalni ventil določa razmerje med dovodnim in povratnim temperirnim medijem, ki se iz plašča vrača s temperaturo  $T_{pizh}$ . Dovodni temperirni medij nadziramo z "on/off" ventili in je lahko hladen s temperaturo  $T_H$  ali vroč s temperaturo  $T_V$ . Temperaturo v reaktorju reguliramo s pomočjo odpiranja/zapiranja dovodnih ventilov in

položajem mešalnega ventila. Za zagotavljanje čimbolj enakomerne temperature produkta se med temperiranjem produkt tudi meša. Zaradi preprečevanja mešanja toplega in hladnega temperirnega medija ni dovoljeno istočasno dovajanje obeh medijev.

## 2 Matematično modeliranje procesa

Matematični model procesa s Slike 1 je izpeljan iz energijskih enačb, kjer je upoštevana tudi izguba v okolico. Energijska enačba za plašč je podana kot

$$m_p c_p \frac{dT_{Pizh}}{dt} = k \phi_p c_p T_{Pvh} + (1-k) \phi_p c_p T_{Pizh} - \phi_p c_p T_{Pizh} - \lambda S (T_{Pizh} - T) - \lambda_O S (T_{Pizh} - T_O) \quad (1)$$

enačba za reaktor pa kot

$$mc \frac{dT}{dt} = \lambda S (T_{Pizh} - T) \quad (2)$$

Pomen uporabljenih simbolov:

$m_p$	masa medija v plašču,
$m$	masa produkta v reaktorju,
$c_p$	spec.toplota medija v plašču,
$c$	spec.toplota produkta,
$T_{Pizh}$	izhodna temp. iz plašča,
$T$	temperatura produkta,
$k, (1-k)$	pozicija mešalnega ventila $k \in [0,1]$ ,
$\Phi_p$	pretok skozi plašč,
$T_{Pvh}$	temp. vstopnega medija v plašč,
$T_H$	temperatura hladne vode,
$T_V$	temperatura tople vode,
$\lambda$	koeficient toplotne prevodnosti med plaščem in reaktorjem,
$S$	stična površina med plaščem in reaktorjem,
$\lambda_O$	koeficient toplotne prevodnosti med plaščem in reaktorjem,
$T_O$	temperatura okolja

## 3 Osnove prediktivne regulacije

Prediktivno vodenje procesa temelji na izračunavanju potrebnega regulirnega signala, ki bo povzročil predvideni odziv procesa v določenem časovnem obdobju (čez določeno število korakov - vzorcev). Strategija regulacije je izpeljana z optimizacijo kriterijskih funkcij (vsota kvadratov razlike med odzivom in referenco, aktivnost regulirnega signala).

Optimizacija kriterijske funkcije prediktivnega regulatorja je izvedena na način, ki omogoča uporabo tudi na hitrih procesih v realnem času. Prediktivni model prvega reda je predstavljen kot

$$y_m(k+1) = a_m y_m(k) + b_m u(k) \quad (1)$$

Ob predpostavki konstantne vrednosti regulirnega signala v določenem časovnem obdobju  $u(k) = u(k+1) = \dots u(k+H-1)$  lahko zapišemo predvideni odziv procesa v H-tem koraku kot

$$y_m(k+H) = a_m^H y_m(k) + \frac{b_m(1-a_m^H)}{1-a_m} u(k) \quad (4)$$

Zaprtozančni odziv realnega procesa naj sledi referenčnemu odzivu modela procesa, ki je podan kot

$$y_r(k+1) = a_r y_r(k) + b_r w(k) \quad (5)$$

kjer je ojačanje prenosne funkcije definirano kot  $\frac{b_r}{1-a_r} = 1$  in  $w(k)$  predstavlja referenco. Podobno kot v enačbi (4) lahko zapišemo odziv modela procesa v H-tem koraku kot

$$y_r(k+H) = a_r^H y_r(k) + (1-a_r^H) w(k) \quad (6)$$

Odziv regulatorja dobimo ob predpostavki, da bo odziv procesa enak odzivu modela v določenem časovnem intervalu. Ob izenačitvi spremembe odziva procesa

$$\Delta_p = y_r(k+H) - y_p(k) \quad (7)$$

s spremembo odziva modela

$$\Delta_m = y_m(k+H) - y_m(k) \quad (8)$$

v koraku H, lahko eksplicitno izrazimo odziv regulatorja (regulirni signal) kot

$$u(k) = \frac{(1-a_r^H)(w(k)-y_p(k))}{\frac{b_m(1-a_m^H)}{1-a_m}} + \frac{y_m(k)}{\frac{b_m}{1-a_m}} \quad (9)$$

#### 4 Implementacija regulacijskega algoritma

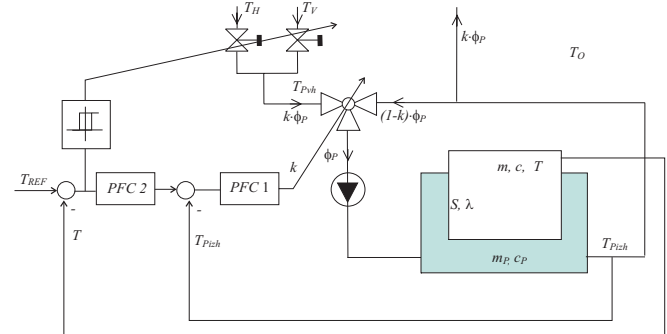
Pri implementaciji regulacijskega algoritma na logičnem krmilniku nas je vodila ideja maksimalne možne prilagodljivosti funkcije glede na ostalo krmilno logiko ter možnosti enostavnega prenosa na različne vrste logičnih krmilnikov. Glede na to, da je razvoj potekal z namenom uporabe na krmilnikih Siemens, smo uporabili programsko orodje SCL (structure control language).

Pri vodenju procesa je potrebno upoštevati omejitve procesa in dosegati zahtevane performanse. Za opisani proces so podane omejitve glede maksimalne dovoljene temperature plašča reaktorja, s čemer varujemo produkt pred pregretjem in posledično uničenjem, zahtevana je regulacijska akcija, ki ne povzroča prevzpona temperature v reaktorju, oziroma je prevzpon v dovoljenih tolerancah, potrebno je stremeti k minimalnemu preklapljanju med dovodi temperirnega medija, s čemer poleg manjše obrabe ventilov zmanjšamo tudi porabo energije, nenazadnje pa je potrebno zagotoviti tudi uporabniško prijazno in čim hitrejšo nastavitvev parametrov.

Vodenje procesa oziroma regulacija je rešena z uporabo dveh kaskadno vezanih prediktivnih regulatorjev. Tako vsak regulator nadzira podproces prvega reda (celoten proces je modeliran kot dva sklopljena podprocesa prvega reda), ki sta modelirana z enačbama (1) in (2). Shema kaskadne regulacije je prikazana na Sliki 2. Hitrejša notranja zanka (PFC 1) regulira temperaturo plašča, medtem ko počasnejša zunanja regulacijska zanka (PFC 2) regulira temperaturo v reaktorju. Oba regulatorja sta izvedena na osnovi enačbe (9).

Kot že zapisano, proces obravnavamo kot sklopljen proces drugega reda iz dveh podprocesov prvega reda. Prvi podproces predstavlja prenosna funkcija med položajem mešalnega ventila ( $k$ ) in temperaturo plašča

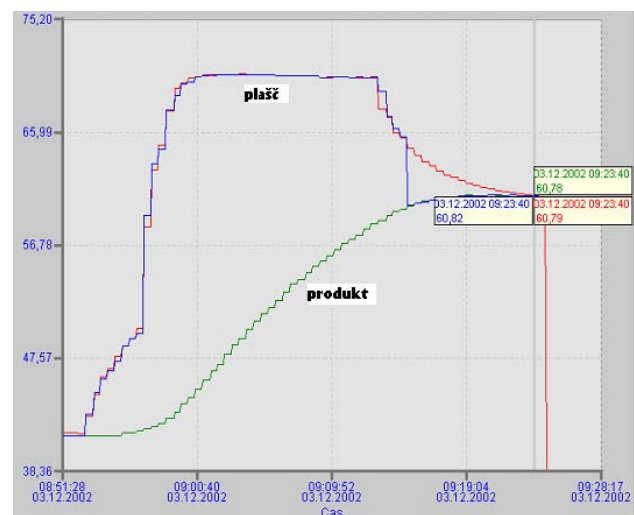
( $T_{pvh}$ ). Drugi podproces predstavlja prenosna funkcija med temperaturo plašča ( $T_{pvh}$ ) in temperaturo v reaktorju ( $T$ ). Parametre obeh procesov (časovno konstanto in ojačanje) lahko pridobimo iz odziva na stopnico (pozicija mešalnega ventila).



Slika 2: Kaskadna realizacija prediktivnih regulatorjev

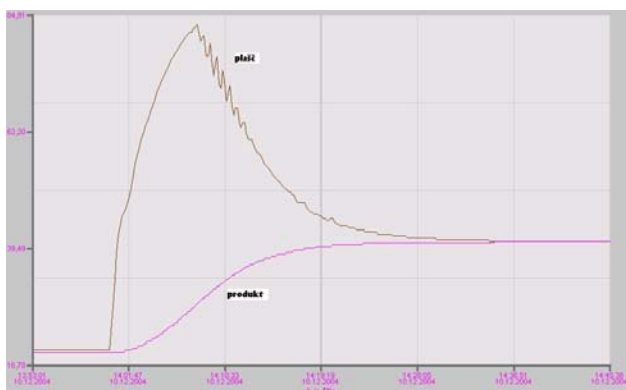
#### 5 Rezultati

Predstavljeni regulacijski algoritem je bil primarno testiran na reaktorju z volumnom 600 litrov, v nadaljevanju pa je bil algoritem uporabljen na več različno velikih reaktorjih (od 50 litrov do 6000 litrov). Pri vrednotenju kvalitete regulacije smo primerjali rezultate regulacije temperature v reaktorju z energijsko regulacijo na osnovi dopolnjenega PID regulatorja in prediktivno regulacijo.



Slika 2: Temperiranje reaktorja z dopolnjenim PID regulatorjem

Slika 2 prikazuje časovni potek temperature plašča in temperaturo produkta. Temperatura plašča doseže maksimalno dovoljeno temperaturo produkta (70°C) in se začne zmanjševati, ko se temperatura produkta približuje nastavljeni vrednosti (60°C). Na ta način je dosežena energijska izravnava – energija plašča se prenaša na produkt, pri čemer je regulacija zasnovana tako, da obe temperaturi limitirata proti željeni temperaturi produkta.



Slika 3: Temperiranje reaktorja s prediktivnim regulatorjem

Slika 3 prikazuje časovni potek temperature plašča in temperaturo produkta. Temperatura plašča teži k maksimalni dovoljeni temperaturi produkta (v trem primeru 100°C). Glede na to, da je temperatura grelnega medija 85°C, plašč doseže maksimalno možno temperaturo, zaradi hitrega naraščanja temperature produkta, se dovod grelnega medija zmanjša, temperatura v plašču se začne zniževati (prenos energije na produkt) in v končni fazi limitira proti željeni temperaturi produkta.

Iz obeh slik (2 in 3) vidimo, da dosegamo zeleno temperaturo produkta brez neželenih prevzponov in v najkrajšem možnem času, kar je z vidika uporabnika zelo pomembno, saj čimbolj optimalni potek pomeni prihranek časa.

Z analizo rezultatov smo ugotovili, da oba uporabljena algoritma dosegata primerljivo kvalitetno regulacijo temperature reaktorja, kar ni posebej presenetljivo, saj oba algoritma temeljita na izravnavanju potrebne dovedene energije za doseg želene temperature. Prednost prediktivnega regulatorja se pokaže pri analizi

dinamike regulacijskega signala. Ugotovili smo, da se je zmanjšalo gibanje mešalnega ventila, kar pomeni manjšo obrabo elementa in prihranek energije. Naslednjo prednost predstavlja enostavna nastavitve regulatorja, saj za določitev potrebnih parametrov potrebujemo izvesti meritev temperature ob stopničasti spremembi odprtja mešalnega ventila in odprtem dovodu toplega temperirnega medija. Na osnovi odziva inženir določi štiri parametre s katerimi opiše dinamiko odziva (ojačanje in časovno konstanto podprocesov prvega reda). Ob uporabi klasične regulacije je potrebno za kvalitetno regulacijo upoštevati količino medija v reaktorju, kar vodi k več kompletom parametrov in daljšemu času nastavljanja.

## 6 Zaključek

Predstavljeni algoritem vodenja temperiranja šaržnega procesa se je v praksi izkazal kot učinkovita nadgradnja klasičnega pristopa k regulaciji. Doseženi rezultati ustrezajo postavljenim zahtevam, omogočena je preprosta in hitra implementacija, nastavljanje in posledično skrajšan je potreben čas za zagon in kvalifikacijo sistema. Algoritem je robusten, saj uspešno izravnava različne pojave, ki so posledica nemodelirane dinamike sistema (poenostavitve), motenj pri regulaciji ali slabše nastavitve parametrov. Seveda s tem zgodba še ni zaključena, saj algoritem omogoča nadgradnjo v smeri avtomatske nastavitve parametrov, adaptivnega vodenja in predvsem izločitve strojne izvedbe iz samega algoritma.

## 7 Literatura

- [1] V.J.Vandoren: *The Evolution of PLC-Based Loop Control*, Control Engineering, Vol. 42, No. 11, pp 57-62, October 1995.
- [2] J.R.Pollard: *Ladder Logic Remains the PLC Language of Choice*, Control Engineering, Vol. 41, No. 5, pp 77-79, April 1994.
- [3] V.J.Vandoren: *Functional Analysis, Translating Control Theory into Practice*, Control Engineering, Vol. 38, No. 12, pp 134-147, September 1991.
- [4] J.Richalet, A. Rault, J.L. Testud in J. Papon: *Model predictive heuristic control: applications of industrial processes*, Automatica Vol.14, No.5, 1978.

- [5] I. Škrjanc in D. Matko: *Predictive Functional Control based on fuzzy model for heat-exchanger plant*, 14 th IFAC, Beijing, China, 1999.
- [6] Škrjanc I., Matko D., *Predictive Functional Control Based on Fuzzy Model for Heat – Exchanger Pilot Plant*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, no. 6, pp. 705-712, December 2000.
- [7] Škrjanc I., Matko D., *Fuzzy Predictive Functional Control in the State Space Domain*, to be published in Journal of Intelligent and Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers.
- [8] *S7-SCL V5.1 for S7-300/S7-400*, Manual, Siemens, Simatic, 2000.