



N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

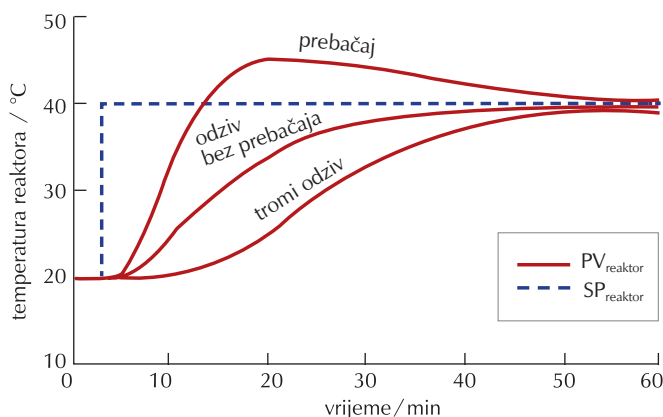
Regulacija temperature (II. dio)

U drugom nastavku priloga o regulaciji temperature prikazujemo nekoliko tipičnih primjera i problema pri radu regulatora temperature te kako ih riješiti. Bit će riječ i o načinima kako analizirati regulaciju temperature i na što pri tom treba usmjeriti pozornost. Ipak, i u ovim tipičnim slučajevima dobro je konzultirati eksperta za optimizaciju regulacije.

Pri pokretanju postrojenja s novim reaktorima, instrumentacijom i sustavom za vođenje konzultanti za regulaciju je tijekom ugađanja često primjenjuju Lambda metodu (vidi okvir!) kako bi se, kod zadanih promjena radne točke ili pri pojavi poremećaja, održao stabilan i što je moguće brži temperaturni odziv bez oscilacija.

1. primjer

Kao što se vidi na slici 1, proporcionalno-integracijski-derivacijski (PID) algoritam s inicijalno postavljenim parametrima regulatora uzrokovao je prebačaj temperature preko dopuštenih specifikacija koje su zadane receptom. Prebačaj se pojavio zbog činjenice da se radi o procesu čiji je odziv nalik integrirajućim procesima i zbog previše integracijskog djelovanja u regulatoru.



Slika 1 – Odziv temperature u reaktoru na promjenu radne točke u kaskadnom radu regulatora temperature u reaktoru (primarni) i plaštu (sekundarni)

Integracijski odziv (spori rast) temperature u reaktoru može zbuiniti inženjere i operatore, ali i algoritam za automatsko podešavanje regulatora koji mora osigurati stabilnu i dobru regulaciju temperature u reaktoru i prihvatljive oscilacije temperature u plaštu. Obično su glavni uzroci problema nelinearnost u regulacijskom krugu temperature plašta, odabir neprikladnih regulacijskih ventila i prevelika temperaturna mrtva zona definirana u podijeljenoj (engl. *split*) regulaciji kojom se, ovisno o trenutačnoj temperaturi,

reaktor grije ili hladi. Te probleme i oscilacije djelomično će riješiti ugađanje parametara regulatora, ali ključan je pravilan odabir opreme i strategije vođenja temperature u reaktoru.

Lambda metoda je metoda ugađanja regulatora kojom se zadaje brzina odziva takva da se ne pojavljuje oscilacija. Lambda metoda specificira vrijeme odziva zatvorenog kruga. To znači da se, u slučaju promjene radne točke, specificira vremenska konstanta zatvorenog regulacijskog kruga za dolazak na novu radnu točku. Za dinamiku procesa koja je samoregulirajuća ili integrirajuća razvijena su jednostavna algebarska pravila ugađanja za kontinuirane procese, a pokazala su se prikladna i kod šaržnih procesa.

Kaskadno pravilo ugađanja nalaže da se prvo podešava brži sekundarni krug, a zatim sporiji primarni regulacijski krug reaktora. Lambda metoda ugađanja je eksplicitna jer se podešava vrijeme odziva kruga (λ) pri čemu je: $\lambda_{\text{plasti}} \ll \lambda_{\text{reaktor}}$

2. primjer

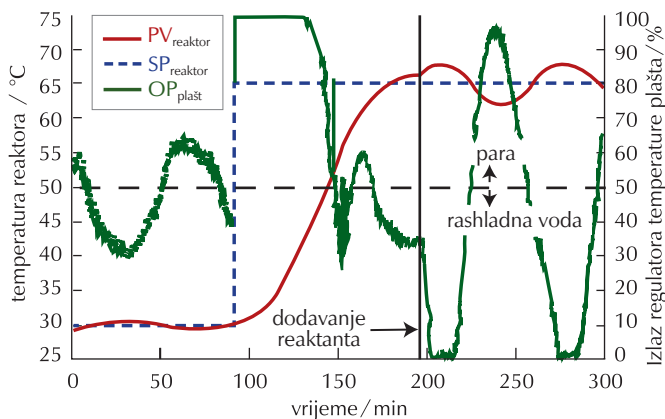
U drugom primjeru oscilira temperatura u reaktoru. Na slici 2 prikazan je odziv na promjenu radne točke i promjenu tereta. Radna točka temperature u reaktoru inicijalno je postavljena na 30 °C, a spora oscilacija uzrokuje da se za regulaciju temperature plašta neprekidno i naizmjenično troši značajna količina pare i rashladne vode. Kasnije, nakon što je počela egzotermna reakcija, izlaz regulatora temperature plašta počeo je oscilirati gotovo duž cijelog područja od minimuma do maksimuma. Prosječna potrošnja energije u tom proizvodnom sustavu bila je mnogo veća od teorijski potrebne za održavanje temperature reaktora.

Kod regulacije temperature plašta zapažene su, također, i manje brže oscilacije. Glavni problemi koji su uočeni i korigirani bili su:

- oscilacije regulatora temperature u reaktoru zbog pogrešno odabranih parametara regulatora;
- loše odabrani parametri regulatora temperature plašta;
- u algoritmu regulatora definirana je prevelika mrtva zona pri prijelazu s grijanja na hlađenje i obrnuto;
- problemi s regulacijskim ventilom.

Zaposleni u postrojenju, nažalost, nisu poznavali metode ugađanja i optimiranja regulacijskih krugova da bi ostvarili stabilnu i brzu proizvodnju. Ispitivanja provedena pri ugađanju regulatora otkrila su, također, nelinearnosti u strukturi tzv. *split* regulacije i regulacijskom ventilu. Nakon provedenih izmjena na nekoliko reaktora, ušteda energije samo na grijućem mediju (pari) isplatila se u manje od tri mjeseca.

* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr

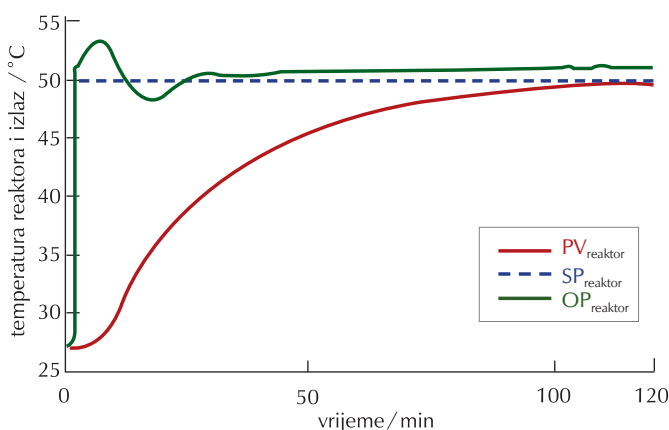


Slika 2 – Oscilacije tijekom promjene radne točke u reaktoru (40 m³) u kaskadnom načinu rada regulatora temperature u reaktoru i plaštu, pri čemu se javlja promjena tereta/poremećaj (egzotermna reakcija) u trenutku naznačenom na slici¹

3. primjer

U ovom slučaju zatečeni temperaturni odziv bio je prespor, pri čemu je trebalo više od dva sata da se dostigne novozadana radna točka (slika 3). Kod integracijskih procesa brzi odziv ima za posljedicu prebačaj radne točke na neko vrijeme. Zbog parametara regulatora podešenih za spori odziv operatori su učestalo morali ručno podešavati radnu točku temperature u plaštu, dok nisu postigli zadanu vrijednost. To zahtijeva stalnu koncentraciju operatora na taj regulacijski krug, što ga iznimno opterećuje i preklapa se s njegovim drugim zadaćama kao što je uzorkovanje za kontrolu kvalitete. Zapravo bi oba kruga trebala raditi automatski u već opisanom kaskadnom načinu rada.

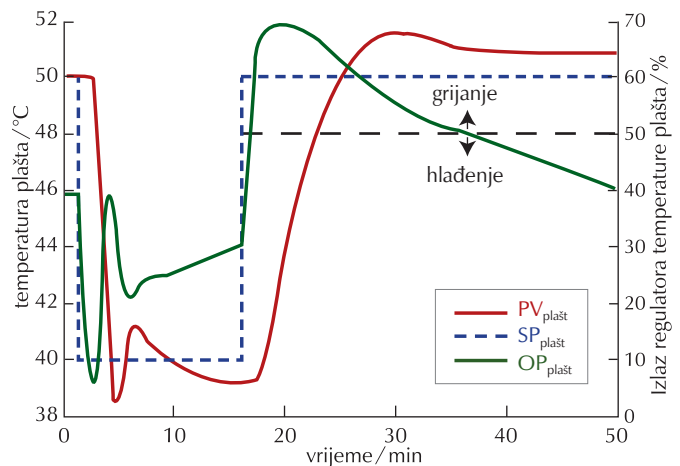
Zbog nelinearnosti u strukturi regulatora nije bilo moguće pronaći odgovarajuće parametre regulatora jednostavnim ugađanjem parametara regulatora. Umjesto toga ispitan je odziv procesa na skokomičnu promjenu (tzv. *step test*). Na temelju njega dobio se približni model i izvela računalna simulacija. Na taj način regulator je ponovno radio u automatskom i kaskadnom režimu, kako je i projektom zamišljeno i tako rasteretio operatora.



Slika 3 – Prespori odziv na promjenu radne točke u reaktoru (3,6 m³) u kaskadnom načinu rada¹

Ispitivanja su, također, ukazala na nekoliko ograničenja u odzivu temperature plašta (slika 4). Odziv je bio brži pri hlađenju nego pri zagrijavanju. Odziv pri hlađenju u početku je oscilirao uz spor povratak na 40 °C. Asimetrija dinamike grijanja u odnosu na hlađenje ukazuje na potrebu da se u regulatoru konfiguriraju dva skupa parametara (engl. *gain scheduling*). Pri tome se jedan skup

primjenjuje za hlađenje, a drugi za grijanje. Ručno ispitivanje na skokomičnu promjenu plašta pokazalo je, također, da su u regulatoru temperature plašta postavljene neprikladne vrijednosti parametra derivacije i filtarske konstante. U konačnici, za dobar odziv prilikom hlađenja bio je potreban ventil drugačije karakteristike protjecanja. Kad su riješeni problemi u regulaciji temperature plašta, moglo se dodatno poboljšati vladanje temperature u reaktoru.



Slika 4 – Temperatura plašta ima brži odziv tijekom hlađenja nego grijanja. U ovom slučaju je regulator temperature reakcijske smjese u ručnom radu, a plašta u automatskom radu.¹

Kako postići dobru regulaciju?

U tipičnoj kemijskoj proizvodnji javlja se nekoliko prepreka za ostvarivanje optimalne regulacije. Pri projektiranju i konstrukciji postrojenja obično su u prvom planu kemija, troškovi i sigurnost umjesto vođenja procesa. Drugi problem je u školovanju inženjera tijekom studija, pri čemu predmeti vezani uz mjerenja, dinamiku i regulaciju procesa ili ne postoje ili imaju malo veze s praksom (posebno na elektrotehničkim, ali i ostalim studijima gdje se naglašava teorija vođenja opterećena zamarajućom matematikom umjesto praktičnih rješenja!). Također se na industrijskim tečajevima često obrađuju metode koje donose nestabilnost u procese zbog agresivnog ugađanja i međudjelovanja. Naglasimo još jednom da je dinamika temperature reaktora i plašta integrirajuća, a ugađanje regulatora manje je intuitivno nego kao kod samoregularajućih procesa (npr. regulacije protoka).

Za rad s različitim reaktorskim sustavima, specifičnim kemijskim reakcijama i ograničenjima u proizvodnji razvijeni su složeni specijalizirani sustavi za vođenje.¹ Za postizanje što bržeg odziva postoje nelinearne metode vođenja opisane u literaturi.² Međutim kod reaktora koji se vode na jednostavan kaskadni način (slika 2, Kem. Ind. 68 (3-4) (2019) 175) problemi se mogu preduhitriti primjenom sljedećih pet koraka:

- odrediti dinamiku procesa;
- linearizirati dinamiku procesa što je više moguće;
- smanjiti što je više moguće mrtvo vrijeme;
- odabrati pravi algoritam regulatora za kompenzaciju dinamike procesa;
- ugoditi za što veću brzinu odziva bez oscilacija.

Linearno znači da vođena temperatura ima isti odziv bez obzira na veličinu, smjer ili prethodne promjene izlaza regulatora. Kod regulacije temperature u plaštu za postizanje linearnosti zahtijeva se odabir odgovarajućih regulacijskih ventila i minimiziranje nelinearnosti u algoritmu vođenja (npr. mrtve zone u *split* regulatoru). Na slici 4 vidljiv je još jedan znak nelinearnosti: nakon

inicijalnog skoka pri zagrijavanju povratak na 40 °C veoma je spor zbog karakteristike protjecanja kroz regulacijski ventil.

Ponekad postoji ograničenje u pomoćnim medijima (engl. *utilities*) koji dolaze u plašt, npr. regulator tlaka pare. Za regulacijski krug temperature u reaktoru linearnost znači simetričan odziv na promjenu radne točke iz plašta. Ako su odzivi pri hlađenju i zagrijavanju asimetrični (kao na slici 4), treba razmotriti primjenu programiranog pojačanja (engl. *gain scheduling*).

Mrtvo vrijeme je vrijeme koje protekne nakon promjene izlaza regulatora prije nego što započne promjena vođene varijable (PV). Mrtvo vrijeme inherentno destabilizira regulacijski krug. Jedan od razloga pojave mrtvog vremena u regulatoru temperature plašta je kašnjenje pri prijenosu tvari ili vrijeme potrebno da svježi medij prođe put od regulacijskog ventila do mjernog elementa. Mrtvo vrijeme treba smanjiti instaliranjem senzora na odgovarajuće mjesto i instaliranjem cirkulacijske pumpe. Filtar primijenjen na signal vođene veličine također doprinosi mrtvom vremenu. U regulacijskom krugu reaktora, mrtvo vrijeme smanjit će se bržim odzivom u plaštu, što može zahtijevati i prebačaj radne točke regulatora plašta.

U nekim slučajevima korisni su napredniji alati. Ako odziv temperaturnog procesa ima elemente i samoregularajuće i integrirajuće dinamike, pravilo za ugađanje se razlikuje. Kada u regulacijskom krugu postoje značajne nelinearnosti (npr. ograničenje radne točke – SP_{limit} – u sekundarnom krugu), računalna simulacija može ubrzati dolazak do najboljih parametara regulatora. U nekim slučajevima pomoći će neizraziti regulator (engl. *fuzzy logic controller*). Kad se temperatura u reaktoru regulira samo električnim grijalom, neizraziti regulator može osigurati najbrže zagrijavanje reaktora bez prebačaja i oscilacija.

Zaključak

Neki šaržni procesi imaju oscilacijski ili spori temperaturni odziv. Uzrok je integrirajući karakter procesa, ograničenja u sustavu za vođenje i nedostatak obrazovanja inženjera i operatora. Na suvremenim sustavima za vođenje regulatori se mogu konfigurirati tako da relativno brzo reagiraju na promjenu radne točke bez prebačaja i oscilacija. To pozitivno utječe na proizvodnju jer osigurava kvalitetu proizvoda, smanjuje trajanje šaržne proizvodnje i smanjuje utrošak energije i pomoćnih medija.

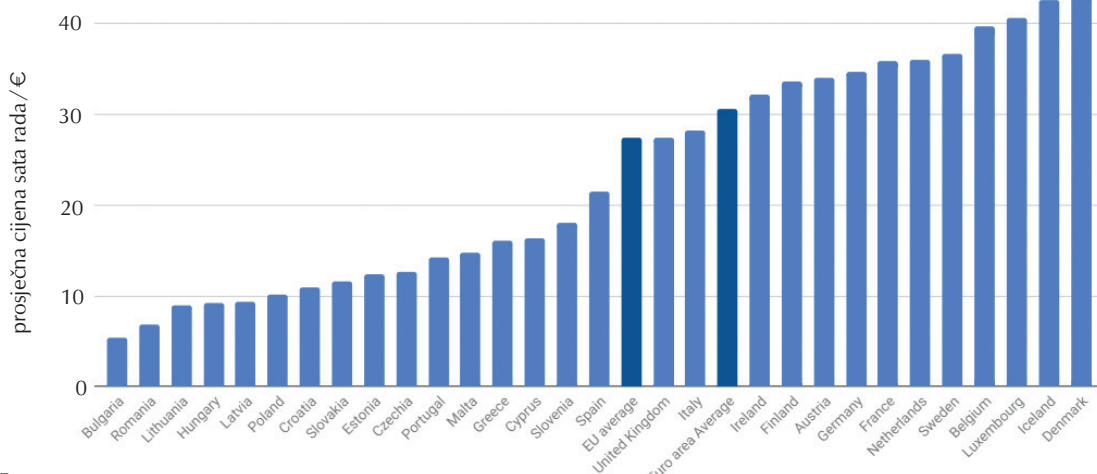
Literatura

1. Chemical Processing, June 2008, www.chemicalprocessing.com ©PUTMAN. All Rights Reserved. FosteReprints: 866-879-9144, www.marketingreprints.com (1. 2. 2020.).
2. Process Control and Optimization, Volume VIII in "Instrument Engineers' Handbook," p. 1, 664, 4th ed., B. G. Liptak, ur., CRC Press, Boca Raton, Fla., 2007.
3. M. A. Boudreau, G. K. McMillan, New Directions in Bioprocess Modelling and Control, p. 91, ISA, Research Triangle Park, N.C., 2007.
4. W. L. Bialkowski, in "The Control Handbook," p. 1, 234, W. Levine, ur., CRC Press, Boca Raton, Fla., 1996.
5. Seminar AVP-1 – Automatsko vođenje procesa, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Laboratorij za automatiku i mjerenja (LAM), Zagreb, 2016.

20 najvećih svjetskih dobavljača automatike s ukupnim prihodom za 2018. (u milijunima dolara)

1	Siemens	\$13,699.1
2	Emerson	\$11,668.0
3	ABB	\$9,970.0
4	Schneider Electric	\$7,311.2
5	Rockwell Automation	\$6,721.7
6	Mitsubishi Electric	\$4,071.1
7	Honeywell	\$3,672.2
8	Fortive (Danaher)	\$3,655.1
9	Yokogawa Electric	\$3,509.1
10	Omron	\$3,163.1
11	GE	\$3,083.2
12	Ametek EIG	\$3,029.0
13	Endress+Hauser	\$2,888.2
14	Phoenix Contact	\$2,800.0
15	IMI	\$2,133.0
16	MKS Instruments	\$2,075.1
17	Spectris	\$1,985.4
18	Sick AG	\$1,925.6
19	FANUC	\$1,886.1
20	Festo	\$1,837.1

Prosječne cijene rada u EU za 2018.



Izvor: Eurostat