



A. Čelan*

Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet
Zavod za kemijsko inženjerstvo
R. Boškovića 35, 21 000 Split

Dinamički modeli za analizu i vođenje procesa

Model procesa, zapravo, predstavlja matematički opis realnog sustava. Koristi od matematičkog modela su višestruke. Prije svega, model omogućava bolje razumijevanje procesa. Primjerice, ako je model procesa poznat, proces je moguće simulirati, čak i prije izgradnje proizvodnog pogona da bi se operatori upoznali s potencijalno kritičnim operacijama i vođenjem procesa u realnim uvjetima. Osim toga, model je osnova za analizu različitih načina vođenja procesa kako bi se odredili optimalni uvjeti za njegovu provedbu. Cilj je, u svim tim slučajevima, isti – ostvariti maksimalnu produktivnost i kvalitetu proizvoda uz minimalne troškove proizvodnje i utjecaj na okoliš.

Općenito se proces može prikazati jednostavnom skicom na slici 1. Pojednostavljeno, dinamički model procesa govori o promjeni izlazne veličine ili varijable, y , u vremenu koja se događa kao posljedica promjene ulaznih veličina, u . Pritom, ulazne veličine podrazumijevaju sve procesne veličine koje utječu na proces, bez obzira radi li se o upravljanim veličinama (engl. *manipulated variables*) ili poremećajima (engl. *disturbances*). S druge strane, izlazne veličine (engl. *output variables*) odraz su stanja u procesu. Osim varijabli, proces karakteriziraju i procesni parametri koji mogu biti svojstveni motrenoj tvari (npr. fizikalno-kemijska svojstva) ili samom procesnom prostoru (npr. geometrijske karakteristike uređaja). Važno je razlikovati procesne varijable, čije su vrijednosti promjenjive, od procesnih parametara, čije se vrijednosti najčešće pretpostavljaju konstantnim u vremenu i na određenom radnom području.

Dakle, s obzirom na promjenu vrijednosti procesnih varijabli u vremenu procesi mogu biti u *stacionarnom* ili *nestacionarnom* (prijelaznom) stanju.

U stacionarnom stanju ulazne i izlazne veličine zadržavaju stalne (konstantne) vrijednosti. Prema tome vrijedi:

$$\frac{du}{dt} = 0; \frac{dy}{dt} = 0. \quad (1)$$

Procesi se u tom slučaju opisuju *statičkim modelima*.

Naravno, u praksi se redovito javljaju nestacionarna stanja kod kojih se procesne varijable mijenjaju tijekom vremena pa vrijedi:

$$\frac{du}{dt} \neq 0; \frac{dy}{dt} \neq 0. \quad (2)$$

Pritom, ta promjena može biti determinirana (predvidljiva) ili stohastička (nepredvidljiva). Kod determinirane promjene funkcijske veze između varijabli su egzaktno opisane, stoga je rezultat uvijek isti za iste vrijednosti ulaznih varijabli. S druge strane, kod stohastičke promjene se varijable opisuju raspodjelom vjerojatnosti, a rezultat ne mora uvijek biti isti. Nestacionarni procesi opisuju se *dinamičkim modelima procesa*.

Osim s obzirom na promjenu procesnih veličina u vremenu, procesi se mogu sagledavati i s obzirom na promjenu procesnih veličina u prostoru, međutim oni se ovdje neće razmatrati.



Slika 1 – Pojednostavljeni blok dijagram procesa

Za potrebe vođenja, većinu procesa u kemijskoj procesnoj industriji moguće je opisati pojednostavljenim dinamičkim modelima i to: modelom procesa prvog reda, modelom procesa drugog reda i modelom integrirajućeg procesa. U nastavku ćemo analizirati odzive tih triju najčešćih odziva procesa na **skokomičnu promjenu ulazne veličine** (pobudu) iznosa M .

Model procesa prvog reda

Model procesa prvog reda općenito se izražava običnom, nehomogenom linearnom diferencijalnom jednačinom s konstantnim koeficijentima:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K \cdot u, \quad (3)$$

gdje su τ vremenska konstanta procesa (engl. *process time constant*), a K statička osjetljivost procesa (engl. *steady state gain*, ili općenito: *process gain*).

Vremenska konstanta je mjera brzine odziva a, prema definiciji, to je vrijeme potrebno da odziv poprimi 63,2 % konačne vrijednosti nakon skokomične promjene ulaza. Što je veća, odziv procesa je sporiji, odnosno tromiji. S druge strane, **statička osjetljivost procesa** govori o tome koliko će se ukupno u konačnici promijeniti izlazna veličina procesa za određenu promjenu ulazne veličine:

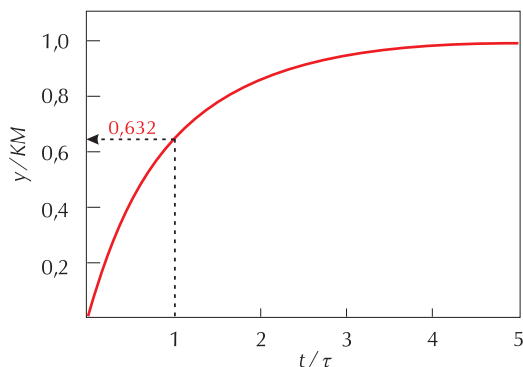
$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\Delta y}{M}. \quad (4)$$

Diferencijalna jedn. (3) tradicionalno se rješava primjenom Laplaceovih transformacija, kako bi se dobila odzivna funkcija koja opisuje ovisnost izlazne varijable, y , o vremenu za određenu promjenu ulazne veličine, u (npr. pobude iznosa M):

$$y(t) = KM(1 - e^{-t/\tau}). \quad (5)$$

* Dr. sc. Antonija Čelan, zn. suradnica
e-pošta: akacunic@ktf-split.hr

Odziv procesa prvog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine iznosa M prikazan je na slici 2.



Slika 2 – Odziv procesa prvog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine iznosa M u normiranom (bezdimenzijskom) prikazu

Kod procesa prvog reda brzina odziva je najveća u trenutku promjene ulazne veličine ($t = 0$), a odzivna krivulja se asimptotski približava konačnoj vrijednosti. U tablici 1 dan je odziv procesa prvog reda za pojedine vrijednosti vremenske konstante.

Tablica 1 – Odziv procesa prvog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine

t/τ	$y(t) / KM = 1 - e^{-t/\tau}$
0	0
1	0,6321
2	0,8647
3	0,9502
4	0,9817
5	0,9933

Model procesa drugog reda

Naravno, ne mogu se svi procesi opisati modelom prvog reda. Većina ih se sastoji od nekoliko jediničnih procesa povezanih serijski, paralelno ili pak s povratnim tokom tvari/energije. Takvi procesi mogu se opisati modelom drugog ili višeg reda.

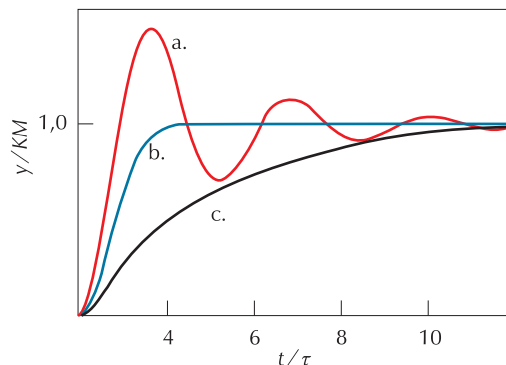
Model procesa drugog reda izražava se diferencijalnom jednačinom drugog reda:

$$\tau^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku, \quad (6)$$

gdje je τ vremenska konstanta procesa, K statička osjetljivost procesa, a ζ bezdimenzijski koeficijent prigušenja (engl. *damping coefficient*). Upravo o potonjem parametru ovisi odziv procesa drugog reda, pa tako za $\zeta > 1$ vrijedi da je vladanje procesa prigušeno (engl. *overdamped*), kad je $\zeta = 1$, vladanje procesa je kritično (engl. *critically damped*), za $0 \leq \zeta < 1$ vladanje procesa je neprigušeno dok je za $\zeta < 0$ proces nestabilan.

Za razliku od procesa prvog reda, kod procesa drugog (i višeg reda) najveća brzina odziva se javlja nakon nekog vremena, odnosno u točki infleksije odzivne krivulje. Na skokomičnu promjenu ulaznog signala, njihov odziv poprima oblik kao što je prikazano na slici 3.

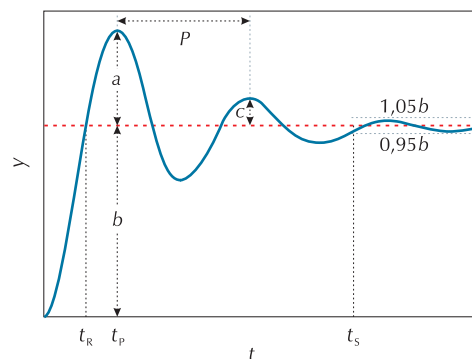
Očito, neprigušene procese drugog reda karakteriziraju nadvišenja (prebačaji) te oscilacije koje se ne javljaju kod prigušenog i kritično prigušenog procesa. O koeficijentu prigušenja ovisi i oblik odziva procesa, što je on veći, odziv procesa je tromiji. Najbrži odziv bez nadvišenja se ostvaruje kada je vrijednost koeficijenta prigušenja jednaka 1, odnosno kod kritično prigušenih procesa.



Slika 3 – Neprigušeni (a.), kritično prigušeni (b.) i prigušeni odziv (c.) procesa drugog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine iznosa M u normiranom (bezdimenzijskom) prikazu

S druge strane, odziv neprigušenog procesa karakteriziraju:

- vrijeme rasta (engl. *rise time*), t_R – vrijeme potrebno da izlaz prvi put dosegne vrijednost novog ustaljenog stanja (novo ravnotežno stanje),
- vrijeme do prvog maksimuma (engl. *time to first peak*), t_P – vrijeme potrebno da izlaz prvi put dosegne maksimalnu vrijednost,
- vrijeme smirivanja (engl. *settling time*), t_S – vrijeme potrebno da izlaz dosegne i ostane unutar $\pm 5\%$ od konačne vrijednosti novog ustaljenog stanja,
- nadvišenje ili prebačaj (engl. *overshoot*), a/b – omjer maksimalno postignute vrijednosti izlaza i vrijednosti postignute u novom ustaljenom stanju,
- omjer nestajanja (engl. *decay ratio*), c/a – omjer vrijednosti izlaza dvaju sukcesivnih pikova na krivulji odziva,
- period oscilacije (engl. *period of oscillation*), P – vrijeme između dva sukcesivna pika na krivulji odziva.



Slika 4 – Karakteristike odziva neprigušenog procesa drugog reda

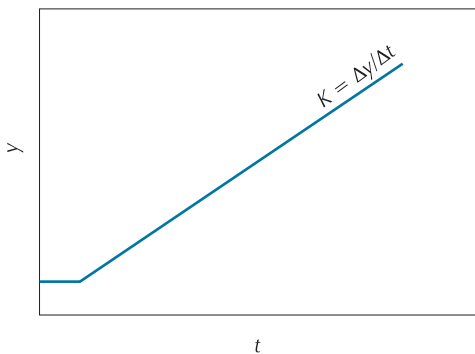
Model integrirajućeg procesa

Ako se sagledaju odzivi procesa prvog i drugog reda na skokomičnu promjenu ulazne veličine, moguće je uočiti da u oba slučaja nakon određenog vremena procesi dosežu novo ustaljeno stanje.

Novo ustaljeno je ujedno i novo ravnotežno stanje, a procesi koji ga dostižu se nazivaju *samoregulirajućim procesima* (engl. *self-regulating processes*). Međutim, postoje procesi kod kojih se novo ustaljeno stanje ne dostiže već izlazna veličina nastavlja rasti odnosno padati ovisno o smjeru promjene ulazne veličine. Takvi procesi nazivaju se *integrirajući procesi* (engl. *integrating processes*) čiji se model izražava jednadžbom:

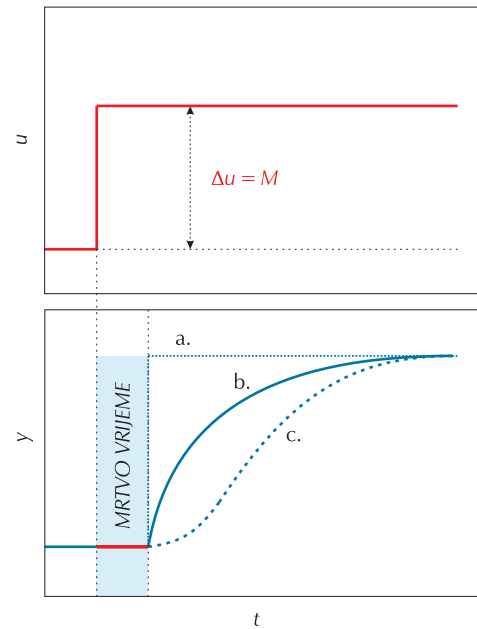
$$\frac{dy}{dt} = Ku. \quad (7)$$

Statička karakteristika procesa u tom slučaju ne predstavlja odnos promjene izlaza i promjene ulaza, već nagib pravca, tj. brzinu promjene izlazne veličine. Vremenska konstanta se u tom slučaju ne može definirati, što je i logično, s obzirom na to da se ne doseže novo ustaljeno stanje. Na slici 5 prikazan je odziv integrirajućeg procesa na skokomličnu promjenu ulazne veličine.



Slika 5 – Odziv integrirajućeg procesa na skokomličnu promjenu ulazne veličine

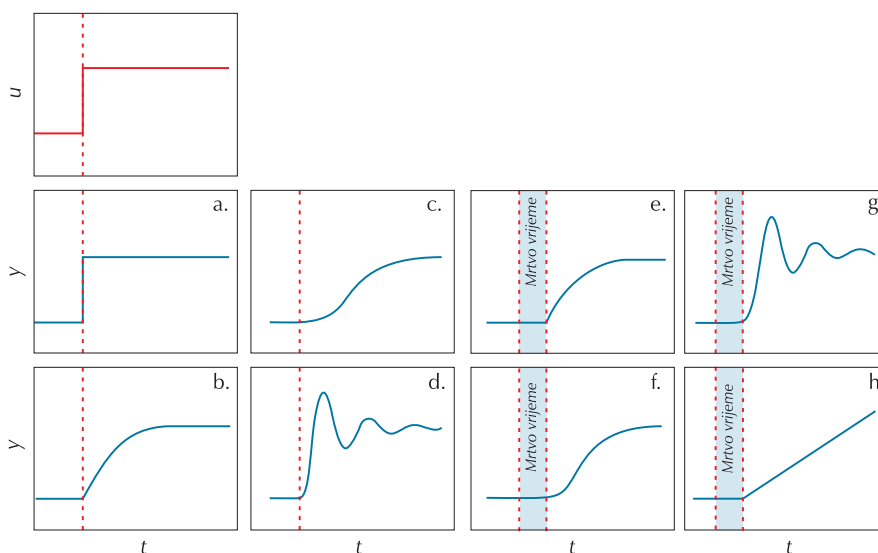
Na slici je vidljivo da uslijed skokomlične promjene ulazne veličine dolazi do stalnog rasta izlazne veličine te proces ne dolazi u novo ustaljeno stanje. Međutim, ustaljeno stanje moguće je postići kod integrirajućih procesa pri pulsnoj promjeni ulazne



Slika 6 – Čisto mrtvo vrijeme procesa (a.), mrtvo vrijeme u kombinaciji s odzivom procesa prvog reda (b.) i u kombinaciji s procesom višeg reda (c.)

veličine, pri čemu se ulazna pobuda vraća na početnu vrijednost. Tipičan primjer takvih procesa u industriji je regulacija razine u spremnicima.

Pored vremenske konstante i statičke osjetljivosti procesa, u pravilu se definira i treći karakteristični procesni parametar koji se naziva **mrtvo vrijeme**. Mrtvo vrijeme (engl. *dead time*, *time delay*) je vrijeme potrebno da krene promjena izlazne veličine nakon što se promijenila ulazna veličina procesa. Može se pojaviti u kombinaciji s odzivom procesa prvog ili višeg reda ili pak kao čisto mrtvo vrijeme, što je prikazano na slici 6. Određuje se jednostavno mjerenjem vremena od trenutka izazivanja pobude do pojave odziva na tu pobudu.



Slika 7 – Karakteristični odzivi kemijskih procesa na skokomličnu promjenu ulazne veličine: čisto pojačanje (a.), proces 1. reda (b.), prigušeni proces 2. reda (c.), neprigušeni proces 2. reda (d.), proces 1. reda s mrtvim vremenom (e.), prigušeni proces 2. reda s mrtvim vremenom (f.), neprigušeni proces 2. reda s mrtvim vremenom (g.) i integrirajući proces s mrtvim vremenom (h.)

Mrtvo vrijeme smatra se jednim od većih problema kod vođenja procesa jer, ako nema odziva, nema ni povratne informacije o stanju procesa, stoga ne može započeti korekcijsko djelovanje. Pojavu mrtvog vremena uzrokuje primjerice tuljac mjernih son-di. Iako tuljac štiti osjetilo od potencijalno agresivne okoline u reaktoru, istodobno se produlje vrijeme potrebno za mjerenje npr. temperature. Objašnjenje za tu pojavu leži u mehanizmima prijenosa topline. Mrtvo vrijeme uzrokuje i udaljenost mjernog osjetila od mjesta nastanka promjene u procesu. U tom slučaju mrtvo vrijeme odgovara vremenu potrebnom da promjena dosegne osjetilo (npr. u cijevnom reaktoru) pa se zbog toga ono naziva još i prijenosno kašnjenje (engl. *transportation delay*). Vrijeme potrebno za provedbu uzorkovanja u procesu u svrhu određivanja neke procesne veličine također rezultira pojavom mrtvog vremena. Očito je da se u tim slučajevima, zbog prirode procesa, mrtvo vrijeme teško može izbjeći. No mrtvo vrijeme se može javiti i kao posljedica lošeg projektiranja – npr. ukoliko se osjetilo u procesu postavi na pogrešnom mjestu, što svakako treba izbjeći jer uzrokuje probleme pri vođenju procesa.

Analiza dinamike procesa

Kako bi se analizirala dinamika procesa, najjednostavnije je provesti tzv. test na skok (engl. *step test*), odnosno izazvati skokomičnu promjenu ulazne veličine te pratiti odziv izlazne veličine na tu promjenu. Karakteristični odzivi procesa na skokomičnu promjenu ulazne veličine prikazani su na slici 7.

Prema tome, na temelju izgleda odzivne krivulje moguće je procijeniti o kojem odzivu procesa se radi. Pojednostavljeno rečeno, ako proces doseže novo ustaljeno stanje – radi se o samoregularajućem procesu koji je vjerojatno prvog ili drugog reda. Koje je pak reda proces, moguće je odrediti na temelju (ne)postojanja točke infleksije. Ako se radi o integrirajućem procesu, odziv neće doći u novo ustaljeno stanje.

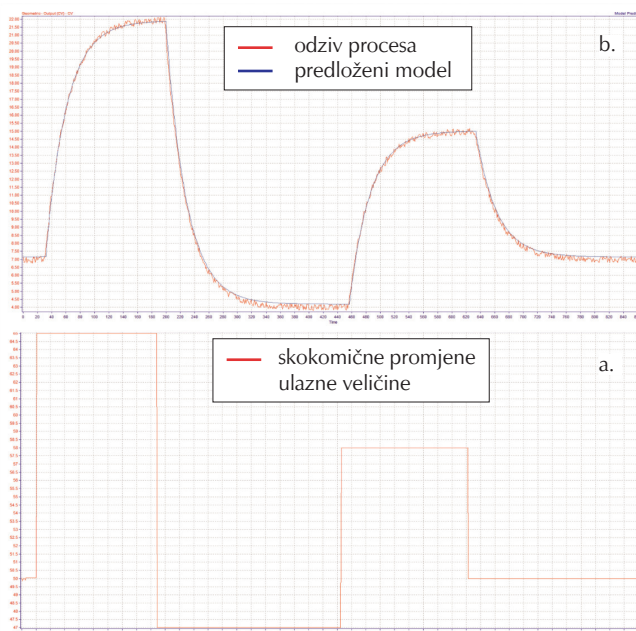
Primjer određivanja parametara procesa

Kao što je u uvodu navedeno, parametre procesa moguće je jednostavno odrediti na temelju eksperimentalnih podataka primjenom nekog od računalnih programa. U ovom primjeru to je program *Pitops* tvrtke PiControl Solutions LLC.

Za određivanje parametara modela potrebno je provesti test na skok i dobivene podatke unijeti u računalni program. Parametri modela se potom jednostavno odrede u svega u nekoliko koraka. Optimizacijski algoritam određuje parametre modela koji se mogu dodatno podesiti kako bi model što bolje opisivao eksperimentalno dobivene podatke. Primjer određivanja parametara modela procesa prikazan je na slici 8.

Literatura

- Z. Gomzi, Ž. Kurtanjek, Modeliranje u kemijskom inženjerstvu, HDKI/FKIT, Zagreb, 2019., str. 3–129.
- D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, F. J. Doyle III, Process Dynamics and Control, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2011., str. 40–134.
- B. G. Lipták, Process Control and Optimization, Vol. 2, CRC Press, Boca Raton, 2006., str. 96–113.
- URL: <https://www.picontrolsolutions.com/> (30. 5. 2020.).



Slika 8 – Određivanje parametara modela procesa: skokomične promjene ulazne veličine u pozitivnom i negativnom smjeru (a.), odziv procesa na skokomičnu promjenu ulazne veličine s prikazanim modelom (b.)

Na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu se, uz navedeni računalni program, koristi još i SIMCET. Potonji služi kao simulator procesa i regulacije u realnom vremenu. S druge strane, PITOPS služi za identifikaciju procesa te ugađanje PID regulatora, ali i napredno vođenje procesa. Oba programa se koriste kao dio nastavnog procesa u kolegijima Mjerenje i automatsko vođenje procesa na diplomskom studiju kemijske tehnologije, smjer Zaštita okoliša te Automatska regulacija procesa na diplomskom studiju kemijske tehnologije, smjer Materijali.

Primjenom navedenih računalnih programa, studentima je omogućeno upoznavanje s karakterističnim procesima kemijske i petrokemijske industrije čime su značajno unaprijeđene vježbe iz navedenih kolegija. U softverskom paketu SIMCET studenti simuliraju i optimiraju različite sustave za vođenje procesa kao što su regulacija temperature u protočno kotlastom reaktoru s miješanjem, regulacija temperature u destilacijskoj koloni i regulacija protoka u izmjenjivaču topline. U softverskom paketu PITOPS studenti identificiraju modele tehnoloških procesa i upoznavaju metode ugađanja regulatora. Pored toga, u narednim akademskim godinama planira se u nastavu uvesti projektiranje i optimiranje sustava za naprednu regulaciju procesa.

Uz ostale vježbe koje su tematikom vezane uz procesna mjerenja, studenti tako stječu temeljna znanja, ali i praktična iskustva koja su esencijalna za cjelovito obrazovanje budućih procesnih inženjera. Osim u nastavi na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu, navedeni programi se koriste i na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, a primjenjeni su i za optimiranje rada postrojenja u procesnoj industriji (npr. Rafinerija Rijeka, Rafinerija Sisak, Pliva, Cemex, Calucem, Hospira/Pfizer, Xellia, Petrokemija itd.)