



MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA

Uređuje: Nenad Bolf

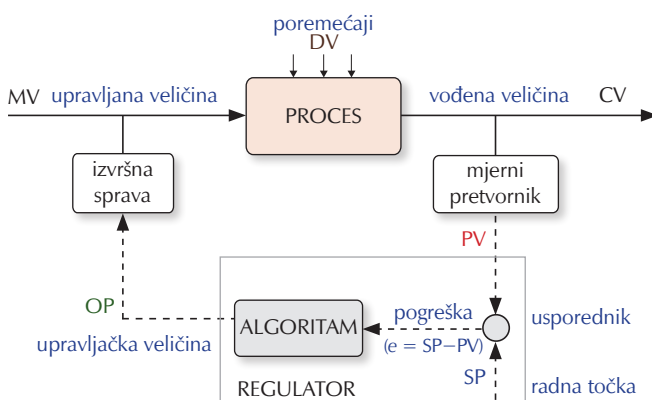
Regulatori su ključne komponente u sustavu čiji je zadatak održati procesne varijable i cjelokupni proces na željenim, odnosno optimalnim vrijednostima. O djelovanju regulatora ovisi kvaliteta proizvoda, stabilnost postrojenja te utrošak energije i ostalih pomoćnih medija. Stoga bi se na svakom postrojenju ugađanju regulatora trebala posvetiti velika pozornost. Naše iskustvo kaže da više od 80 % regulacijskih krugova nije optimalno ugađeno, a da približno 30 % nije nikada ugađano. Posljedice možete pretpostaviti, no za bolje razumijevanje u ovom prilogu krenut ćemo od osnova.

Regulatori

|| N. Bolf*

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

Na slici 1 prikazan je regulacijski krug. Regulacijski krug čine proces, mjerni pretvornik, regulator i izvršna sprava. Regulator je kalkulator posebne namjene koji na temelju signala pogreške iz usporednika (komparatora) računa potrebne promjene upravljačke veličine. Obično se kućište regulatora i sve što je u njemu smješteno smatra regulatorom, no na velikim distribuiranim sustavima on je izveden softverski u računalnom sustavu. Osim samog regulatora tu su i ostali funkcionalni elementi: ulazni elementi (A/D-pretvornik), usporednik, snimač i izlazni elementi (D/A-pretvornik). Regulatori se klasificiraju prema izvoru energije koja ih pokreće – elektronički (digitalni), pneumatski, mehanički ili hidraulički. U današnje vrijeme upotrebljavaju se uglavnom digitalni regulatori.



Slika 1 – Regulacijski krug

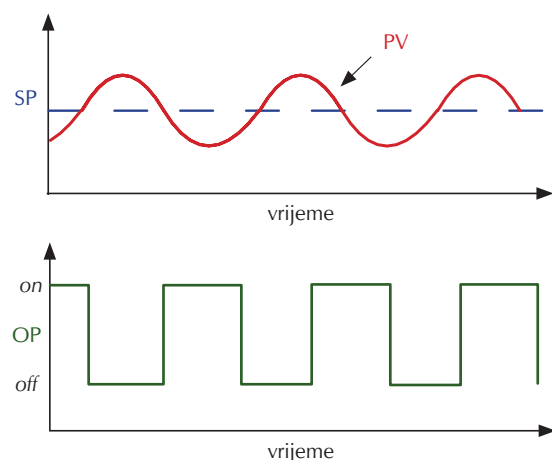
Dvopoložajni regulator

Regulatori mogu biti kontinuirani ili diskontinuirani. Svi digitalni regulatori su u suštini diskontinuirani regulatori, ali u praksi pod diskontinuiranim regulatorom smatra se "dvopoložajni" ili "više-položajni" regulator.

Dvopoložajni regulator (engl. *on/off controller*) jedan je od najčešćih i u industriji i u kućanstvu. Većina kućnih sustava grijanja i bojlera radi s dvopoložajnim regulatorom.

Kod dvopoložajne regulacije upravljačka varijabla poprima ili maksimalnu ili minimalnu vrijednost, ovisno o tome je li vođena varijabla ispod ili iznad radne točke. Minimalna vrijednost upravljačke varijable obično je nula (*off*).

Mehanizam rada dvopoložajnog regulatora u načelu je jednostavan relejski mehanizam. U praksi ne postoji uređaj koji je osjetljiv na vrlo mala odstupanja, niti se takav želi primjenjivati. Vrlo osjetljiv regulator, koji bi učestalo preklapao iz jednog u drugi položaj troši pomične dijelove i kontakte te unosi nestabilnost. Rješenje kod komercijalnih regulatora je postavljanje *mrtve zone* (engl. *dead zone*, *differential gap*, *neutral zone*) na otprilike 0,5 % do 2 % cjelokupnog područja. Kad se vrijednost vođene veličine nalazi unutar mrtve zone nema upravljačkog djelovanja. Na slici 2 prikazana je dvopoložajna regulacija (bez mrtve zone).



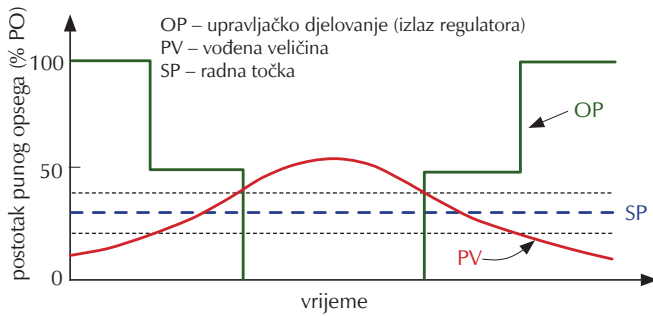
Slika 2 – Dvopoložajna regulacija sustava za grijanje

Uređaji koji se primjenjuju za dvopoložajnu regulaciju su jednostavni, robusni i jeftini. Za dvopoložajni regulator svojstveno je oscilacijsko vladanje. Kod određenih sustava amplituda oscilacije vođene veličine dovoljno je mala.

Jedna varijanta dvopoložajnog regulatora s mrtvom zonom je *tropoložajni regulator* (engl. *three-position controller*), pri čemu regulator daje određeni međuzlaz kada vođena veličina leži u mrtvoj zoni. Na slici 3 prikazana je takva vrsta regulacije i njezin odziv.

Upravljačka varijabla poprima vrijednost 0, 50 i 100 % ovisno o vođenoj veličini.

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



Slika 3 – Tropoložajni regulator

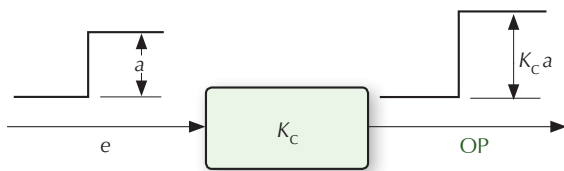
Danas postoje komercijalni regulatori s dodatnim koracima, kao što su regulatori s tri međuizlazna položaja (to je zapravo peteroložajni regulator), no primjenjuju se rjeđe.

Kontinuirani regulator

Kontinuirani regulatori i regulacijski ventili osnova su kvalitetnog vođenja procesa. Pomoću njih se veličine poput protoka, tlaka, temperature, tlaka i koncentracije mogu održavati čvrsto na zadanim vrijednostima.

Proporcionalno djelovanje

Najjednostavniji kontinuirani regulator je onaj sa samo *proporcionalnim djelovanjem* kod kojeg je izlazna veličina regulatora proporcionalna signalu pogreške. Na slici je prikazana promjena izlaza u slučaju kad se ulazna pogreška promijenila trenutno. To se obično zbiva kad operator promijeni radnu točku (SP).

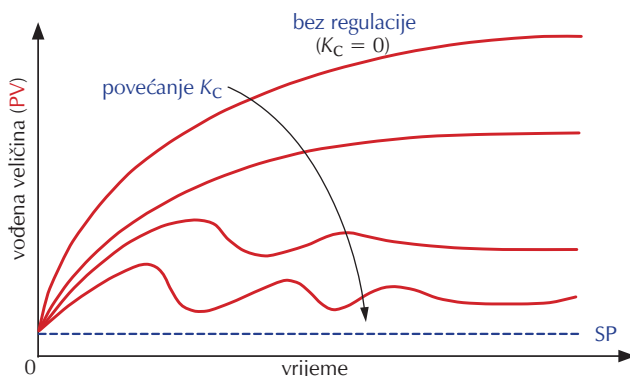


U tom slučaju izlaz iz regulatora (OP) računa se na sljedeći način:

$$OP = K_c e$$

e – signal pogreške (odstupanja), %

Ta jednadžba naziva se *algoritam vođenja*. Parametar K_c je pojačanje regulatora (engl. *controller gain*). Predstavlja promjenu upravljačke veličine po jedinici promjene signala poremećaja.



Slika 4 – Preostalo regulacijsko odstupanje

Proporcionalno djelovanje je najjednostavnije i nalazimo ga kod svih kontinuiranih regulatora. Kod proporcionalnih regulatora postoji linearna veza između ulaza (e) i izlaza (OP) iz regulatora.

Proporcionalni regulator je lako ugoditi jer je potrebno ugoditi samo jedan parametar. Stabilan je i vrlo brzog odziva. Nedostatak proporcionalnog regulatora je preostalo regulacijsko odstupanje (P.R.O.) (engl. *offset*), što znači da nakon djelovanja regulatora uvijek postoji razlika između željene vrijednosti (radne točke) i stvarne vrijednosti vođene veličine. Slika 4 prikazuje da se povećanjem pojačanja regulatora smanjuje odstupanje, ali proces postaje nestabilan pa se regulacijsko odstupanje ne može u potpunosti otkloniti.

Integracijsko djelovanje

Integracijsko djelovanje (engl. *integral action, reset*) predstavlja, zapravo, integraciju signala pogreške, e. To znači da se integracijskim djelovanjem vrijednost upravljačke veličine mijenja brzinom koja je proporcionalna pogrešci, e. Ako je odstupanje dvostruko veće od prethodne vrijednosti, izvršna sprava se kreće dvostruko brže. Kada je vođena veličina u radnoj točki (što znači da nema odstupanja), izvršni element miruje. To znači da u ustaljenom stanju nema preostalog regulacijskog odstupanja. Pogreška u ustaljenom stanju treba biti nula.

Integracijsko djelovanje se u praksi povezuje s proporcionalnim. Ta se kombinacija naziva *proporcionalno-integracijska* (engl. *proportional-reset, proportional-integral*) regulacija (PI-regulacija). Takav regulator ima prednosti oba djelovanja i najčešće se primjenjuje u praksi. Osnovni algoritam vođenja PI-regulacije je sljedeći:

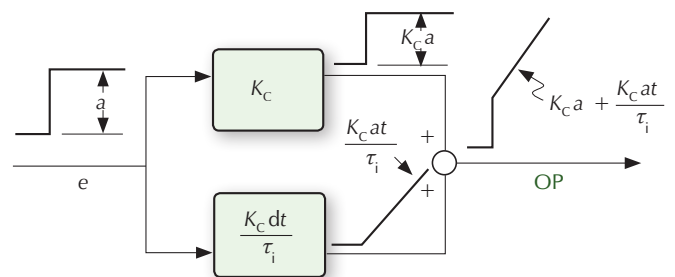
$$OP = K_c \left(e + \frac{1}{\tau_i} \int e dt \right)$$

pri čemu su:

K_c – pojačanje regulatora

τ_i – integracijska konstanta (vrijeme integracije), min

Na slici 5 razložen je PI-regulator kako bi se jasno vidio način njegova rada. Gornji dio regulatora u blok-dijagramu prikazuje proporcionalno djelovanje, a donji integracijsko. U regulatoru se u jednom trenutku pojavila trenutna promjena pogreške (pretpostavimo zbog promjene radne točke), a proporcionalna i integracijska komponenta djeluju na način kako je to prikazano slikom. Budući da odstupanje, u ovom slučaju, ostaje stalno integracijsko djelovanje kontinuirano raste. Naravno, u realnom regulatoru odstupanje će se smanjivati, a time i oba djelovanja.

Slika 5 – Odziv PI-regulatora na trenutnu promjenu odstupanja ($e = SP - PV$)

Ukupni izlaz regulatora je suma oba djelovanja. Integracijsko djelovanje zapravo ponavlja iznos proporcionalnog djelovanja u

vremenu τ_i . Na većini regulatora ugađa se τ_i (integral time), a na nekima recipročna vrijednost koja se naziva "ponavljanje u minuti" (engl. *repeats per minute, reset rate*).

Prednost PI-regulacije je što integracijsko djelovanje uklanja preostalo regulacijsko odstupanje (engl. *offset*). Ipak, zbog integracijskog djelovanja stabilnost regulacijskog kruga je ponešto manja.

Ugađanje PI-regulatora je složenije nego ugađanje jednostavnog proporcionalnog regulatora. Moguće je primijeniti i samo integracijsko djelovanje, ali u posebnim slučajevima.

Derivacijsko djelovanje

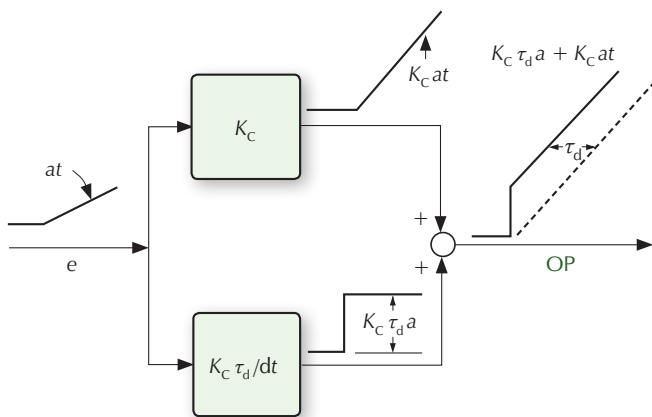
Derivacijsko djelovanje temelji se na brzini promjene signala pogreške, e , i nikad ne dolazi samostalno. Prema tome, derivacijsko djelovanje (engl. *derivative action, rate*) uvijek se javlja zajedno s proporcionalnim. Algoritam proporcionalno-derivacijskog (PD) regulatora glasi:

$$OP = K_c(e + \tau_d \frac{de}{dt})$$

τ_d – derivacijska konstanta (derivacijsko vrijeme), min.

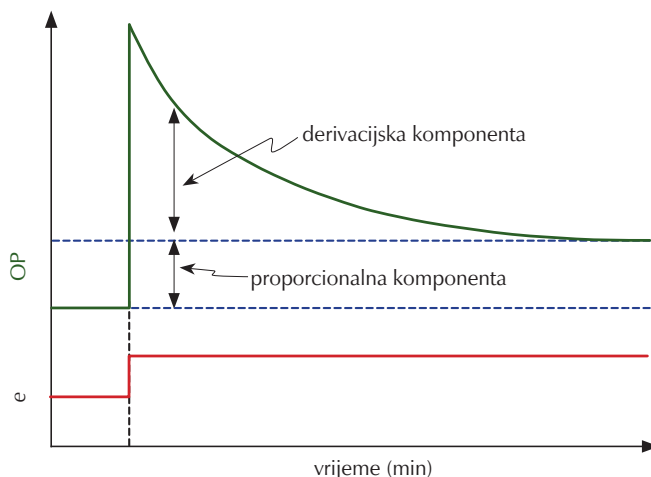
Dodavanjem derivacijskog djelovanja u regulator dodaje se prethođenje (engl. *lead*) da bi se kompenzirala zadržka (engl. *lag*) u krugu. Gotovo svaki proces ima manju ili veću zadržku i zato je prethođenje u regulatoru teorijski poželjno. Derivacijsko djelovanje prilično je teško primijeniti i ugoditi, a njegova primjena je ograničena na procese s velikom zadržkom, odnosno sporim odzivom. Najčešće je to slučaj kod regulacije temperature u velikim reaktorima i spremnicima. Treba imati na umu da mjerni šum može poremetiti izlazni signal. Zbog toga se u pravilu primjenjuju filtri mjernog signala (PV-a).

Kako bi se pojasnilo derivacijsko djelovanje, na slici 6 prikazan je PD-regulator. Gornji dio regulatora u blok-dijagramu prikazuje proporcionalno djelovanje, a donji derivacijsko djelovanje. Pretpostavimo da se u regulatoru signal pogreške mijenja pravčasto, a svaka od komponenata ima svoje karakteristično djelovanje. Derivacijsko djelovanje zapravo unosi prethođenje u regulaciju u iznosu τ_d . Time se sprječavaju velika odstupanja vođene varijable od željene vrijednosti. Derivacijsko djelovanje, ako je krug dobro ugođen, čini krug stabilnijim. Budući da je krug stabilniji, može se uzeti veće pojačanje regulatora i tako smanjiti preostalo regulacijsko odstupanje.



Slika 6 – Odziv PD-regulatora na pravčastu promjenu ulaza ($e = SP - PV$)

Na slici 7 prikazan je odziv PD regulatora na trenutnu promjenu pogreške.



Slika 7 – Odziv PD regulatora na trenutnu promjenu odstupanja ($e = SP - PV$)

PID-regulator

Proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator ili regulator s tri djelovanja (engl. *three-mode*) standardni je kontinuirani regulator za vođenje povratnom vezom kakav se nalazi u svim sustavima za vođenje. Algoritam tog regulatora glasi:

$$OP = K_c(e + \frac{1}{\tau_i} \int edt + \tau_d \frac{de}{dt})$$

Taj regulator ima brzi odziv, nema preostalog regulacijskog odstupanja, ali je najsloženiji za ugađanje. No, ako se dobro ugoditi, postiže se najbolja regulacija tromih procesa kakvi su regulacija temperature i regulacija koncentracije.

O primjeni tih algoritama u praksi, odnosno u sustavima za vođenje govorit ćemo u jednom od sljedećih priloga.

Tablica 1 – Karakteristike regulatora

Regulator	Karakteristike
Dvopoložajni	niska cijena veoma jednostavan
Proporcionalni	jednostavan inherentno stabilan P.R.O. u ustaljenom stanju
Proporcionalni – integracijski	uklanja P.R.O. unosi ponešto nestabilnosti
Proporcionalni – derivacijski	stabilan manje P.R.O. nego kod P-regulatora smanjuje zadržku i odziv je brži
Proporcionalni – integracijski – derivacijski	najsloženiji brzi odziv nema P.R.O.-a najbolja regulacija za tromne procese