

## ODABIR REGULATORA

- Za određeni proces koji se želi automatizirati potrebno je odabrat i primjeniti prikladni regulator
- Za P, PD, I, PI i PID regulatore svojstva se mogu definirati u tabličnom prikazu:

REGULATOR	STATIČKA POGREŠKA	BRZINA ODGOVORA
P	Da	Visoka
PD	Da	Vrlo visoka
I	Ne	Niska
PI	Ne	Visoka
PID	Ne	Vrlo visoka

- Prema prethodnom razmatranju svojstva kontinuiranih regulatora, mogu se definirati najčešća područja primjene različitih kontinuiranih regulatora

## **P – regulator**

- Upotreba kod jednostavnijih regulacijskih sustava kod kojih se postiže regulacijsko djelovanje na lakši način
- Koriste se kada je u regulacijskom sustavu dopuštena statička pogreška tj. kada se statička pogreška tolerira
- Dinamički odgovor regulatora i stabilno stanje se postiže relativno lako i s minimumom regulacijskog djelovanja

## **PD – regulator**

- Ovakvi regulatori koriste se kada se kod P – regulatora javljaju velika kašnjenja u odgovoru
- D – komponenta povećava brzinu odgovora regulatora, pa je dinamički odgovor regulatora znatno brži nego kod običnih P – regulatora
- I kod ovih regulatora statička pogreška se tolerira u regulacijskom sustavu

## **I – regulatori**

- Ovakvi regulatori pogodni su za sustave s niskim zahtjevima regulacije
- Kada zahtjevi regulacije toleriraju velika kašnjenja u odgovoru mogu se koristiti I – regulatori s niskom brzinom dinamičkog odgovora
- Velika prednost ovih regulatora je u tome što je potpuno eliminirana statička pogreška

## **PI – regulatori**

- PI – regulatori kombiniraju prednosti P i I – regulatora
- Ovaj tip regulatora daje dinamički regulacijski odgovor bez pojave statičke pogreške u tom regulacijskom odgovoru
- Velika većina regulacijskih zahtjeva može se riješiti upotrebom ovoga tipa regulatora
- Jedino ako regulacijski sustav zahtjeva jako veliku brzinu odgovora regulatora tada ovaj regulator nemože ispuniti takve zahtjeve

## PID – regulator

- Ovo je regulator s najkompleksnijim i najopsežnijim regulacijskim djelovanjem
- Ovaj tip regulatora pogodan je za regulacijske sustave gdje se javljuju velika kašnjenja koja se moraju eliminirati na najbrži mogući načina
- Ako PID – regulator uspoređujemo s PI – regulatorom, može se primjetiti da dodana D – komponenta rezultira boljom regulacijskom dinamikom tj. znatno bržim odgovorom
- Usporedbom PID - regulatora s PD – regulatorom, uočava se da dodana I - komponenta spriječava pojavu statičke pogreške
- Odabir prikladnog regulatora izuzetno utječe na parametre sustava ili procesa koji se automatski regulira
- Prilikom odabira prikladnog regulatora za određeni proces ili sustav znatno temeljitije se mora pristupiti problemu i karakteristikama sustava nego što je navedeno u prethodnim opisima različitih vrste regulatora (koji služe kao opći vodič za temeljitu analizu)

## NAMJEŠTANJE REGULACIJSKIH PARAMETARA (regulacijskih koeficijenata)

- Da bi se postigli zadovoljavajući rezultati regulacije, osim upotrebe prikladnog regulatora, još je važnije da regulacijski parametri  $K_p$ ,  $K_D$  i  $K_i$  budu prikladno namješteni, odnosno  $T_v$  i  $T_n$  komponente regulacijskih parametara  $K_D$  i  $K_i$
- Najčešće namještanje regulacijskih koeficijenata postaje kompromis između dva krajnja regulacijska djelovanja



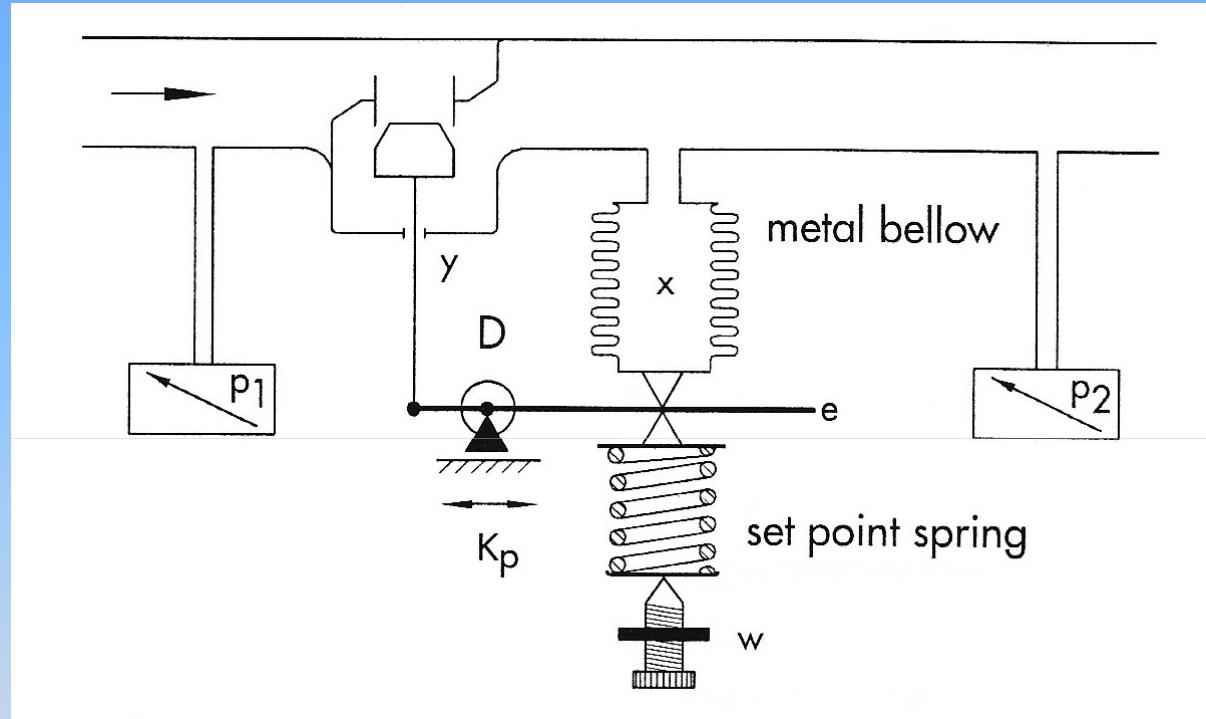
- U praksi regulatori se uobičajeno namještaju na temelju vrijednosti dobivenih iz iskustva
- Ako ovakav pristup nije moguć ili dostpan, mora se detaljno analizirati odgovor regulacijskog sustava, nakon čega će slijediti primjena nekoliko teoretskih i praktičnih pristupa u cilju određivanja ispravnih i prikladnih regulacijskih koeficijenata
- Jedan od pristupa je upotreba **Ziegler i Nichols metode**, odnosno njihove tzv. konačne metode (ultimate method)
- Ova metoda se može primjeniti jedino u regulacijskim sustavima koji dopuštaju određene (podnošljive) oscilacije izlaznih signala
- Za ovu metodu postoji sljedeća procedura postupanja:
  - *na regulatoru postavi  $K_p$  i  $T_v$  u najnižu vrijednost, a  $T_n$  u najvišu vrijednost (na ovaj način postiže se najmanji mogući utjecaj regulatora na sustav)*
  - *namjesti regulacijski sustav ručno (započni regulacijsku petlju)*
  - *postavi upravljanu veličinu na ručno namještenu vrijednost i prebaci na automatski režim rada*

- započni povećavanje vrijednosti  $K_p$  dok izlazni signal ne postigne harmonične oscilacije
- tako namještena vrijednost  $K_p$  je kritični koeficijent proporcionalnog djelovanja  $K_{p,crit}$
- odredi vremenski raspon jedne pune oscilacijske amplitude i označi ga kao  $T_{crit}$
- pomnoži vrijednosti  $K_{p,crit}$  i  $T_{crit}$  s vrijednostima datim u tablici na slici 250. i unesi dobivene vrijednosti za  $K_p$ ,  $T_n$  i  $T_v$  u regulator
- ako je potrebno ponovo namjesti vrijednosti  $K_p$  i  $T_n$  sve dok regulacijsko djelovanje na pokaže zadovoljavajući dinamički odgovor

	$K_p$	$T_n$	$T_v$
P	$0,50 \cdot K_{p,crit.}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{p,crit.}$	$0,85 \cdot T_{crit.}$	-
PID	$0,59 \cdot K_{p,crit.}$	$0,50 \cdot T_{crit.}$	$0,12 \cdot T_{crit.}$

Slika 250. Namještanje vrijednosti kontrolnih parametara prema Ziegler/Nichols metodi

- Na slici 251. je prikazan utjecaj koeficijenta prijenosa KP na izlazni signal regulatora (prikazan je proporcionalni regulator hidrauličkog tipa)

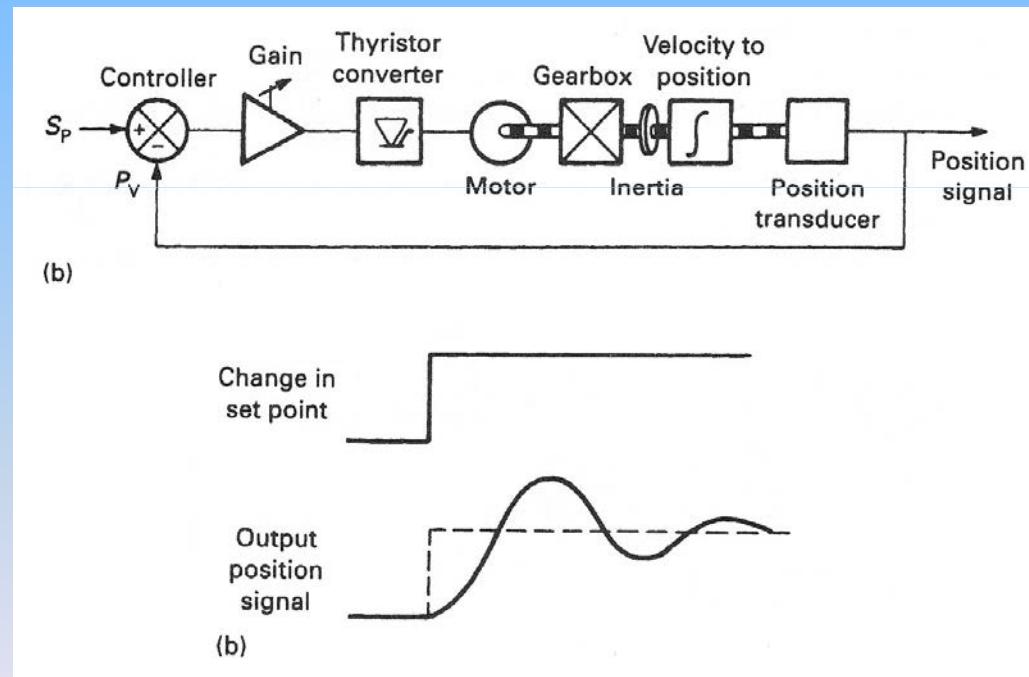


Slika 251. Hidraulički P - regulator

## STABILNOST REGULACIJSKIH SUSTAVA

- Proučavanjem PID regulatora može se uočiti da se savršeno regulacijsko djelovanje postiže uz veliku vrijednost koeficijenta proporcionalnog prijenosa, kratko vrijeme integracije i dugo derivacijsko vrijeme
- Regulacijski sustav će pod takvim uvjetima reagirati jako brzo na poremećaje, promjene u opterećenju i na promjene zadanih vrijednosti
- Nažalost stvarni procesi se razlikuju od teoretskih razmatranja, te kod stvarnih procesa postoje određena ograničenja kod namještanja vrijednosti parametara  $T_n$  i  $T_v$ , iznad kojih se počinju događati nekontrolirane oscilacije regulacijskog sustava
- Ako se promotri regulacijski sustav prikazan na slici 252.a) (regulacijski sustav mjerena pomaka) vidjet će se da se kod opterećenja javlja visoka inercija pokazana preko zamašnjaka
- Ova inercija će ograničiti ubrzanje koje se javlja uslijed promjene zadane vrijednosti
- Kako se opterećenja približava postavljenoj vrijednosti, inercija će i dalje izazivati povećanje brzine okretanja, iako dolazi do smanjenja napona u armaturama elektromotora, opterećenja i dalje raste iako je dostignuta zadana vrijednost (set point)

- Ovo će izazvati jedno ili više prekoračenja (overshoot) postavljene vrijednosti kao što je prikazano na slici 252.b)
- Povećavanje vrijednosti koeficijenta prijenosa, povećati će početnu akceleraciju, ali će također izazvati i višu brzinu vrtnje i veća prekoračenja postavljene vrijednosti
- Smanjenje koeficijenta prijenosa će smanjiti prekoračenja , ali će ujedno i smanjiti veličinu početnog odgovora regulatora

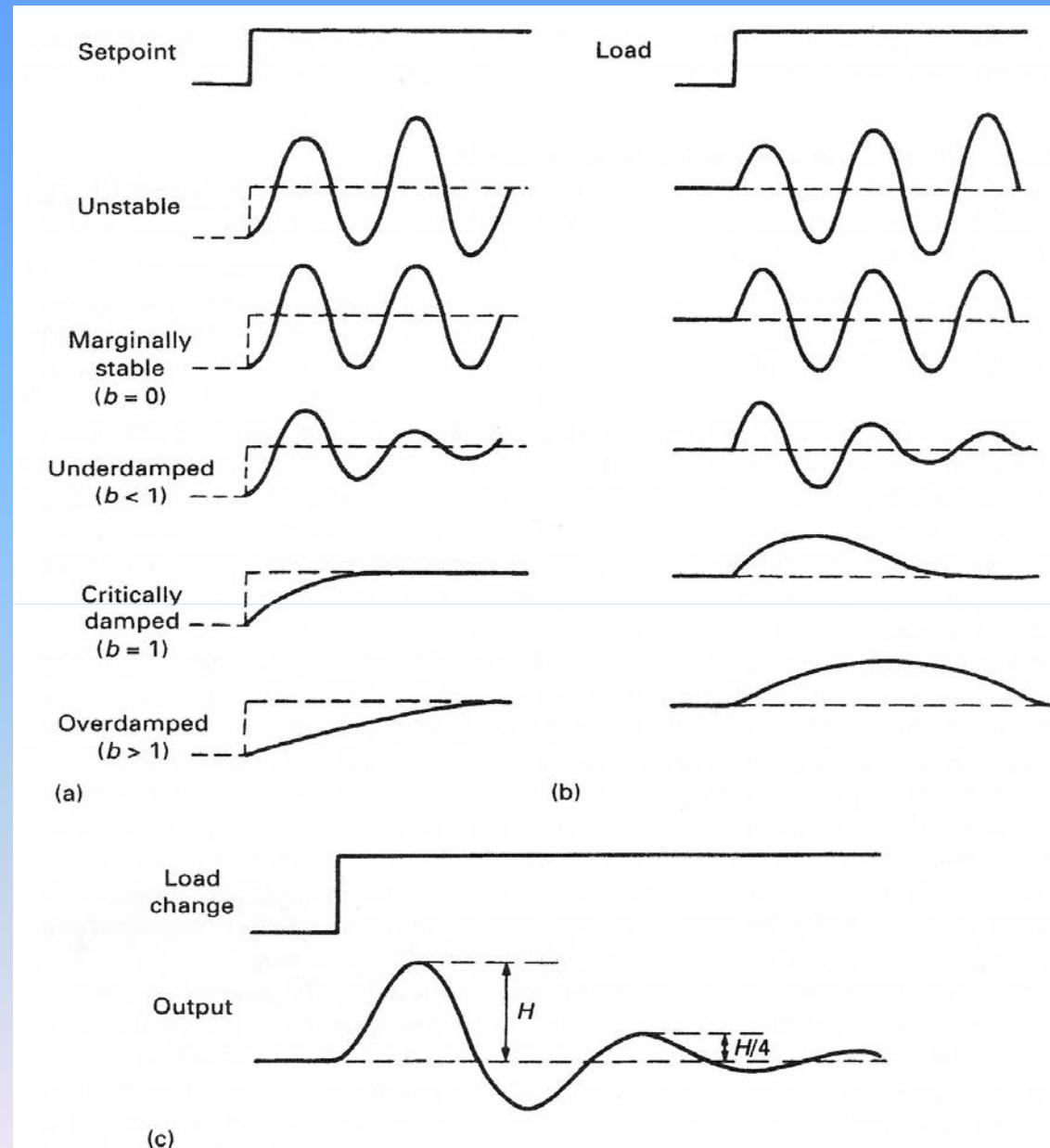


*Slika 252. Reakcija sustava regulacije: a) regulacijski susatv s visokom inercijom, b) izlazni signal regulatora*

- Često se regulacijski sustav povratne veze promatra kao djelovanje sustava drugog reda (ovakva pretpostavka nije potpuno točna)
- Jednadžba za sustav drugog reda, gdje je  $\omega_n$  – prirodna frekvencija, a  $b$  – faktor prigušenja:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2b\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = f(t)$$

- Moguće je utvrditi pet mogućih stanja stabilnosti regulacijskog sustava uslijed promjena zadanih vrijednosti i uslijed poremećaja kako je prikazano na slici 253.a) i b)
- Prvo stanje je kada je regulacijski sustav nestabilan i karakteriziraju ga oscilacije s povećanjem amplituda
- U praksi ove oscilacije se nastavljaju sve dok se jednom od elemenata regulacijskog sustava ne dogodi kvar

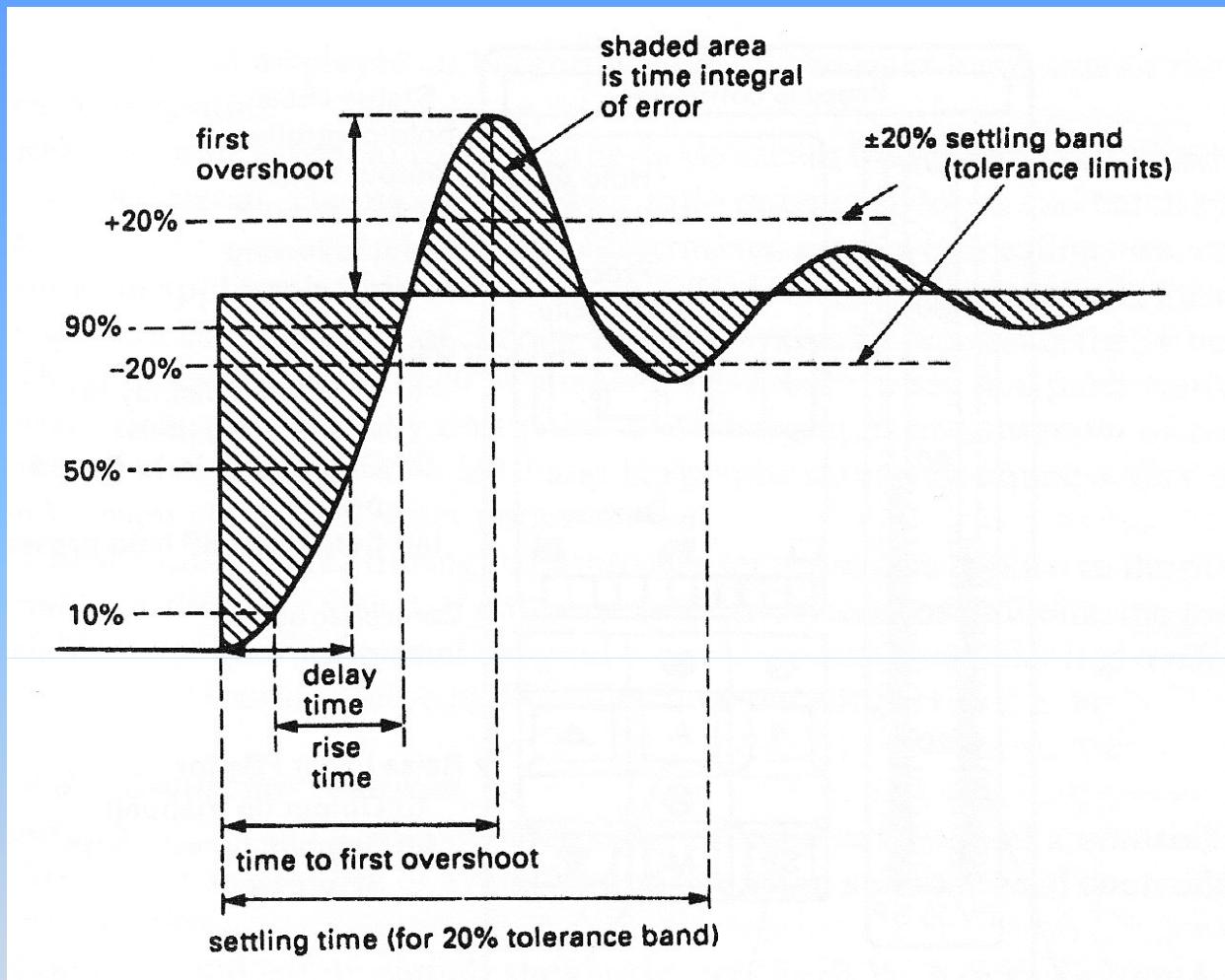


Slika 253.

- skokovita promjena zadane vrijednosti
- skokovita promjena opterećenja
- četvrt-amplitudno prigušivanje

- Drugo stanje su granično stabilni regulacijski sustavi (*marginally stable*) kod kojih će sejavljati oscilacije konstantne amplitude
- Ovakvo ponašanje je sasvim teoretsko tj. nemoguće ga je postići u praksi ali je važno da se razmotri prilikom namještanja regulacijskih elemenata
- Podprigušeni sustavi (*underdamped systems*) spadaju u treće stanje
- Ovdje se također javljaju oscilacije, ali njihova amplituda opada s vremenom te je sustav nakon određenog vremena stabilan
- Važno je naglasiti da pojava oscilacija **ne znači** nužno da je regulacijski sustav nestabilan
- Veličina smanjivanja amplituda oscilacija definirana je faktorom prigušenja
- Često korišten kriterij stabilnosti sustava je tzv. **četvrt-amplitudno** prigušivanje prikazano na slici 253.c)
- Četvrt-amplitudno prigušivanje je ustvari odgovor podprigušenog sustava gdje amplituda svake slijedeće osilacije zauzima četvrtinu vrijednosti prethodne amplitude

- U četvrtu stanje spadaju kritično prigušeni sustavi koji se nalaze na granici između podprigušenih i previše prigušenih sustava
- Ovakve sustave karakterizira najbrži odgovor i to bez prekoračenja (*overshoot*)
- U peto stanje spadaju previše prigušeni sustavi (*overdamped*)
  - Karakteristično za njih je da nema pojave prekoračenja , ali također njihov odgovor je trom i spor
  - Nemoguće je osigurati za bilo koji sustav da odgovor bude trenutan u odnosu na poremećaje i promjene zadane vrijednosti
  - Za kvalitetnije razmatranje stabilnosti sustava i brzine odgovora na poremećaja i promjene zadane vrijednosti, potrebno je definirati pojedine djelove odgovora regulacijskog sustava
  - Definicija pojedinih djelova odgovora regulacijskog sustava prikazano je na slici 254.



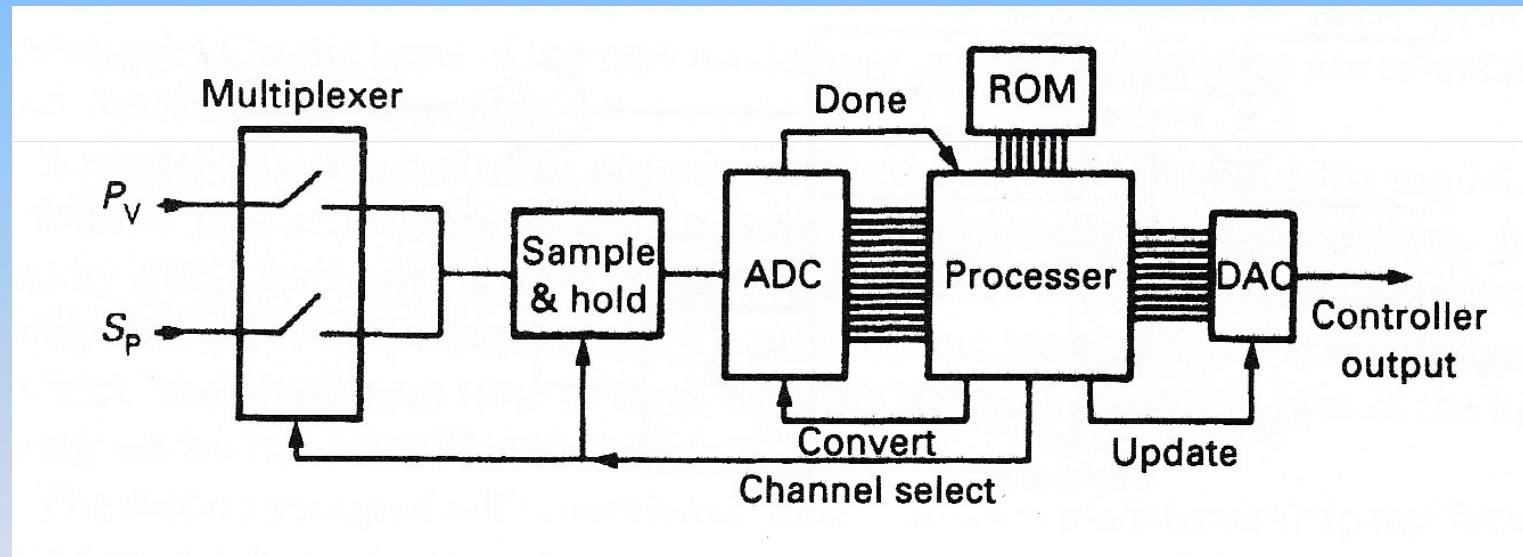
Slika 254. Definicija pojedinih djelova regulacijskog odgovora

- “Vrijeme rasta” (*rise time*) je vrijeme potrebno da vrijednost izlaznog signala poraste od 10% pa do 90% svoje konačne vrijednosti i koristi se za mjerjenja brzine odgovora sustava

- Vrijeme kada izlazni signal postiže vrijednost od 50% svoje konačne vrijednosti naziva se "vrijeme kašnjenja" (*delay time*)
- Ovo kašnjenje je također dio ukupnog kašnjenja regulacijskog sustava ali nije jedino
- Prvo prekoračenje (*first overshoot*) je uobičajeno definirano kao postotak promjene zadane vrijednosti i služi kao indikator faktora prigušenja u regulatoru
- Granica tolerancije (*tolerance limit*) izražava se u obliku postotka promjene zadane vrijednosti
- Kada je proces u okviru granica tolerancije, smatra se da je izlazni signal postigao zadanu vrijednost u procesu
- Tipične vrijednosti granica tolerancije mogu ići od 5% pa do 20%
- Vrijeme prilagodbe (*settling time*) je vrijeme potrebno da izlazni signal (odnosno cijeli regulacijski sustav) dođe i zadrži se unutar granica tolerancije
- Površine ispunjene kosim crtama predstavljaju integracijsku vrijednost pogreške i mogu se koristiti kao indeks djelovanja regulatora

## DIGITALNI REGULATORI

- Mikroprocesori su znatno jeftiniji i šireg djelovanja nego ostali uređaji pa je to dovelo do toga da se danas većina modernih regulatora temelji na digitalnoj tehnici nego na analognoj tehnici
- Blok dijagram tipičnog digitalnog regulatora prikazan je na slici 255.

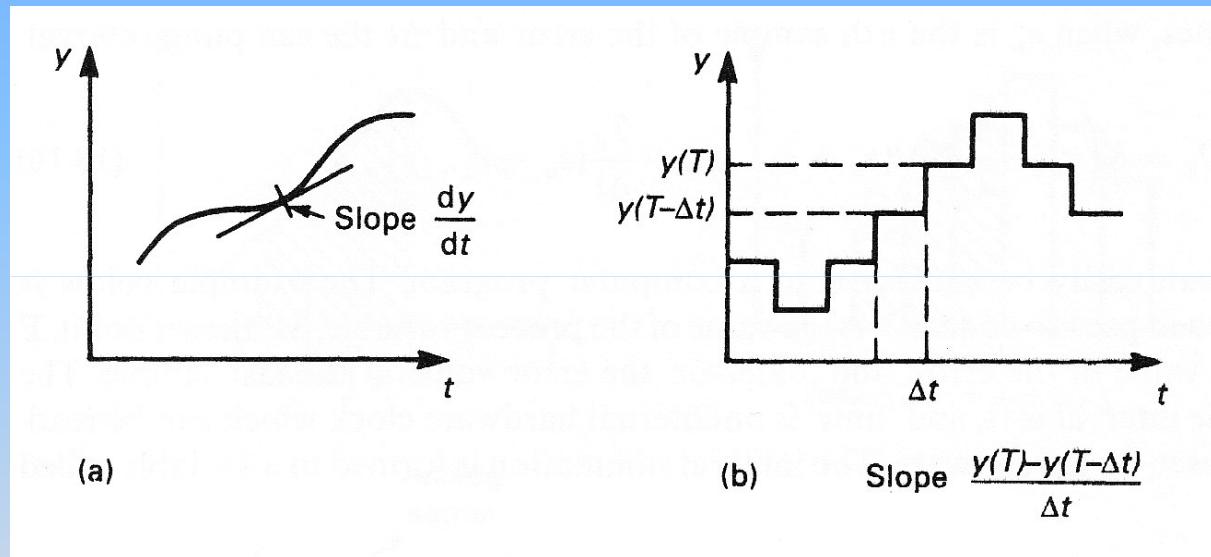


Slika 255. Blok dijagram digitalnog regulatora

- Ulazni analogni signali (na slici 255. su dva) skeniraju se s multiplekserom te nakon toga idu na ADC pretvornik i pretvaraju se u digitalni oblik
  - Digitalni signali idu u procesor u kojem software izvodi regulacijski algoritam
  - U procesoru se formira digitalni oblik izlaznog signala koji se u DAC pretvorniku pretvara u analogni oblik te se vodi na izvršni element u procesu
  - Najpoznatiji predstavnik digitalnih regulatora su PLC uređaji koji dolaze u različitim konfiguracijama i vrlo su prilagodljivi za različite regulacijske procese
- Digitalni algoritmi**
- Algoritmi koji se koriste u digitalnim sustavima općenito se temelje na matematičkim jednadžbama s računskim operacijama oduzimanja nego na diferencijalnim jednadžbama i s korištenjem  $\Delta t$  umjesto  $dt$  za vremenski uzorak
  - Razlike između analognog i digitalnog sustava prikazane su na slici 256. gdje je na slici 256.a) kosina definirana izrazom  $dy/dt$

- Na slici 256.b) ta kosina je predstavljena ekvivalentno u digitalnom obliku i s matematičkim izrazom:

$$\frac{y(T) - y(T - \Delta t)}{\Delta t}$$



Slika 256. Matematičke jednadžbe: a) analogni sustav, b) digitalni sustav

- Na slici 257. prikazana je integracija digitalnih signala tj. uspoređeni su načini integracije površine ispod analogne i digitalne krivulje

- Integracija ispod digitalne krivulje obavlja se na način da se zbrajaju pojedinačne pravokutne površine kao npr.:  $y_1\Delta t + y_2\Delta t + \dots + y_n\Delta t$

- Odnosno preciznije:

$$\sum_{1}^n y_n \Delta t$$

- Točniji integracijski algoritam je trapezoidni prikaz na slici 257.c) gdje je pojedinačna površina definirana s izrazom:

$$\frac{\Delta t(y_n - y_{n-1})}{2}$$

- Ukupna površina je definirana matematičkim izrazom:

$$\sum_{1}^n \frac{\Delta t(y_n - y_{n-1})}{2}$$

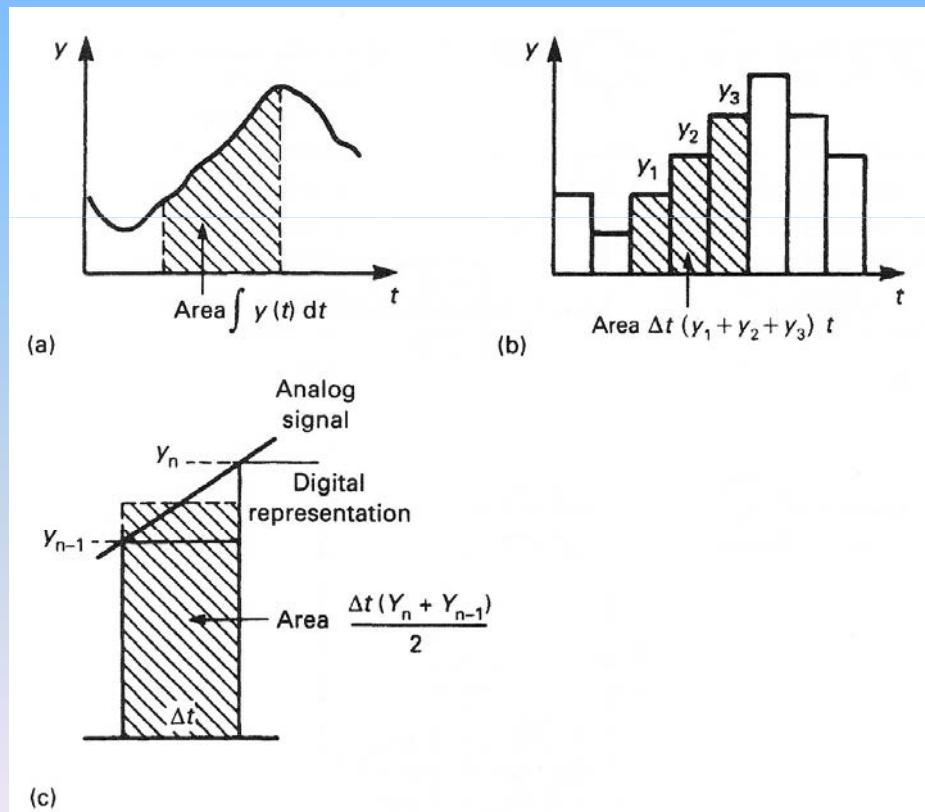
- Poznati izraz za trokomponentne regulatore:

$$y = K \left( e + \frac{1}{T_n} \int e dt + T_V \frac{de}{dt} \right)$$

- Može se pisati na slijedeći način kod primjene u digitalnom sustavu:

$$y = K \left( e_n + \frac{1}{T_n} \sum \frac{\Delta t (e_n + e_{n-1})}{z} + \frac{T_V}{dt} (e_n - e_{n-1}) \right)$$

- Gdje je  $e_n$  n-ti uzorak pogreške, a  $\Delta t$  je vremenski interval



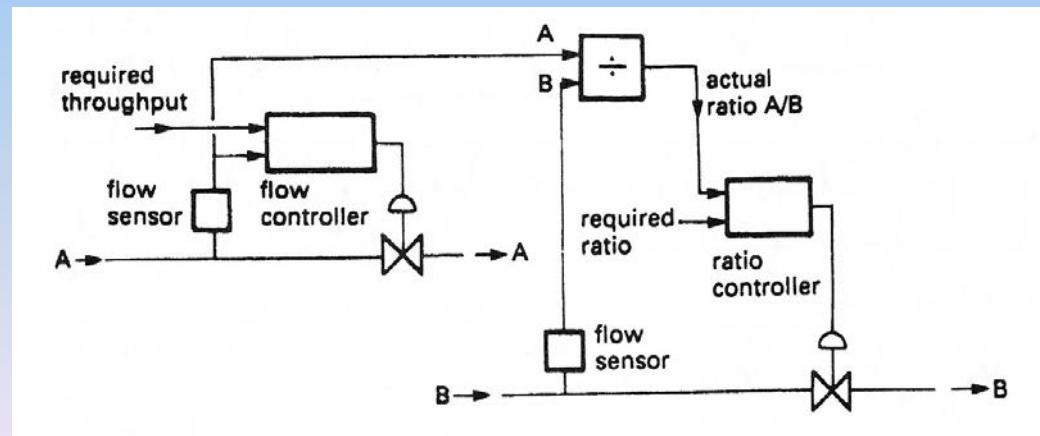
Slika 257.

*Integracija digitalnih signala:*

- a) površina ispod analognog signala
- b) površina ispod digitalnog signala
- a) preciznija integracija digitalnog signala

## DODATNE REGULACIJSKE STRATEGIJE

- Regulacija pomoću omjera
- Ovakva regulacija se može provoditi kada postoje dvije ili više procesnih varijabli koje se moraju održavati u preciznom omjeru jedna prema drugoj
- Npr. plinski plamenik zahtjeva omjer od 2.1:1 između kisika i plina da bi se postiglo izgaranje maksimalne učinkovitosti
- U teoriji izgaranja ovaj omjer se zove stehiometrijski omjer
- Ovakav regulacijski sustav prikazan je na slici 258.

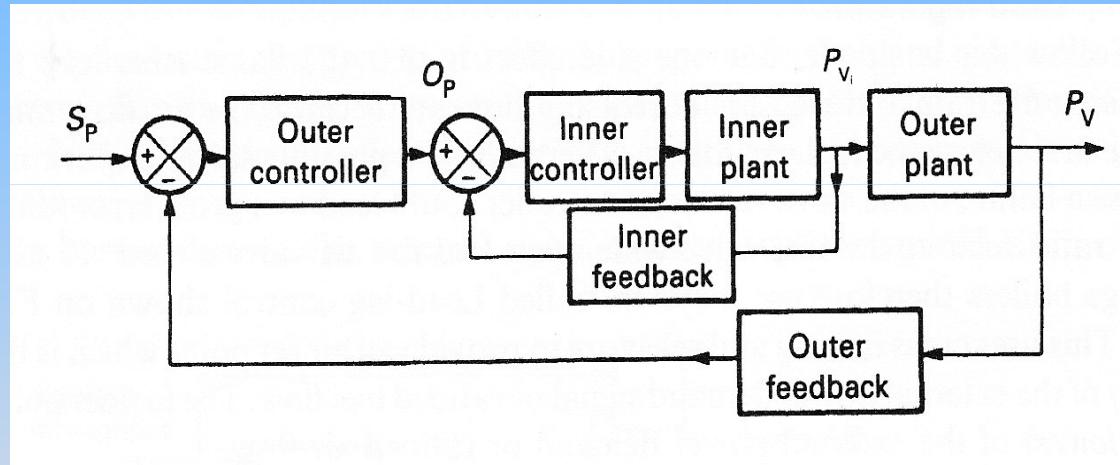


Slika 258. Metoda regulacije pomoću omjera

- Nažalost ova metoda nije potpuno točna te pri malim protocima zraka i plina ne ostvaruje regulacijsko djelovanje i ne osigurava dovoljnu stabilnost regulacijske petlje

### - Kaskadna regulacija

- Kod ovakvih sustava postavljaju se dodatni sustavi povratne veze, pa tako postoji vanjske i unutarnje povratne veze kako je prikazano na slici 259.



Slika 259. Sustav kaskadne regulacije

- Na slici 259. može se primjetiti da izlazni signal vanjskog regulatora (*outer controller*) postaje zadana vrijednost (*set point*) unutarnjeg regulatora (*inner controller*)

- Bilo kakav problem u unutarnjoj petlji (poremećaji, nelinearnosti) rješava se unutarnjim regulatorom i ne utječe na vanjsku petlju i ne utječe na konačnu procesnu varijablu  $P_v$
- Kod sustava kaskadne regulacije, unutarnja petlja (*inner loop*) mora biti znatno brža nego vanjska petlja (*outer loop*) i unutarnji regulator se mora prvi namjestiti prilikom instalacije regulacijskog sustava u proces
- Ovakav sustav može ukloniti poremećaje koji se zbivaju u početnim djelovima regulacijskog sustava