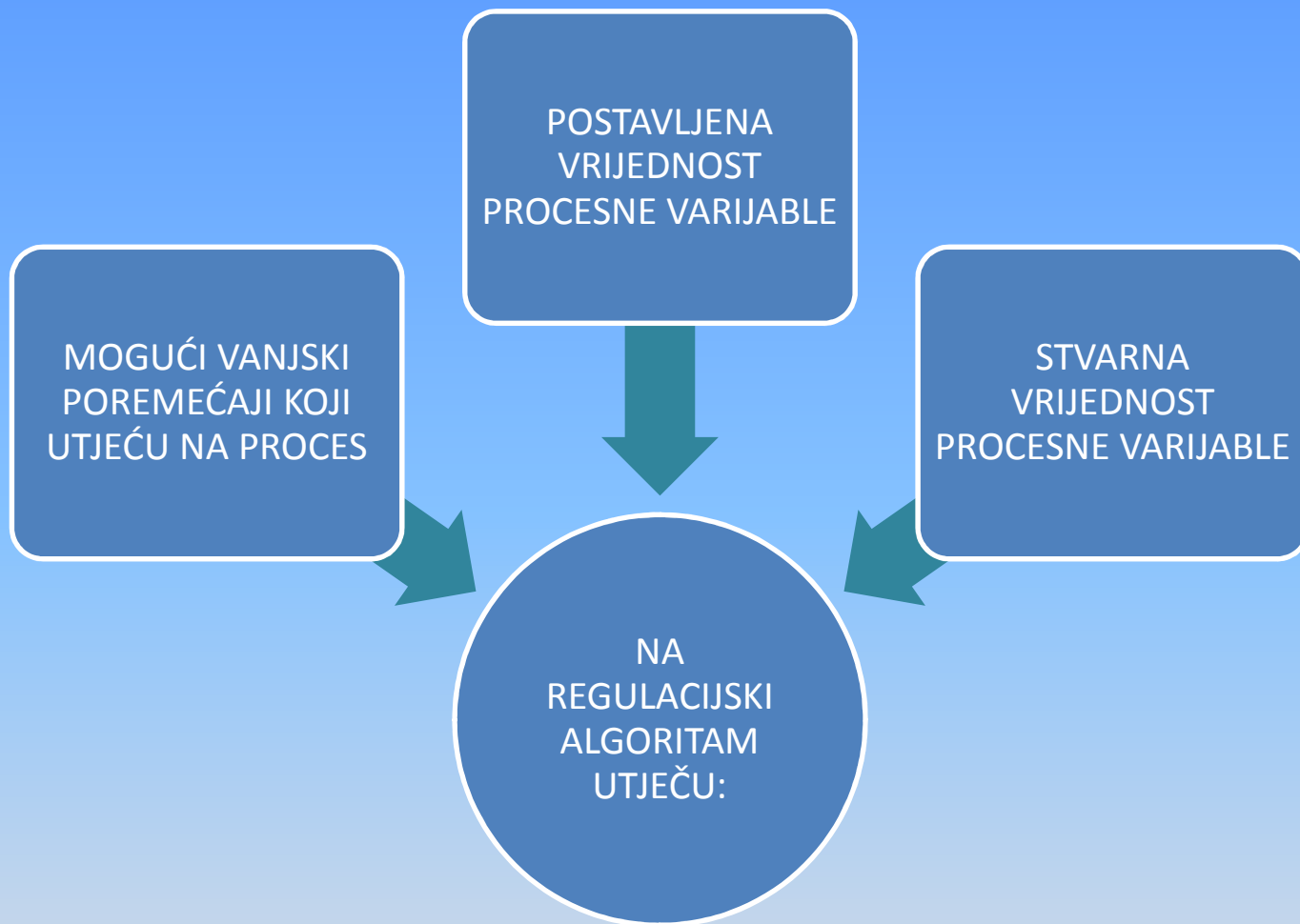
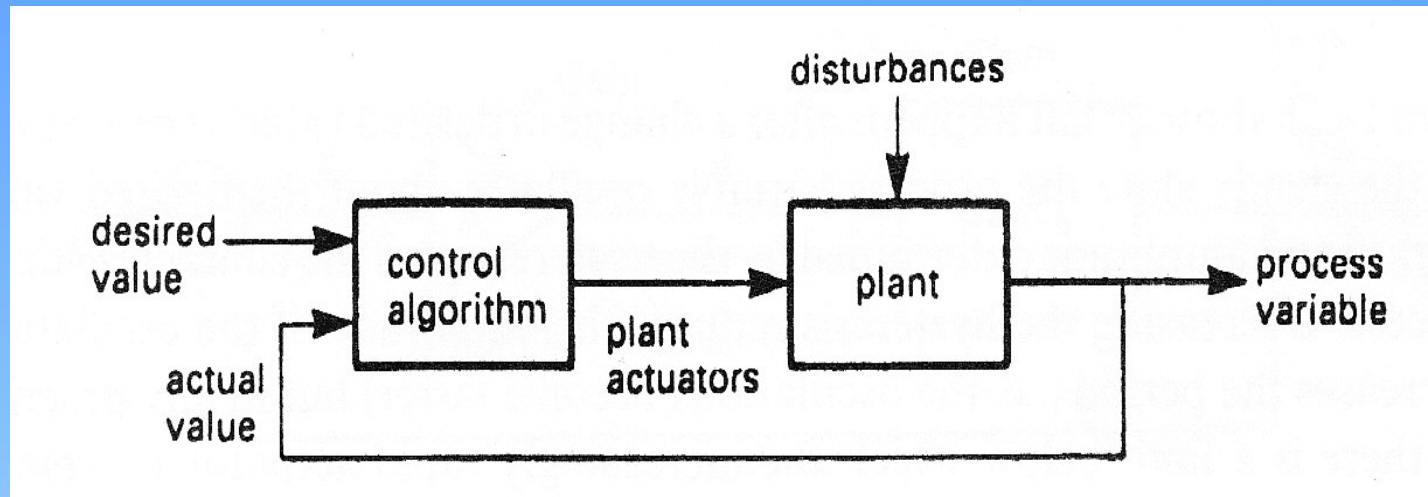


SUSTAV POVRATNE VEZE

- Kao što je već dosada navedeno, većina sustava automatske regulacije industrijskih procesa temelji se na sustavu povratne veze
- U većini procesa procesne varijable (ulazni signali npr. temperatura, tlak, protok, pomak, kemijska analiza) zahtjevaju da se održavaju na propisanoj vrijednosti
- Regulacijsko djelovanje na proces se ostvaruje izvršnim elementima
- Tako npr. kontrola temperature izgaranja u kotlu postiže se djelovanjem na ventile protoka goriva i zraka na plameniku kotla
- Kontrola protoka nekoga fluida u cjevovodu postiže se djelovanjem na ulazni ventil na cjevovodu
- Postoji uvijek mogućnost regulacije takvih procesa i manualnim putem ali danas svaki industrijski proces se regulira automatskim putem
- Osnova sustava automatske regulacije s povratnom vezom data je na slici 207.



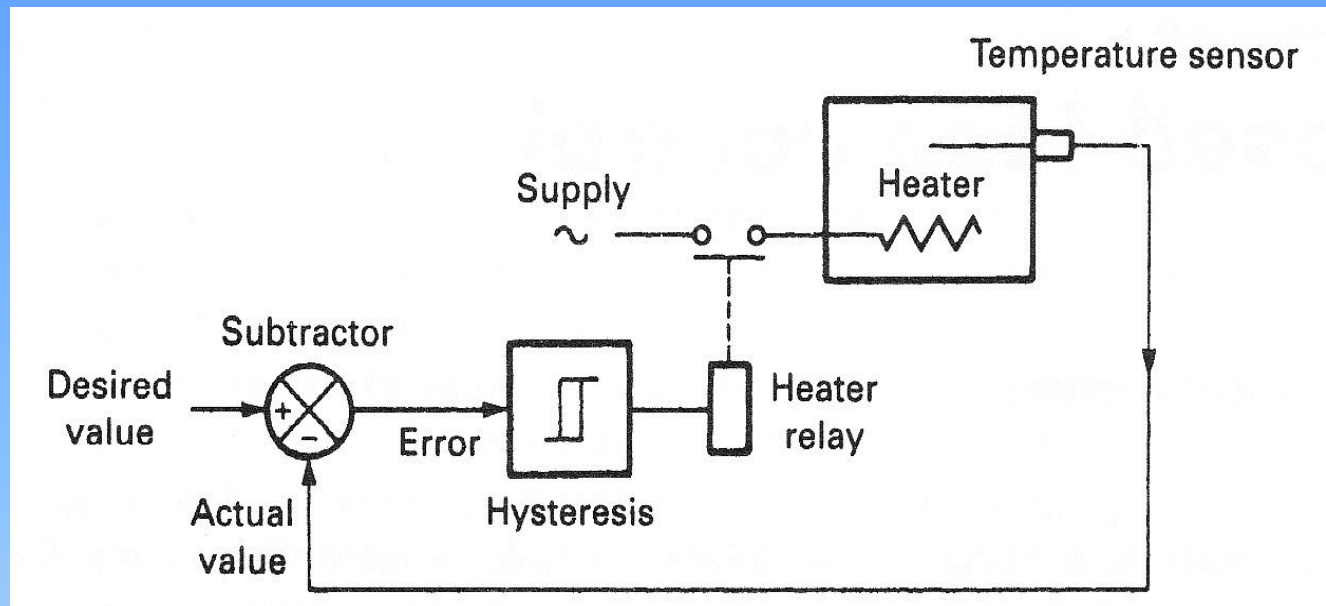
- Na temelju navedenih utjecaja, regulacijski algoritam daje izlazne signale koji djeluju na izvršne elemente u procesu koji dalje dovode vrijednosti procesne varijable na postavljenu vrijednost



Slika 207. Sustav automatske regulacije s povratnom vezom

- Regulacijski algoritam je suočen s dva slučaja tijekom procesa regulacije
- U prvom slučaju procesna varijabla se može mjenjati između dva ili više određenih stanja ili pozicija (npr. u slučaju hidrauličkog klizača ili hidrauličke teleskopske ruke)
- U drugom slučaju vrijednost procesne varijable se mjenja uslijed poremećaja

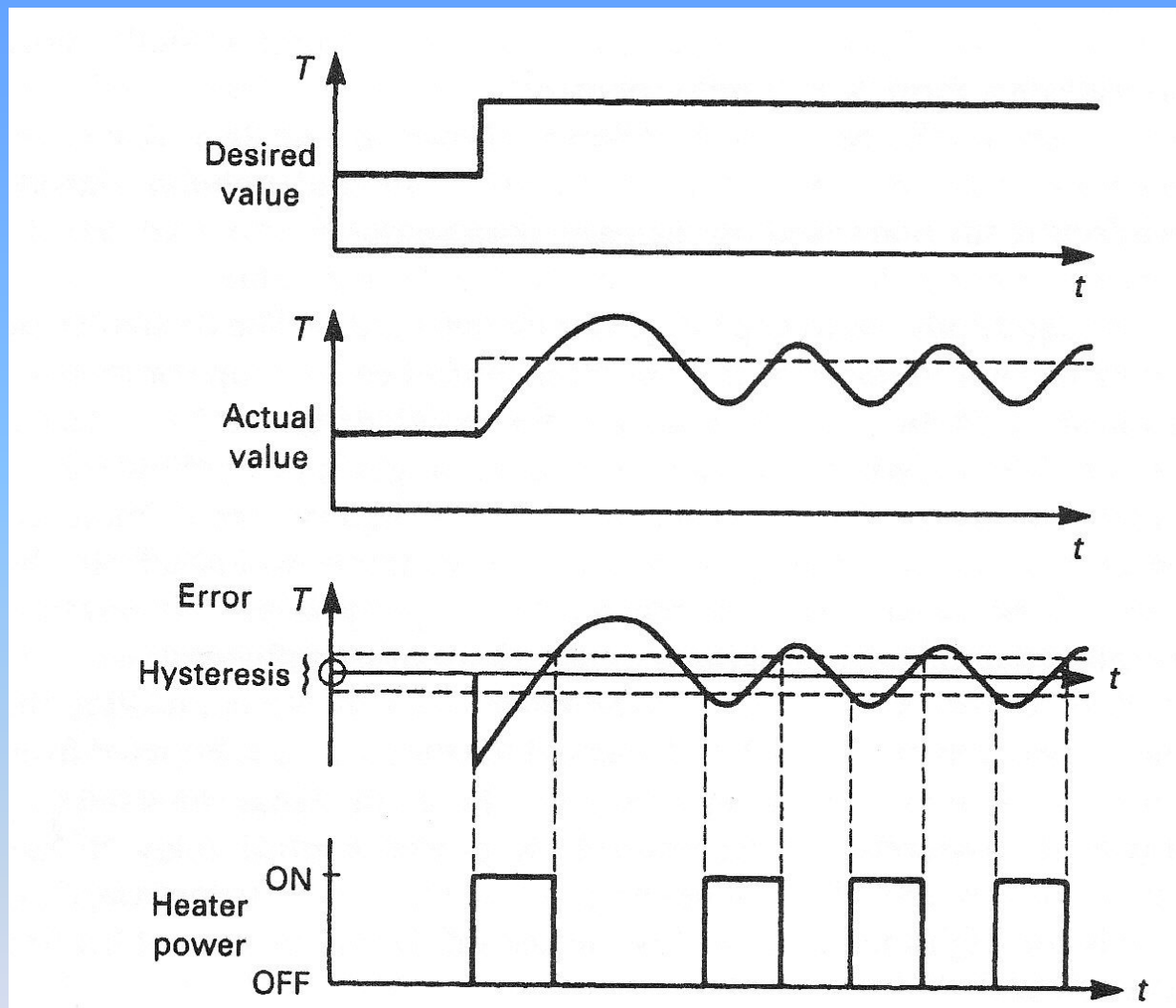
- Poremećaji se mogu javiti uslijed promjene radnih uvjeta u samom procesu (npr. promjena radnog opterećenja glavnog brodskog motora ili promjena opterećenja pomoćnog loženog kotla)
- Poremećaji se također mogu javiti i uslijed vanjskih poremećaja tj. poremećaja iz okoline na koje operator sustava (čovjek) ne može utjecati
- Primjer vanjskih poremećaja je promjene opterećenja brodskog motora uslijed nevremena kada brodski vijak izranja i uranja u more (prisutne nagle promjene opterećenja motora)
- Kod sustava povratne veze postoji nekoliko regulacijskih strategija koje se koriste
- Najjednostavnija je strategija tzv. ***bang/bang servo***
- Prikaz upotrebe navedene strategije pri regulaciji temperature pećnice kao procesne varijable prikazana je na slici 208.
- Stvarna vrijednost temperature oduzima se od postavljene vrijednosti temperature te se na taj način dobiva signal pogreške (*error signal*)



Slika 208. Dijagram sustava regulacije pomoću bang/bang servo strategije

- Ovaj signal pogreške ide u komparator (gdje je prisutna i histereza) koji kontrolira izvršni element u procesu (ovdje je to elektromagnetski relej grijača)
- Histereza (*hysteresis*) je proces koji se zbiva kada mjerena vrijednost procesne varijable zavisi o tome dali procesna varijabla poprima novu vrijednost uslijed povećavanja ili smanjivanja njezine prethodne vrijednosti

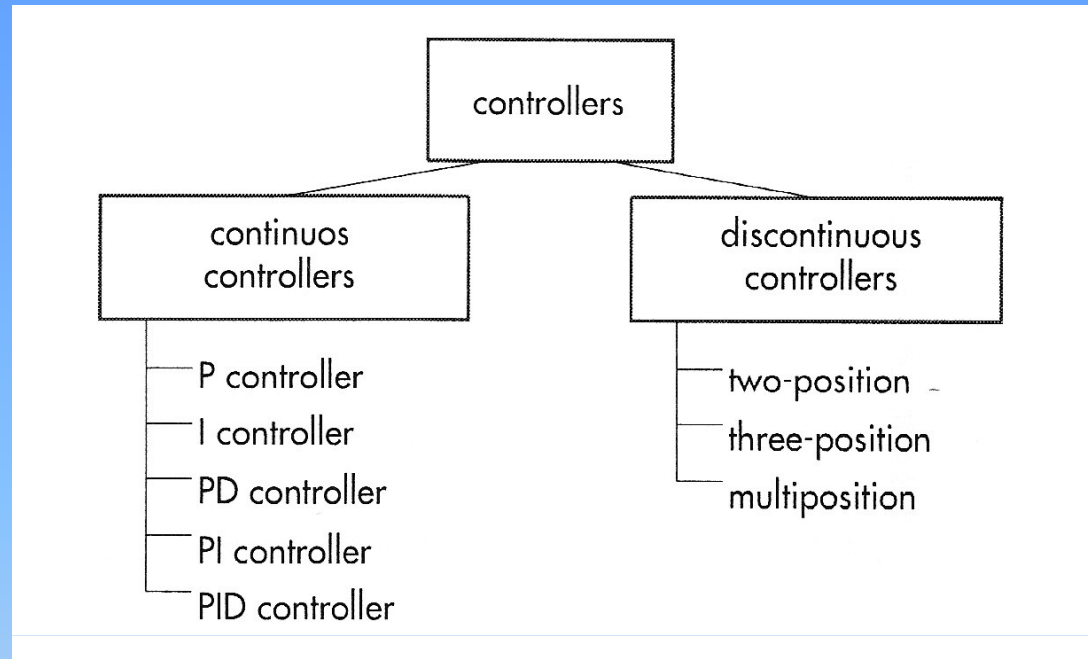
- Ako je temperatura pećnice preniska, relej će doći pod napon i uključiti će grijač pećnice
- Ako je temperatura previsoka grijač će se isključiti
- Na ovoj osnovi rade i automatski sustavi centralnog grijanja
- Sustav regulacije u ovom slučaju održava traženu temperaturu pećnice izmjenjujući radna stanja grijača (grijač ON ili grijač OFF, tj. grijač pod naponom i uključen ili grijač nije pod naponom i isključen)
- Na slici 209. prikazano je što se događa poslije promjene zadane vrijednosti
- Može se primjetiti da u stanju ravnoteže vrijednost procesne varijable oscilira oko zadane vrijednosti s valnom duljinom i amplitudom određenom samim efektom histereze i karakteristikom samog procesa
- Smanjivanjem efekta histereze smanjuju se i amplitude oscilacije procesne varijable i valne duljine (oscilacije postaju brže)



Slika 209. Djelovanje sustava s bang/bang servo regulacijskom strategijom

- Postoji međutim limit kod smanjivanja efekata histereze, jer smanjivanjem histereze raste brzina oscilacija, a time i brzina rada izvršnog elementa što dovodi do prebrzog trošenja samog izvršnog elementa i ranih javljanja kvarova
- Kao što se vidi na slici 209. izvršni element (u ovom slučaju grijalica) je ili u stanju ON ili u stanju OFF , te ovo u ravnotežnom stanju izaziva kontinuirane oscilacije
- Za ralik od ovakvih prejednostavnih regulacijskih strategija postoje regulatori koji se mogu klasificirati prema rezultirajućem dinamičkom ponašanju izlaznog signala
- U tu grupu spadaju regulatori s PROPORCIONALNOM, INTEGRALNOM, DERIVACIJSKOM I KOMBINIRANOM regulacijom, te regulatori s VREMENSKIM KAŠNJENJEM
- Najčešća izvedba takvih regulatora je kombinacija dva ili više navedenih regulacijskih djelovanja pa tko postoje PD- regulatori (*proporcionalno derivacijski*), PI-regulatori (*proporcionalno integracijski*) itd.
- Najčešće dolaze u tri-djelujućem obliku i izvedbi kao PID- regulatori (*proporcionalno integrirajuće derivirajući*)

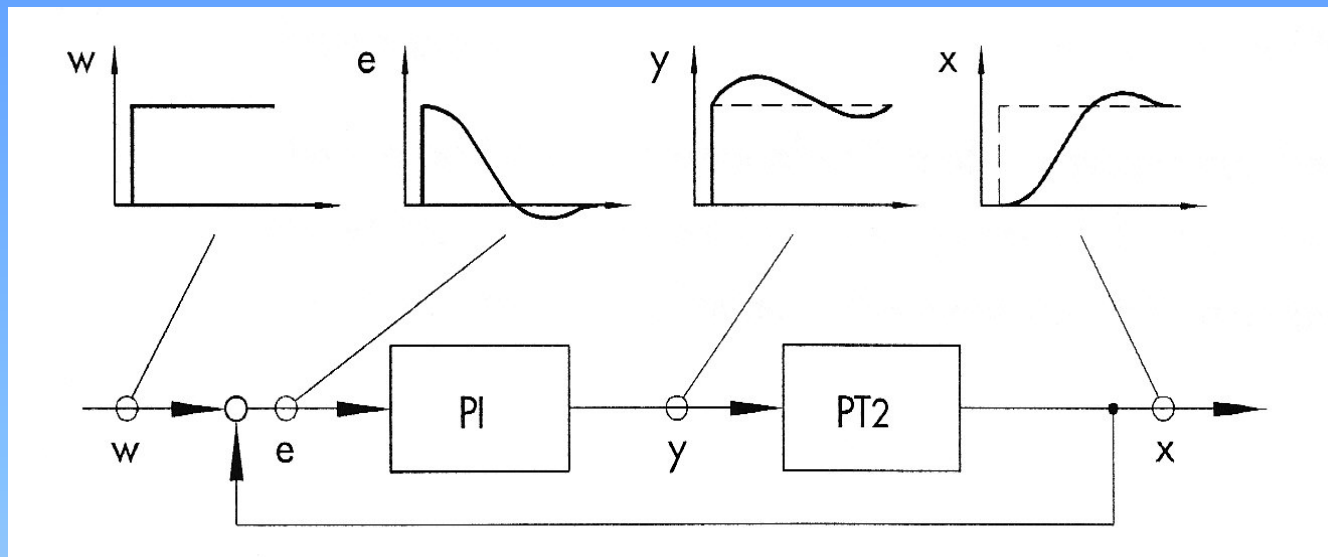
- Kao što je već dosada razmatrano, zadatak regulatora je da utječe na parametre procesa pomoću izlaznog signala na način da vrijednost procesne (kontrolirane) varijable bude jednaka vrijednosti zadane varijable, odnosno ulaznog signala
- Regulatori mogu biti mehanički (hidraulički, pneumatski) ili električki (analogni ili digitalni signal)
- Također, kao što smo već spomenuli , mogu imati dodatni izvor energije za pojačanje djelovanja ili mogu biti bez njega
- Na temelju dva stanja s kojima se suočava regulacijski algoritam, postoje i dvije vrste regulatora (slika 210.)
- To su KONTINUIRANI I DISKONTINUIRANI regulatori
- Diskontinuirani ovise o broju stanja ili pozicija koje procesna varijabla može zauzeti ili postići pa se stoga i dijele na **dvopozicijske, tropozicijske i višepozicijske** diskontinuirane regulatore
- Kontinuirani regulatori mogu producirati izlazni signal koji je u rasponu djelovanja pojedinog regulatora (reakcija na razne poremećaje)



Slika 210. Vrste regulatora

Dinamičko ponašanje regulatora

- Dinamičko ponašanje pojedinih regulatora u sustavu povratne veze prikazano je na slici 211.
- U sustavu povratne veze, skokovita promjena ulaznog signala (**w**) prvo rezultira skokovitom promjenom signala greške (**e**)

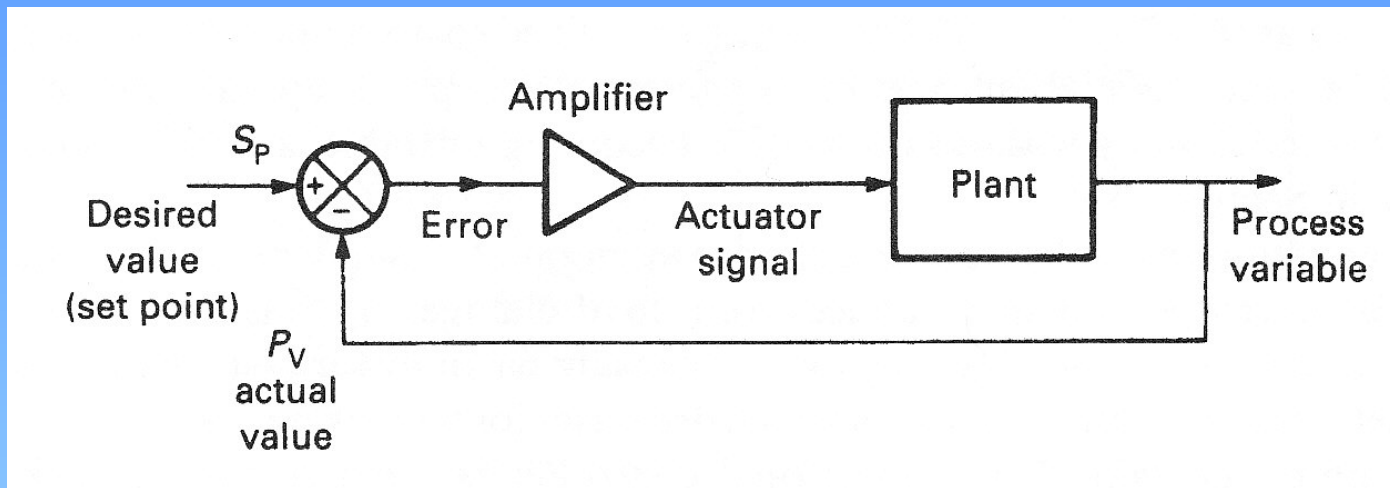


Slika 211. Vrijednosti signala u sustavu povratne veze

- Uslijed regulacijskog djelovanja i sustava povratne veze, vrijednost signala pogreške opada s vremenom
- Na kraju regulacijskog procesa, vrijednost procesne varijable (x) postiže novo ravnotežno stanje i samim time dokazuje da je odgovor regulacijskog sustava stabilan

PROPORCIONALNA REGULACIJA

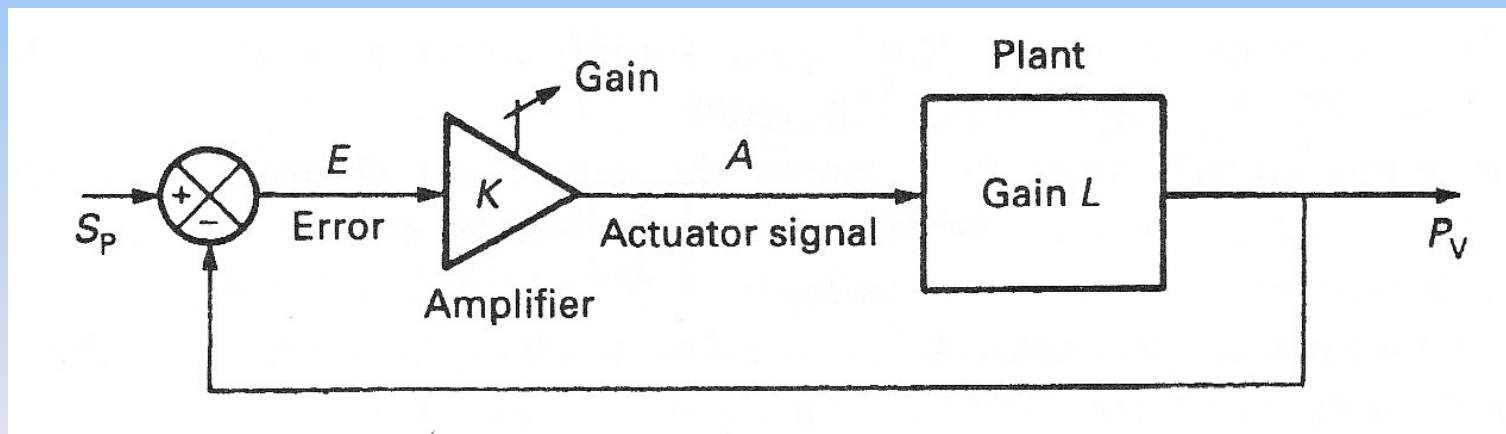
- Proporcionalna regulacija je jedan od temeljnih načina rada regulatora i za razliku od strategije bang-bang servo daje preciznije i kvalitetnije odgovore regulacijskog sustava
- Uobičajeno se uzima da kod velikih vrijednosti pogrešaka i vrijednost korektivnog djelovanja mora biti velika, dok je kod vrijednosti malih grešaka i vrijednost korektivnog djelovanja mala
- Takvo što nije slučaj u sustavima bang-bang servo
- Proporcionalni regulatori spadaju u vrstu kontinuiranih regulatora
- Takvo regulacijsko djelovanje se osigurava proporcionalnim izvršnim elementima procesa koji će dati kontroliranu reakciju u rasponu njihova djelovanja
- Bitno je naglasiti da se kod ovakvih sustava izlazni signal pojavljuje jedino u slučaju pojave signala pogreške
- Temelj rada proporcionalne regulacije prikazan je na slici 212.



Slika 212. Proporcionalni sustav povratne veze

- Signal pogreške dobiva se oduzimanjem vrijednosti procesne varijable P_v (ili označene još kao stvarna vrijednost – *actual value*) od postavljene vrijednosti S_p (*set point*)
- Signal pogreške se pojačava u pojačalu i dovodi izravno na izvršni elementu procesu
- Izlazni signal iz procesa tj. procesna varijabla P_v se vodi natrag na usporedbu s postavljenom vrijednošću S_p pa se na taj način ostvaruje **povratna veza**, odnosno ostvaruje se **sustav regulacije pomoću povratne veze**

- Budući da je vrijednost signala koji dolazi na izvršni element proporcionalna vrijednosti pogreške ovakva regulacije se zove **proporcionalna regulacija**
- Kao što se može uočiti na slici 212. signal na izvršnom elementu je pojačana verzija signala pogreške, tj. mora postojati greška da bi izvršni element bio u funkciji
- Stoga se može zaključiti da sustavi proporcionalne regulacije djeluju s vrijednošću greške između S_p i P_v
- Ova greška je detaljnije prikazana na slici 213.



Slika 213. Ravnotežno stanje sustava povratne veze

- Pod pretpostavkom da proces radi u ravnotežnom stanju, pogreška **E** se može definirati:

$$E = S_p - P_v$$

- Signal izvršnog elementa **A** zadan je jednačbom:

$$A = K(S_p - P_v)$$

- Gdje je **K** – koeficijent prijenosa (omjer prijenosa vrijednosti signala pogreške na izlazni signal)
- I gdje je **L** – koeficijent prijenosa (s izvršnog elementa na proces)
- Ako se pretpostavi da je proces linearan, izlazni signal (procesna varijabla) procesa je:

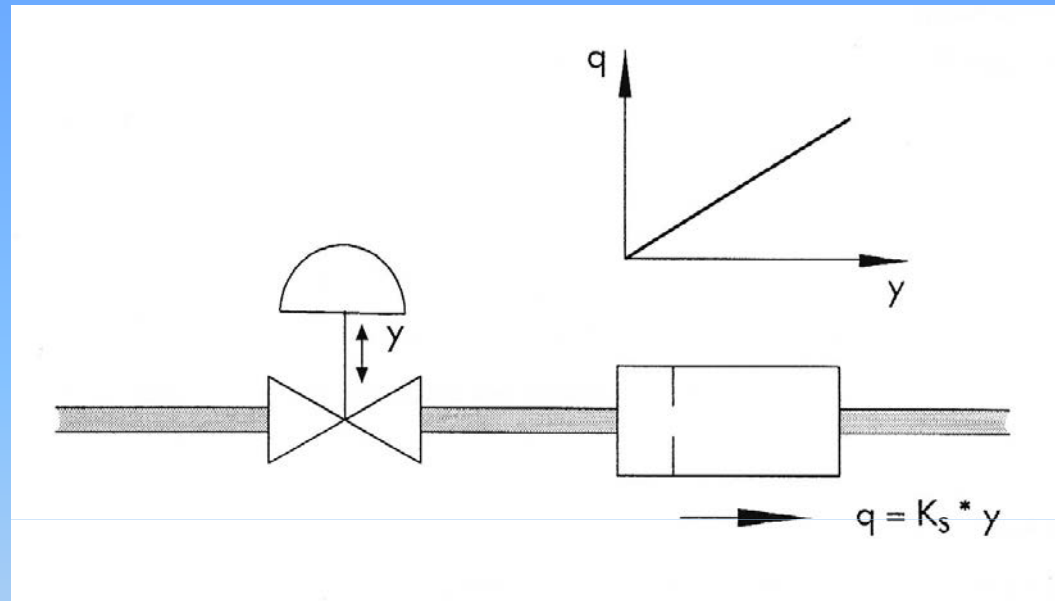
$$P_v = LA$$

$$P_v = LK(S_p - P_v)$$

$$P_v(1 + LK) = LKS_p$$

- Odnosno može se pisati:
$$P_v = \frac{LKS_p}{(1 + LK)}$$

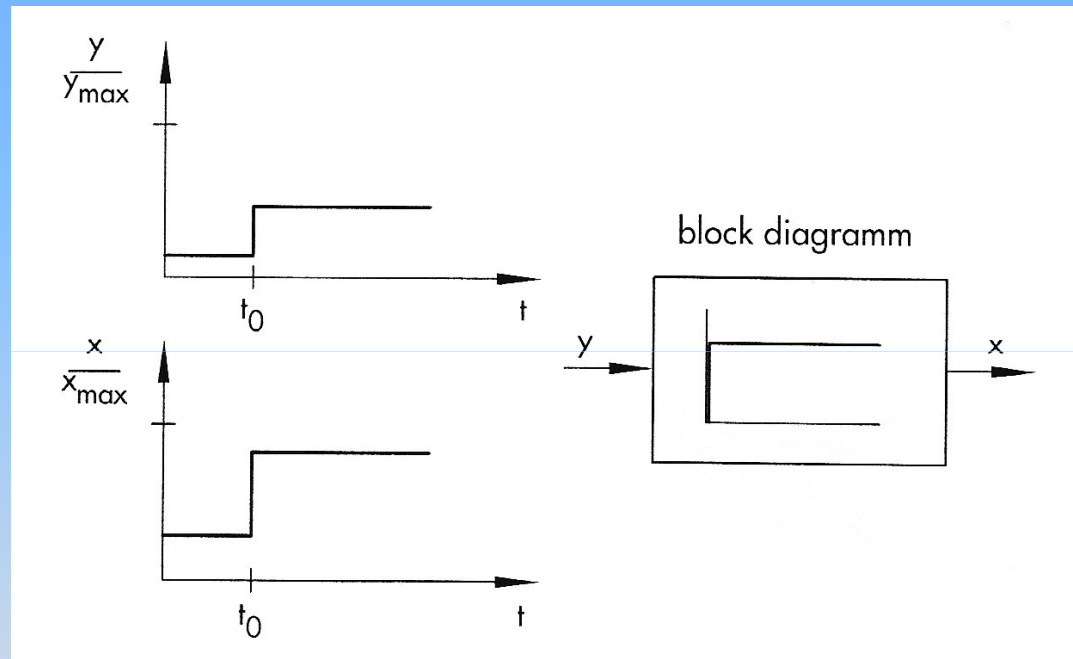
- Primjer sustav proporcionalne regulacije dat je na slici 214.



Slika 214. Sustav proporcionalne regulacije; q – količina protoka, y – pomak ventila

- U slučaju pomaka ručice ventila y (otvaranje ventila), nova, veća razina protoka q postiže se gotovo istodobno
- Ovisno o koeficijentu protoka ventila, izlazni signal (količina protoka) mjenja se proporcionalno veličini otvorenosti ventila y (upravljana veličina)

- Na slici 215. prikazan je blok dijagram za proporcionalno djelovanje regulacijskog sustava
- Na skokovitu promjenu ulaznog signala javlja se i istodobna skokovita vrijednost izlaznog signala (u potpuno idealnim uvjetima tj. bez vremenskoga kašnjenja)

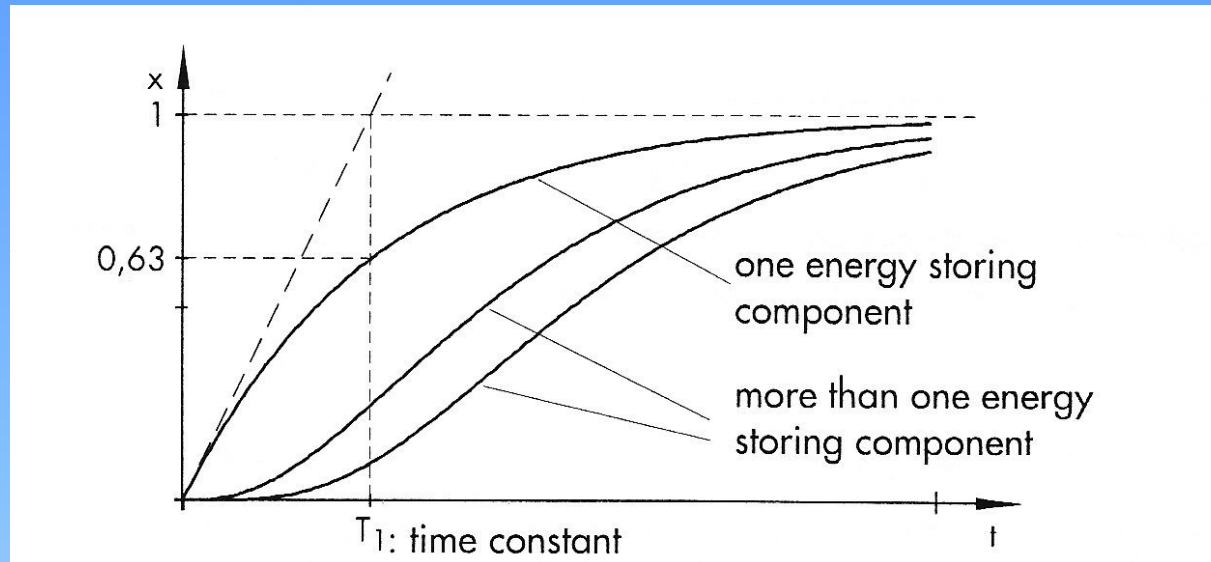


Slika 215. Ponašanje proporcionalnog regulacijskog sustava

- Na slici 215. oznaka **x** označava izlazni signal iz regulatora, a **y** označava vrijednost upravljane varijable (pomak ručice ventila)

- Međutim kod proporcionalne regulacije (P – regulacije) prijenos energije između elemenata sustava zahtjeva određeno vrijeme pa se u praksi javlja vremensko kašnjenje između skokovite promjene ulaznog signala (i shodno tome i upravljanje varijable) i skokovite reakcije izlaznog signala (to se jasno vidi na dijagramima na slici 211.)
- Kada je to vremensko kašnjenje jako malo tada nema velikog utjecaja na sustav regulacije
- Na vremensko kašnjenje odgovora izlaznog signala ne utječe samo potrebno vrijeme za prijenos energije između elemenata sustava
- Mnogi regulacijski sustavi sastoje se od nekoliko komponenti koje imaju mogućnost akumulacije energije (npr. topline) kao što su toplinske izolacije, ili akumulaciju potencijalne energije kao što su opruge i sl.
- Pošto se akumulacije energije (toplinske, potencijalne) ili njeno otpuštanje u ovim komponentama zbiva samo postupno(stupnjevito), sama ta akumulacija odnosno otpuštanje energije izaziva dodatno kašnjenje u odgovoru (izlaznim signalima) regulacijskog sustava
- Komponente koje akumuliraju energiju su smještene u regulacijskom sustavu između upravljane veličine i procesne varijable

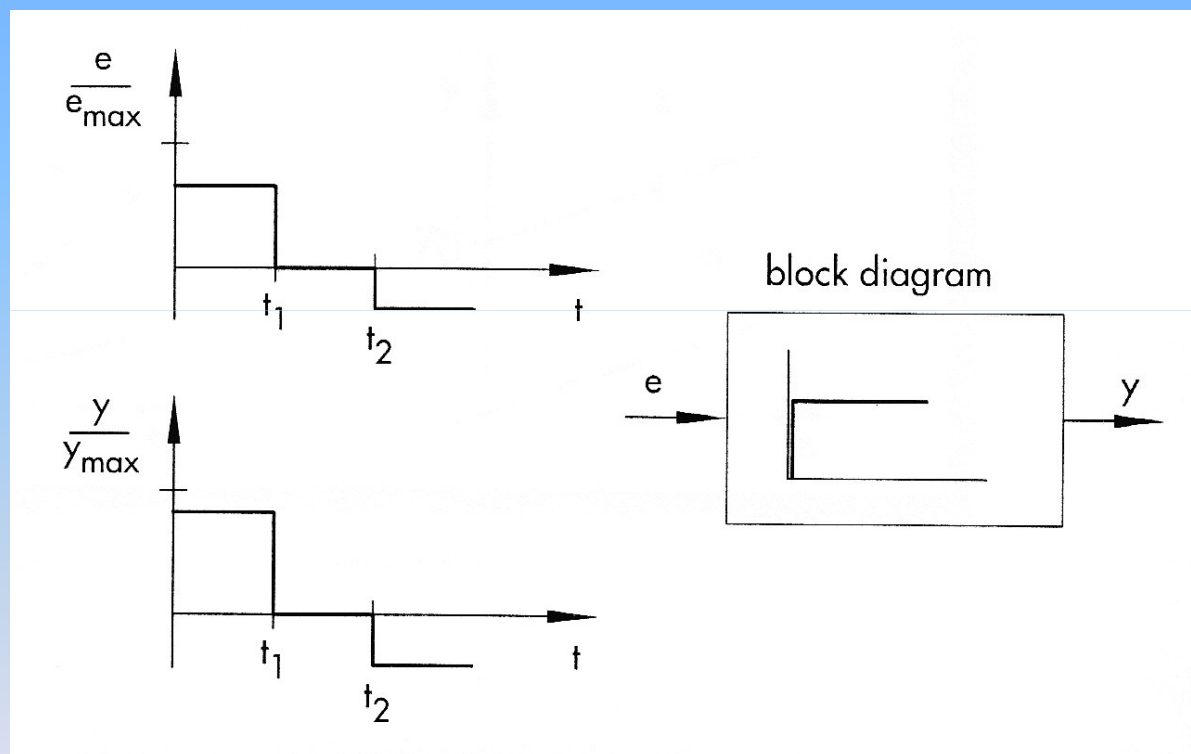
- Ovo se može primjeniti na sva stanja sustava regulacije jer se sustavi regulacije temelje na prijenosu i pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi
- Najbolje se to može uočiti na primjeru sustava centralnog grijanja
- Sustav centralnog grijanja sastoji se od nekoliko komponenata koje akumuliraju energiju kao što su: kotao, voda, radijator, zrak u prostorijama, zidovi itd.
- Kada se mjenja energija koja se dovodi u kotao (gorivo na plameniku) ili kada se otvaraju ili zatvaraju ventili na radijatorima u prostorijama, temperatura u prostorijama se mjenja postepeno (stupnjevito) dok se ne postigne tražena vrijednost temperature
- Karakteristika regulacijskih sustava s komponentama koje akumuliraju energiju je ta da se vrijednost konačnog ravnotežnog stanja postiže **samo nakon** određenog vremena i da se brzina odgovora procesne varijable (izlaznog signala) **x** mjenja tijekom prijelaznog perioda (kao na slici 216.)
- U osnovi, brzina odgovora procesne varijable se usporava kako se procesna varijabla približava svojoj konačnoj zadanoj vrijednosti
- Bitno je naglasiti da se procesne varijable kod sustava s komponentama koje akumuliraju energiju mijenjaju jednolično a ne naglo



Slika 216. Eksponencijalne krivulje sustava s komponentama koje akumuliraju energiju

- Dinamičko ponašanje ovakvih sustava ovisi o veličini komponenata koje akumuliraju energiju tj. veće komponente izazivaju veće kašnjenje, dok male komponente gotovo ne izazivaju ovakva kašnjenja
- Tako na primjeru centralnog grijanja, ponašanje vrijednosti temperature u prostorijama ovisi o kapacitetu plamenika na kotlu, veličini kotla, veličini prostorija i dimenzija radijatora

- Dinamičko ponašanje proporcionalnog regulatora (P-regulatora) prikazano je na slici 217.
- Amplituda izlaznog signala (y) određena je veličinom signala pogreške (e) i koeficijentom prijenosa (koeficijentom proporcionalnog prijenosa) K_p



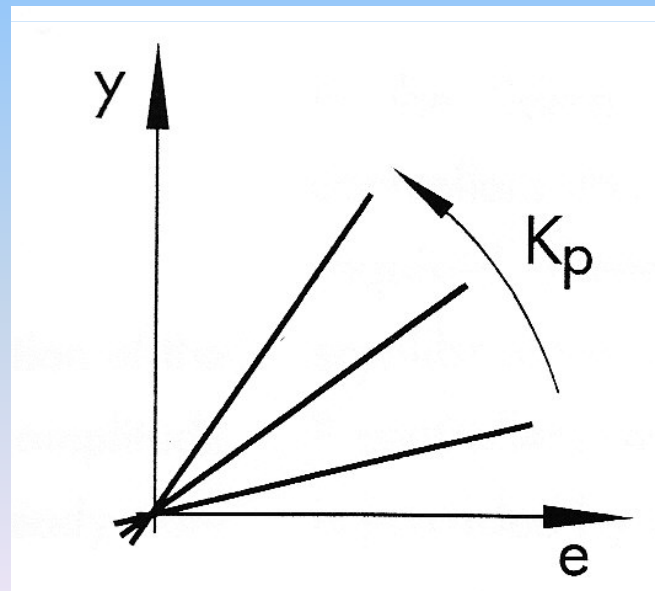
Slika 217. Dinamičko ponašanje P-regulatora (e – signal pogreške, y – izlazni signal)

- Matematički izraz za amplitudu izlaznog signala je:

$$y = K_p * e , \quad K_p - \text{koeficijent proporcionalnog prijenosa}$$

- Koeficijent prijenosa je definiran kao veličina odgovora regulatora prema veličini signala greške
- Koeficijent prijenosa K_p je još definiran matematički kao : $K_p = 100\% / X_p$
- Vrijednost X_p je definirana kao raspon proporcionalnog regulatora
- Npr. ako je u ložištu kotla minimalna temperatura koju treba održavati 1000°C , a maksimalna 1500°C , raspon pogreške , odnosno raspon djelovanja regulatora je 500°C
- To znači da je u trenutku vrijednosti temperature u ložištu 1500°C otvorenost ventila za gorivo 0%, a u trenutku vrijednosti temperature u ložištu 1000°C , otvorenost ventila za gorivo 100%
- Pošto se vrijednost raspona proporcionalnog regulatora iskazuje u obliku postotka, taj postotak se izračunava djelenjem raspona djelovanja regulatora (u stupnjevima) s punim rasponom regulatora, te množenjem dobivenog rezultata s 100

- Matematički izraz je slijedeći: $500/1470 \cdot 100 = 34.01$
- Vrijednost raspona regulatora $X_p = 34.01$ uvrštava se u jednadžbu: $K_p = 100\%/X_p$ i dobiva se vrijednost koeficijenta prijenosa koja u ovom slučaju iznosi oko 3
- Veća vrijednost koeficijenta prijenosa K_p daje brži i veći odgovor regulatora na signal pogreške koji se pojavi
- Ujedno ako je vrijednost K_p velika, izlazni signal regulatora će biti s velikim porastom, iako je vrijednost signala pogreške relativno malen (slika 218.)



Slika 218. Utjecaj faktora K_p

- Prednosti proporcionalnih regulatora je u tome što imaju jako brz odgovor na poremećaje i reaguju trenutnom korektivnom akcijom na poremećaje u sustavu regulacije
- Vrlo su stabilni u procesu regulacije, naročito ako je odabran ispravan koeficijent proporcionalnog prijenosa K_p