

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET

BRODSKI ENERGETSKI UREĐAJI

AUTOMATSKA REGULACIJA POGONA GENERATORA PARE

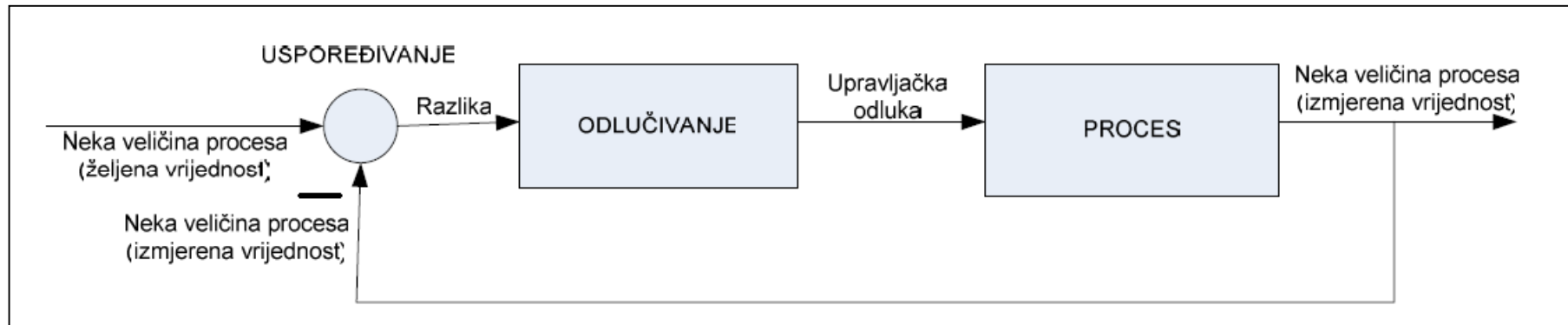


RAZVOJ AUTOMATIZACIJE:

- 1765., I.I. Polzunov, automatski regulator razine vode u kotlu
- 1784., J. Watt, centrifugalni regulator broja okretaja parnog stroja
- 1868., D.K. Maxwell, pokušaj teorijske obrade problema nestabilnosti
- 1875., Hurwitz, doprinos rješavanju problema nestabilnosti u regulaciji
- 1884., Routh, doprinos rješavanja problema nestabilnosti u regulaciji
- 1932., Nyquist, analiza stabilnosti sustava u odnosu prema frekvencijskom odzivu sustava u otvorenom krugu
- 1934., Hazen, analitički prikaz sustava automatske regulacije u zatvorenom krugu
- krajem 40-ih i 50-ih godina 20. stoljeća projektirani su računalni uređaji za pretvorbu informacija u diskretne signale
- uvođenjem računala 60-ih i 70-ih godina na brodovima je unaprijeđen proces automatizacije na brodovima

AUTOMATSKA REGULACIJA

- Automatska regulacija po definiciji je automatsko održavanje željenog stanja nekog procesa ili mijenjanje tog stanja po određenom zakonu, bez obzira na djelovanje vanjskih i unutarnjih poremećaja.
- To se postiže pomoću povratne veze, koja omogućuje usporedbu izmjerene vrijednosti neke veličine reguliranog procesa s njenom željenom vrijednosti (referencijom), te se na temelju razlike tih dviju veličina odlučuje kako proces usmjeriti.
- Proces se usmjerava upravljanjem tokom energije ili tvari.



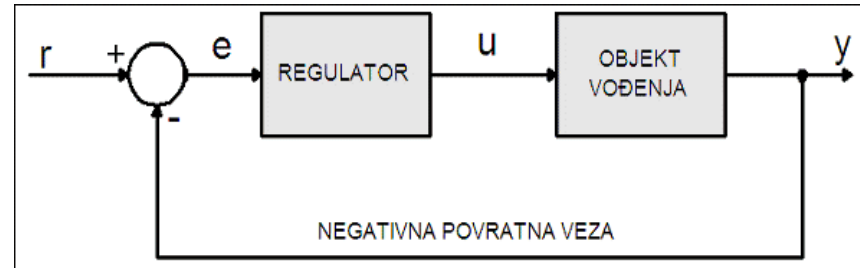
Regulacijska petlja ili zatvoreni krug

- **AUTOMATIZACIJA**

- Automatizacija je pojam blizak automatskoj regulaciji, pa se oni vrlo često miješaju. Ipak, opisuju različite stvari.
- Automatizacija je proces kojim se nešto pravi automatskim, a također je stanje koje je rezultat tog istog procesa.
- Automatizacija u širem smislu obuhvaća sve mjere i procese kojima se smanjuje udio ljudskog rada, opažanja i odlučivanja.
- Za širi smisao pojma automatizacije katkad se rabi i izraz automacija. To je mnogo izraženije u anglosaksonskim zemljama gdje je izraz ***automation*** češći, i praktički zamjenjuje duži izraz ***automatisation***.
- Uspoređujući definicije automatizacije i automatske regulacije, očigledno je automatizacija opsežniji pojam. Očito je i da na određenom, višem stupnju automatizacije, automatska regulacija postaje njen bitni instrument.

POVRATNA VEZA

- Osnovna ideja povratne veze jest usporediti aktualni rezultat sa željenim rezultatom i djelovati na temelju njihove razlike.



- Povratna veza je jednostavni princip koji obuhvaća sve principe regulacije u prirodi: rast živih organizama, kao i bezbroj varijabli na kojima počiva život – tjelesna temperatura, krvni tlak, a također i interakcija živih organizama se bazira na tome – ravnoteža, gibanje, vizualna koordinacija, odaziv na stres.
- Ljudi su u svojim izumima oduvijek kopirali prirodu, pa se i u mnogim tehničkim sustavima i procesima nalazi povratna veza.
- Primjeri su doista brojni, od vrlo jednostavnih do iznimno složenih poput robota, transportnih sredstava, električnih ili internetskih mreža.
- Štoviše, rijetki su moderni tehnički sustavi u kojima se ne nalazi barem neki primjer automatske regulacije.

POVRATNA VEZA

Povratna veza omogućuje slijedeća svojstva:

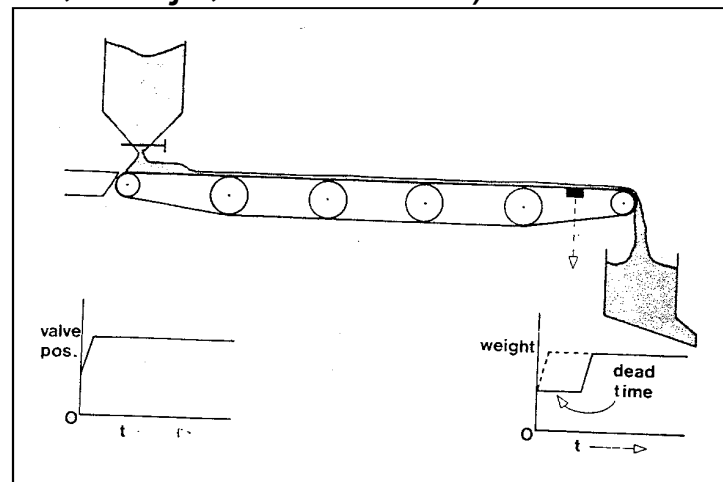
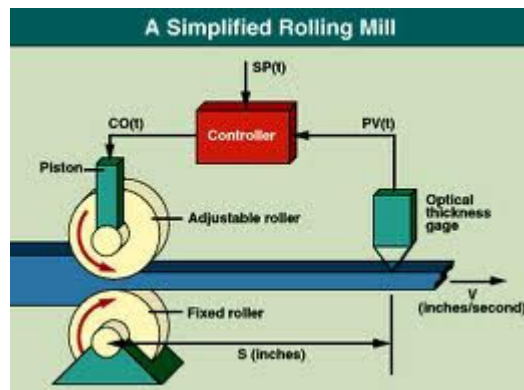
- Proces može postati neosjetljiv na vanjske poremećaje i promjene vlastitih svojstava.
- Proces koji je sastavljen od lošijih sastavnica može davati dobre rezultate.
- Proces koji je nestabilan može postati stabilan.
- Može se stvoriti neko poželjno ponašanje procesa koje nije moguće bez povratne veze.

NEDOSTACI POVRATNE VEZE

- Osnovni nedostatak povratne veze jest što proces njenim djelovanjem može postati nestabilan (oscilirajući), što je gotovo uvijek neprihvatljivo ponašanje. Stoga je primarni zadatak prilikom primjene regulacije osigurati stabilnost sustava.
- Kod sustava bez povratne veze, ako je sustav sačinjen od elemenata koji su stabilni, i sustav će biti stabilan, dok kod sustava regulacije, to ne mora biti tako.

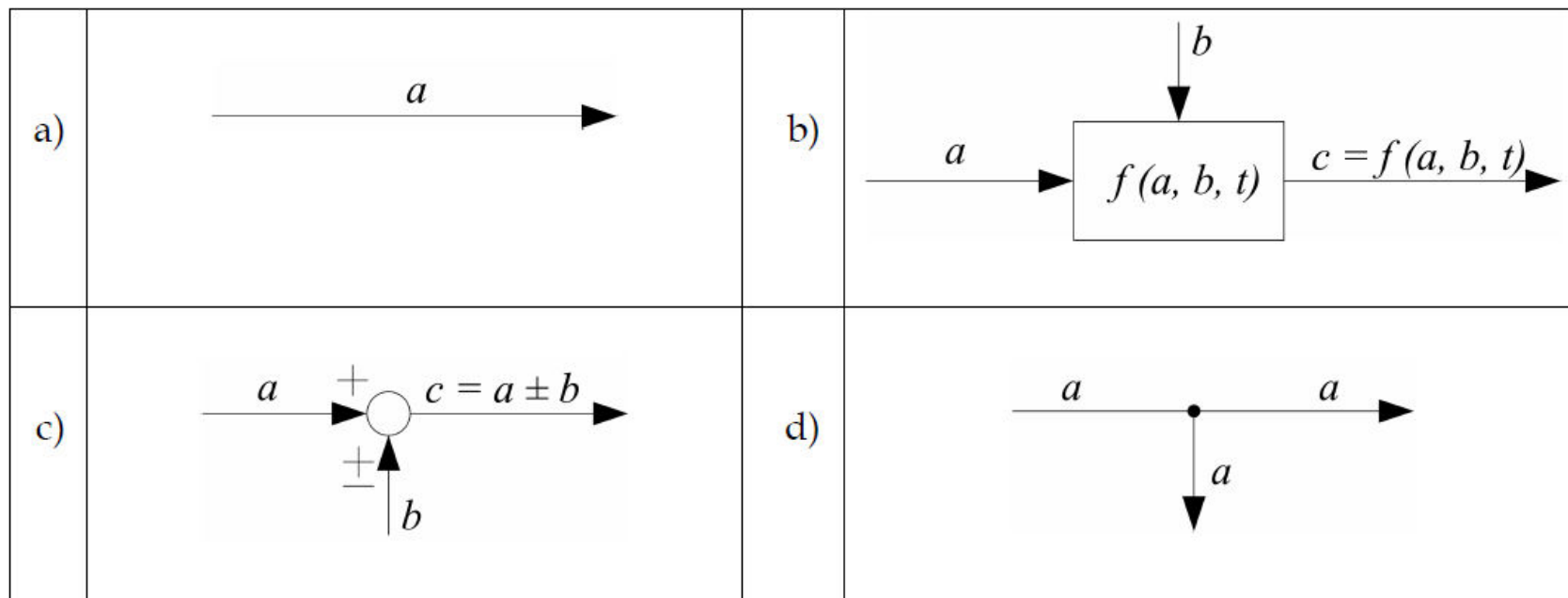
OGRANIČENJA POVRATNE VEZE

- Unaprijeđenja koja mehanizam povratne veze donosi poboljšanjem stabilnosti i ostalih svojstava reguliranog sustava su ograničene.
- Ograničenja često nisu posljedica projektiranja regulatora, nego su prvenstveno nametnuta fizičkim ograničenjima opreme koja sudjeluje u krugu vođenja nekog sustava.
- To su na primjer „mrtva vremena“, odnosno kašnjenja koja unosi računalo koje sustav vodi, manjkavosti mjernih uređaja (poput nepreciznosti, šuma, kašnjenja signala,..), manjkavosti izvršnih uređaja (npr. nedovoljna snaga da izvrši naredbu) i prijenosnika (zazori, trenja, elastičnosti).

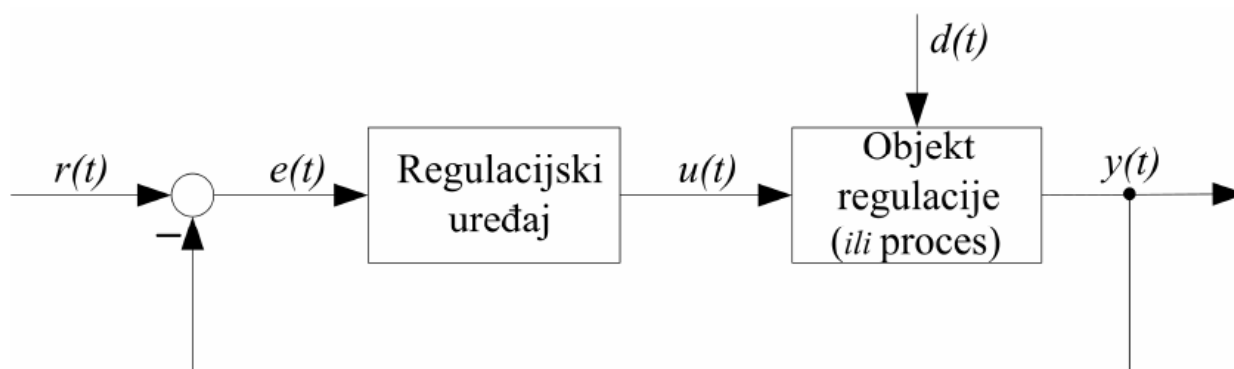


OSNOVNI REGULACIJSKI KRUG

- Grafički simboli blok dijagrama jezik su kojim se jasno, racionalno i nedvosmisleno prikazuju sustavi automatske regulacije, odnosno općenito automatizacije.
- Prikaz sustava blok dijagramom ujedno je i prvi korak u matematičkoj analizi takvog sustava.
- Pojedini elementi, ili dijelovi sustava povezuju se međusobno i prikazuju na slikoviti način.
- Četiri osnovna simbola sačinjavaju blok dijagram. To su:
 - a) **strjelica**, predstavlja signal, fizikalnu veličinu koja se mijenja s vremenom u naznačenom smjeru;
 - b) **blok**, predstavlja funkcionalni odnos između signala koji ulaze u blok (uzroka) i signala koji iz bloka izlaze (posljedica). Signali koji ulaze u blok su ulazi (ili ulazne varijable, pobude), dok su signali koji izlaze iz bloka izlazi (izlazne varijable, odzivi);
 - c) **krug**, predstavlja točku zbrajanja ili komparator;
 - d) **čvorište**, predstavlja točku račvanja signala (signal je jednak u svakom ogranaku).



Osnovni simboli koji sačinjavaju blok dijagram

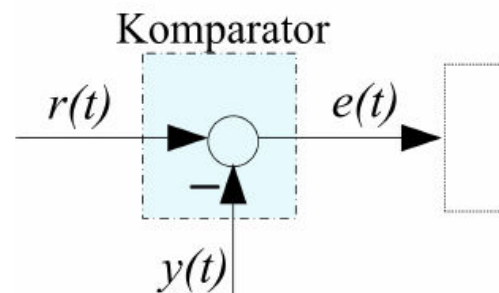


Poopćeni osnovni blok dijagram automatske regulacije

Veličine navedene u osnovnom blok dijagramu automatske regulacije su slijedeće:

- $r(t)$ – **referentna veličina, ili referencija**. Naziva se još i nazivna veličina kod čvrste regulacije, odnosno vodeća veličina kod slijedne regulacije. Referentna veličina (reference input) je vanjski signal primjenjen na sustavu automatske regulacije na komparatoru. Predstavlja željeno (ili idealno) ponašanje regulirane veličine procesa.
- $y(t)$ – **regulirana veličina**. Često se kaže samo izlaz. Regulirana veličina (*controlled variable ili controlled output, ili najčešće samo output*) predstavlja izlaznu veličinu reguliranog procesa.
- $e(t)$ – **regulacijsko odstupanje, ili regulacijska pogreška**. Regulacijsko odstupanje (*actuating signal, ili error signal*) je razlika između referentne i regulirane veličine, koja ulazi u regulacijski uređaj i potiče njegovo djelovanje.
- $u(t)$ – **postavna veličina**. Postavna veličina (*control signal ili manipulated variable*) je signal koji predstavlja izlaz iz regulacijskog uređaja i ulaz u proces.

- $d(t)$ – **poremećajna veličina**. Poremećajna veličina (*disturbance*) je signal koji ima neželjeni utjecaj na reguliranu veličinu. Poremećajna veličina može djelovati iz okoline na više načina, te može ulaziti u sustav na mnogo različitih mjesta.
- **Regulacijski uređaj** (*controller*) – dio je sustava automatske regulacije koji generira postavnu veličinu koja će djelovati na regulirani proces. Regulacijski uređaj ili regulator obično sadrži pojačalo, nekakvo vremensko djelovanje, te komparator.
- **Objekt regulacije ili proces** (*process, plant*) – obuhvaća sustav, podsustav ili proces čija veličina (ili veličine) je predmet regulacije.
- **Negativna povratna veza i komparator** (*comparator*) – osnovna funkcija povratne veze, to jest usporedba željene i stvarne vrijednosti veličine koju se želi regulirati, obavlja se komparatorom. Prirodno je stoga da povratna veza ima negativnu vrijednost.



Temeljna načela sustava upravljanja

Temeljna su načela sustava upravljanja:

1. načelo otvorenog sustava,
2. načelo kompenzacije
3. načelo povratne veze.

Načelo otvorenog sustava

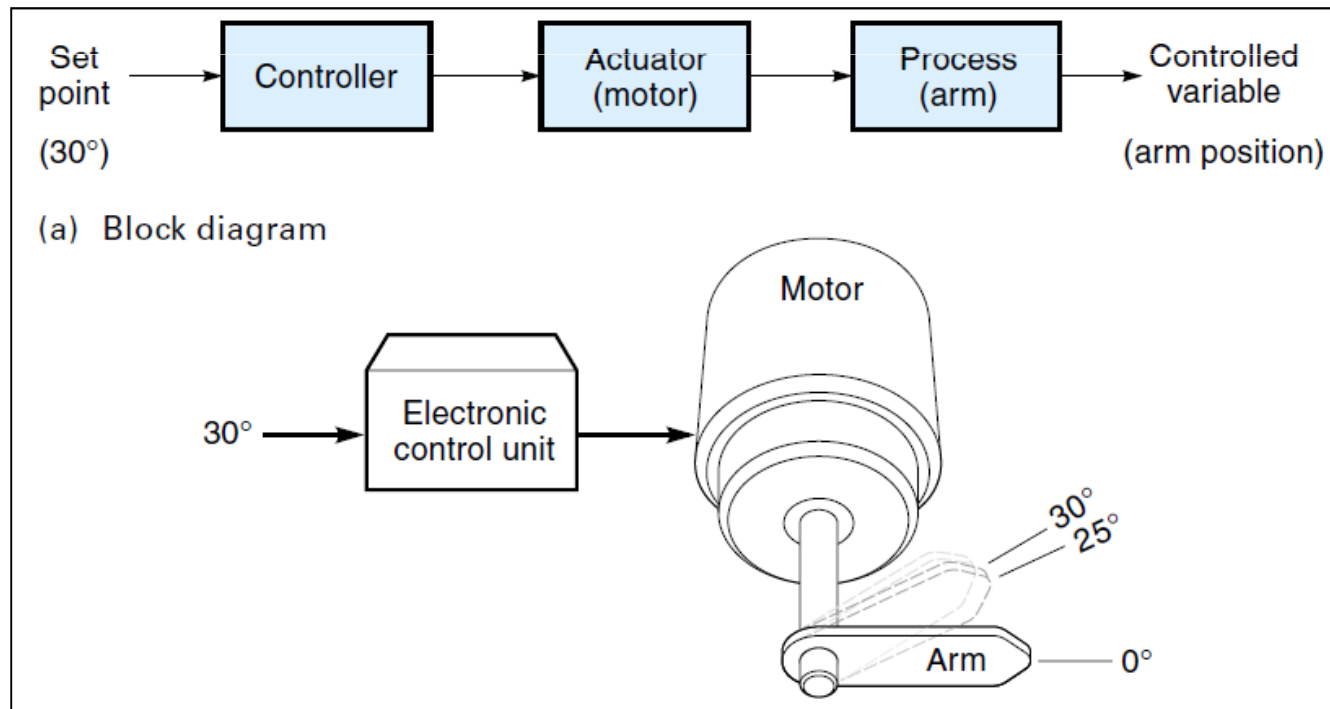
Izvršna veličina formira se isključivo na temelju zadanog **algoritma funkcioniranja (vodeće veličine)** bez obzira na poremećajne veličine koje mogu djelovati na objekt. Izlazne veličine se ne nadziru.

Primjeri:

- *automatska signalizacija,*
- *blokada,*
- *zaštita,*
- *upuštanje,*
- *zaustavljanje,*
- *upravljanje elektrohidrauličkim i elektropneumatskim ventilima,*
- *logički elementi, itd.*

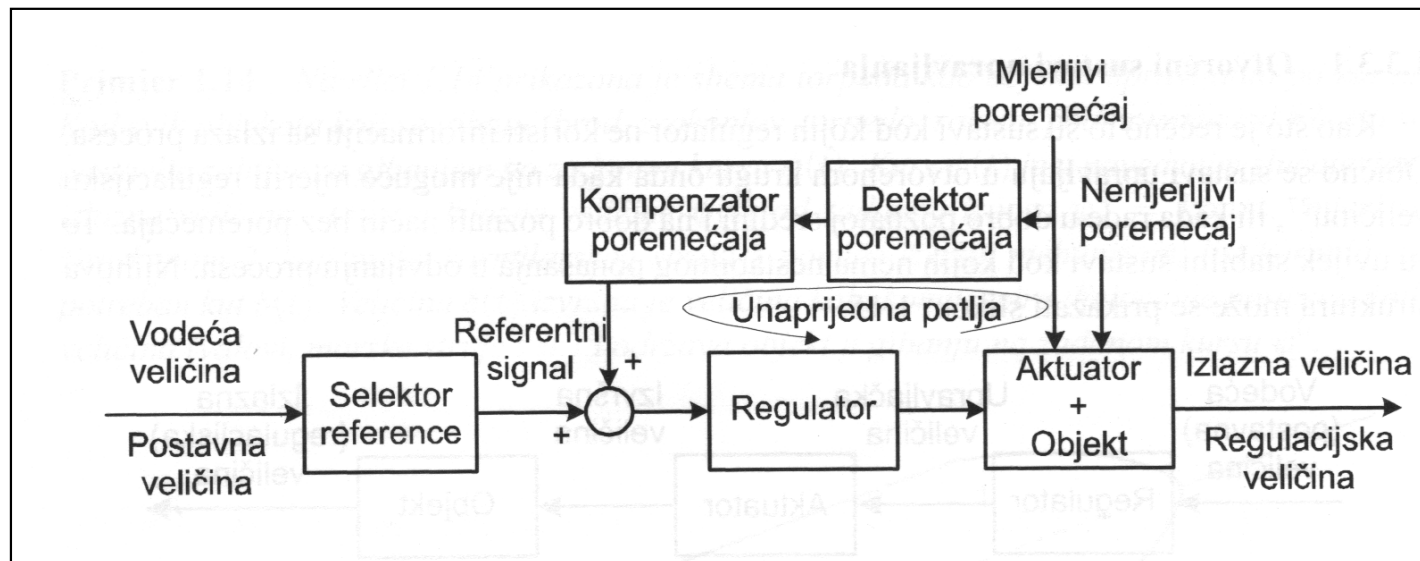
Načelo otvorenog sustava

- **Regulator** na temelju **vodeće veličine** generira **upravljačku veličinu** koja se pojačava u **aktuatoru** i stvara se **izvršna veličina** kojom se djeluje na **objekt upravljanja**.
- Npr., zeleno, žuto i crveno svjetlo na semaforu mijenjaju se naizmjenično prema unaprijed utvrđenim vremenskim intervalima, a bez obzira na gustoću prometa.

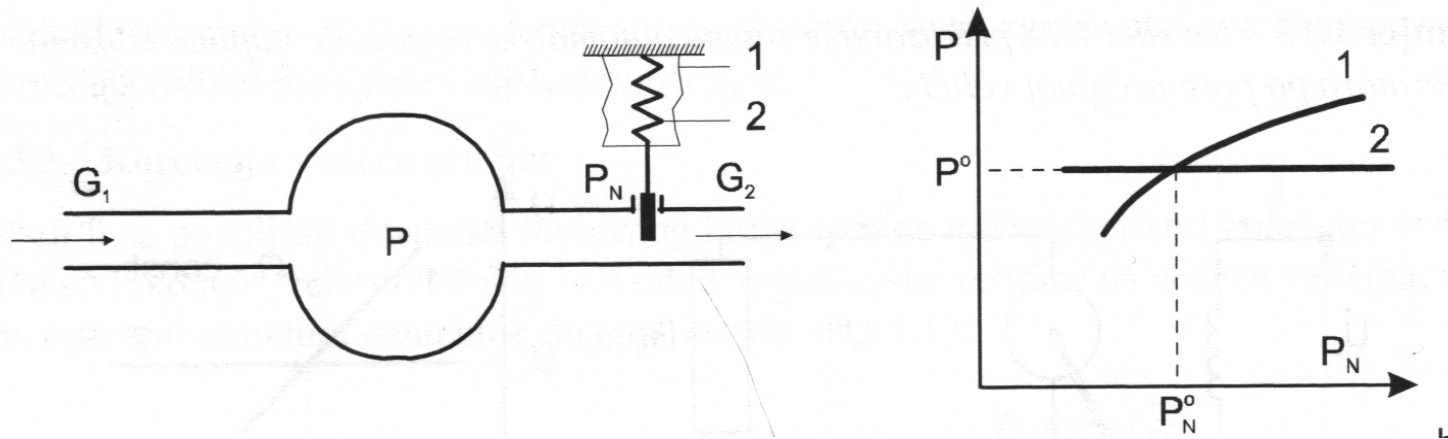


Načelo kompenzacije

- Suština načela kompenzacije je u **mjerjenju poremećajnih veličina**, te, ovisno o rezultatima mjerenja, **formiranja izvršnog djelovanja na objekt regulacije**.
- Cilj je osiguranje promjene izlazne veličine prema zadanoj vodećoj veličini uz **ponišćavanje mjerljivih poremećaja**.



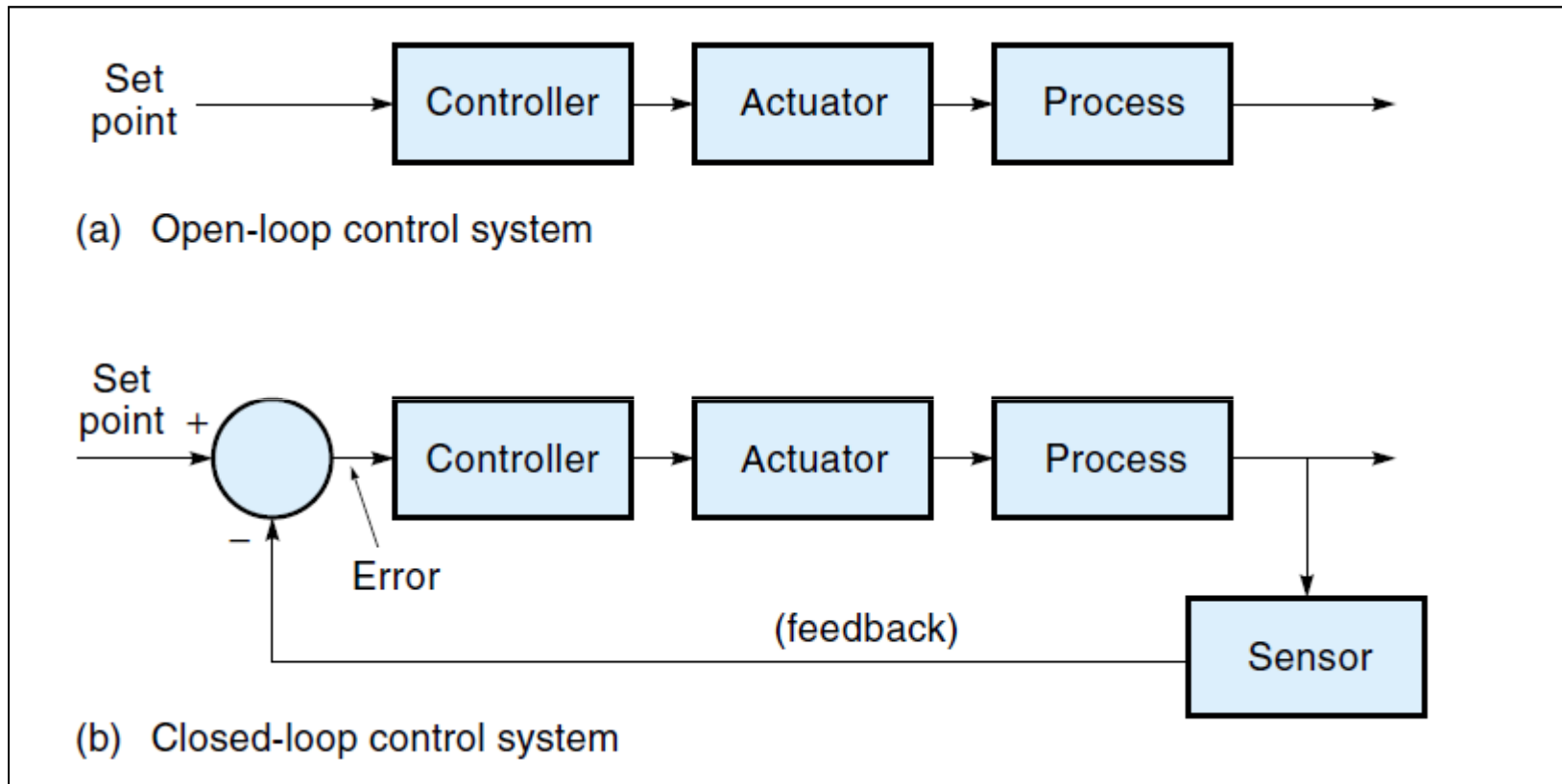
Načelo kompenzacije



Ako se želi održati **konstantan tlak u posudi P** (krivulja 2) bez obzira na promjenu atmosferskog tlaka (krivulja 1), tada treba pomicati zasun P_N i regulirati protok zraka G_2

Povećanjem atmosferskog tlaka, posuda P se smanjuje pri čemu tlak zraka u njoj raste. Međutim, atmosferski tlak djeluje na mijeh 2 i oprugu 1 te otvara zasun P_N čime se tlak u posudi održava konstantnim.

Blok shema otvorenog sustava i sustava s povratnom vezom



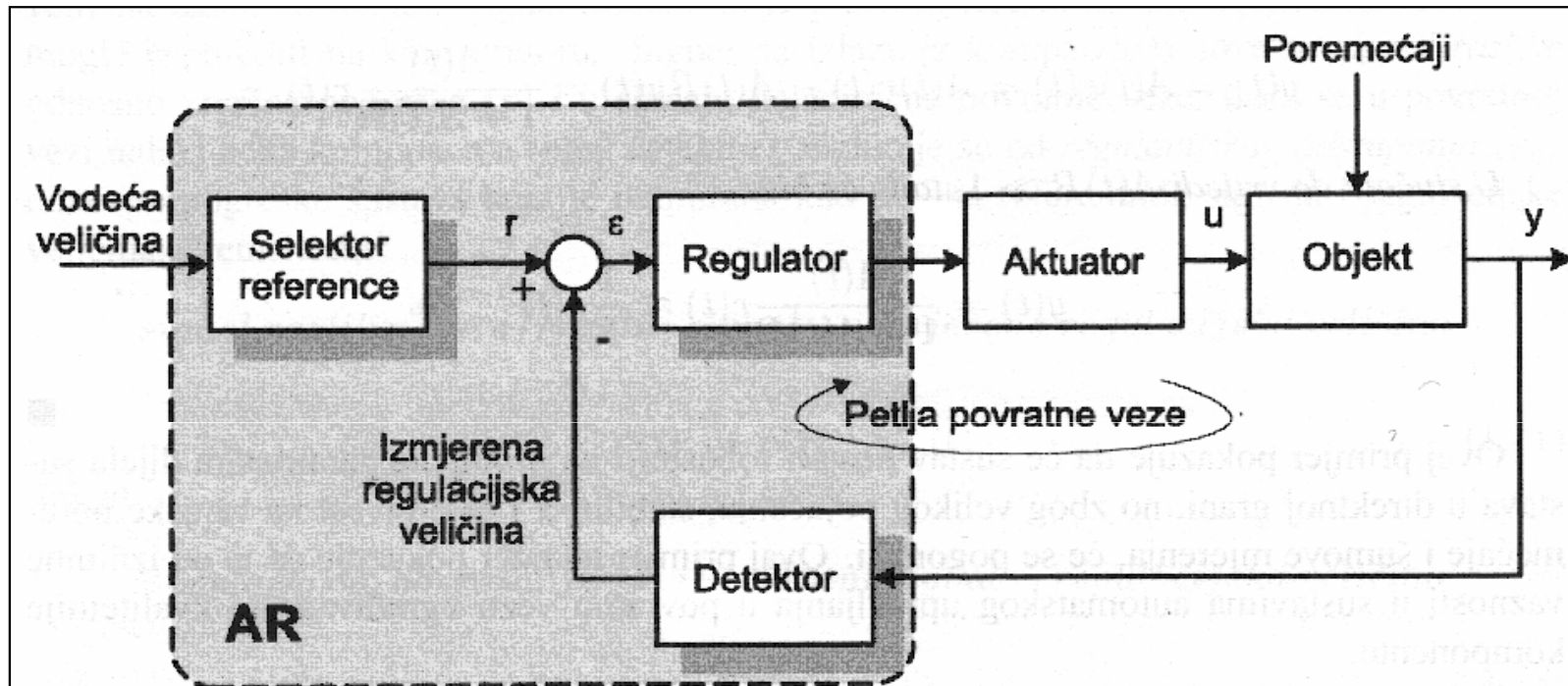
Primjer sustava s povratnom vezom

Primjer upravljanja automobilom

Pri vožnji automobilom potrebno je uočiti sljedeće osnovne radnje:

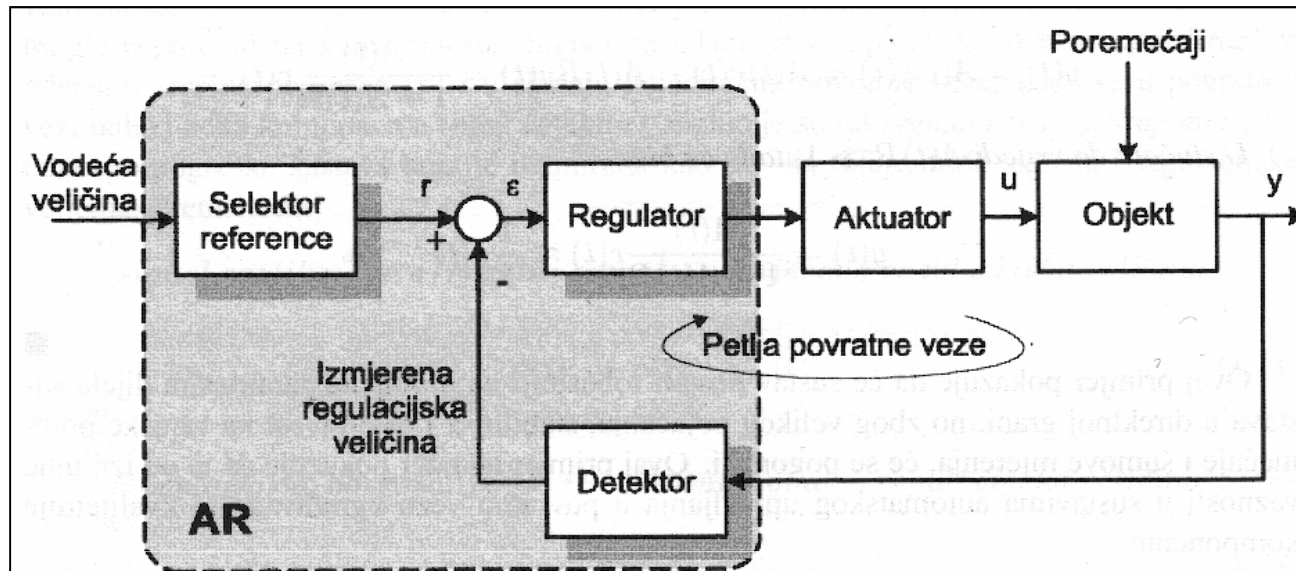
- vozač **prati položaj automobila** u odnosu na put - oči imaju funkciju detektora informacije o ostvarenom rezultatu upravljanja i ta se informacija prenosi u mozak;
- **mozak** vozača **uspoređuje i analizira primljene informacije** o putu (to je referentna ili vodeća veličina) i o trenutnom položaju automobila (to je regulirana veličina);
- mozak donosi **odluku** o aktiviranju **izvršnog organa**, to su ruke, tj. stvara izvršnu veličinu $y(t)$;
- **izvršenje** odluke na objektu reguliranja- to je upravljač automobila kojega vozač rukama pomiče.

Blok shema povratne veze



Bitno je uočiti da se kod načela sustava s povratnom vezom **ne mjere poremećajne veličine.**

Načelo povratne veze

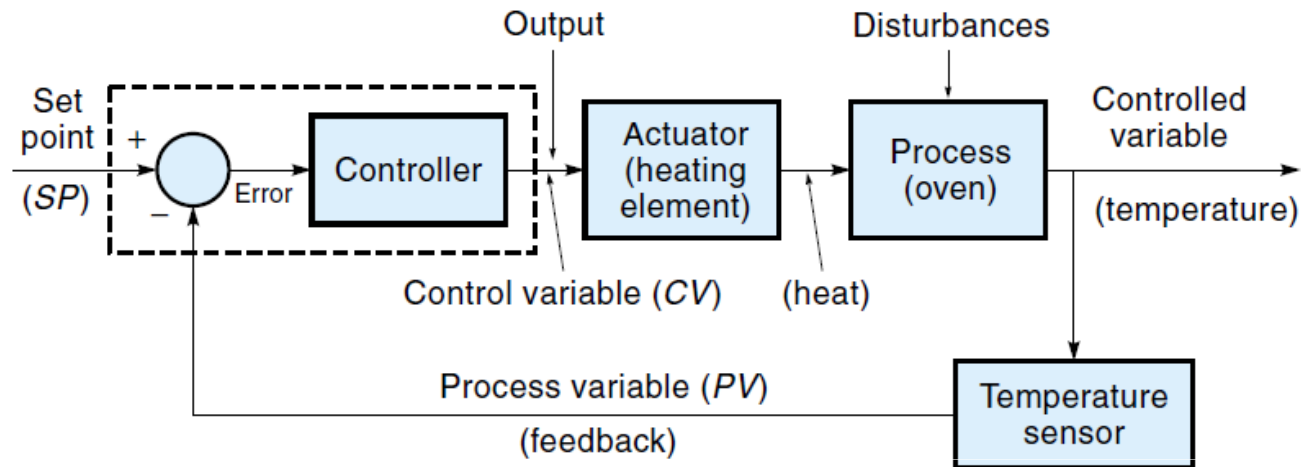


- Zadatak sustava automatske regulacije je ostvarivanje uvjeta: **$y(t) = r(t)$**
- Informacija o stanju na izlazu $y(t)$ stalno se mjeri s pomoću senzora, te se dovodi u komparator gdje se uspoređuje s referentnom veličinom $r(t)$.
- Razlika između referentne $r(t)$ i regulirane veličine $y(t)$ naziva se regulacijsko odstupanje sustava automatske regulacije.

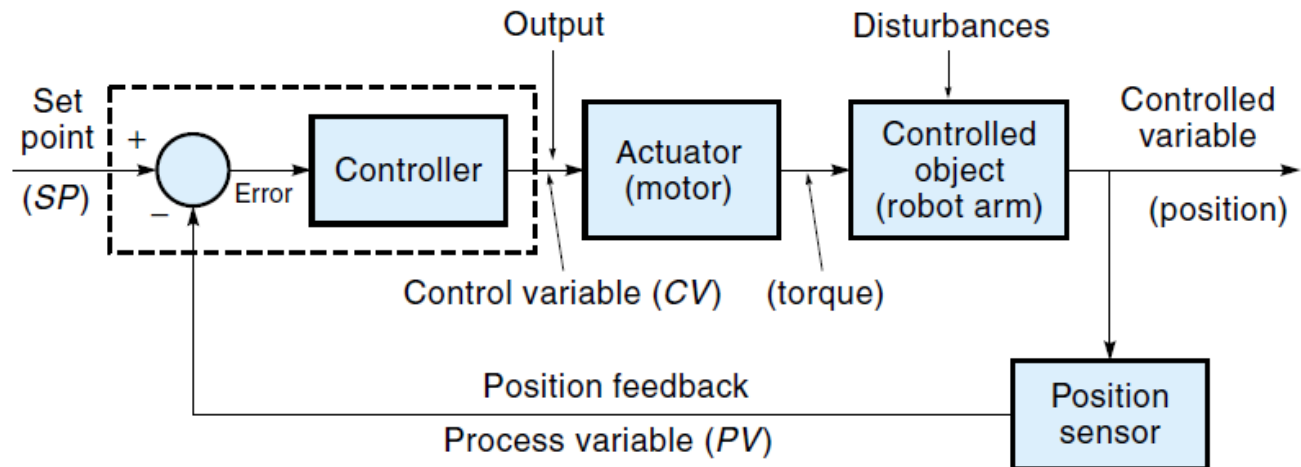
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

- Signal regulacijskog odstupanja $e(t)$ dovodi se na ulaz regulatora.
- Zadatak regulatora je da generira signal $u(t)$ koji će pomoću aktuatora upravljati objektom regulacije na način da regulacijsko odstupanje što više smanji ($e(t) = 0$).

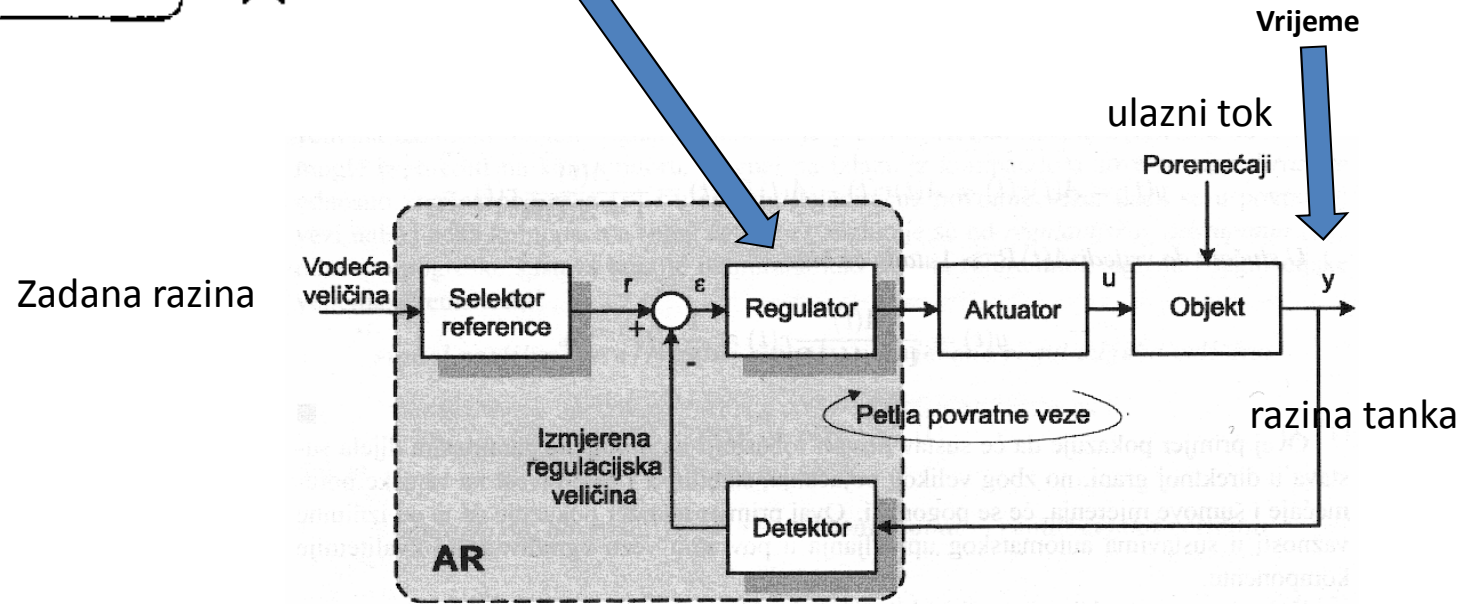
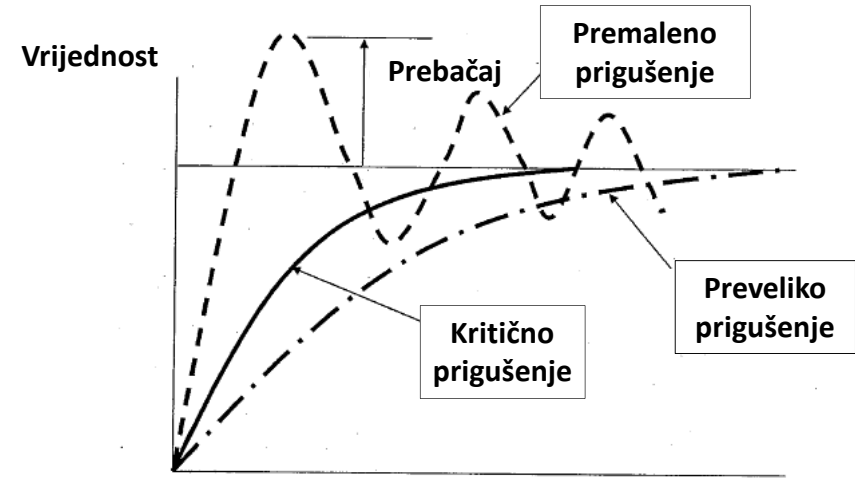
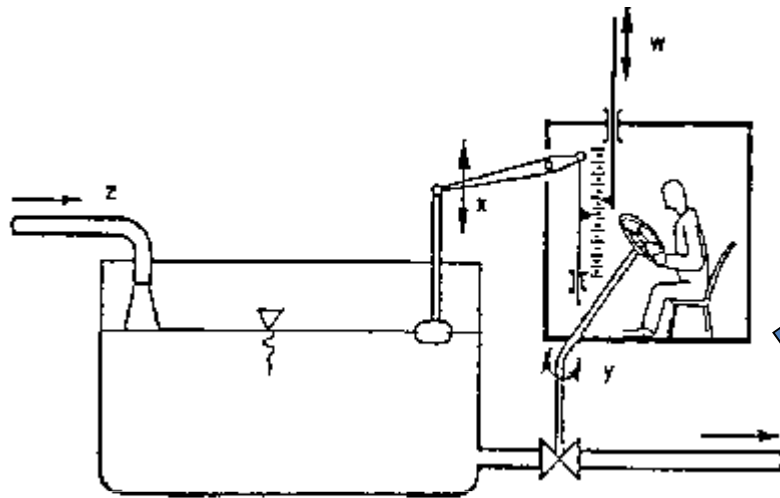
Primjer upravljanja procesom i servomehanizmom

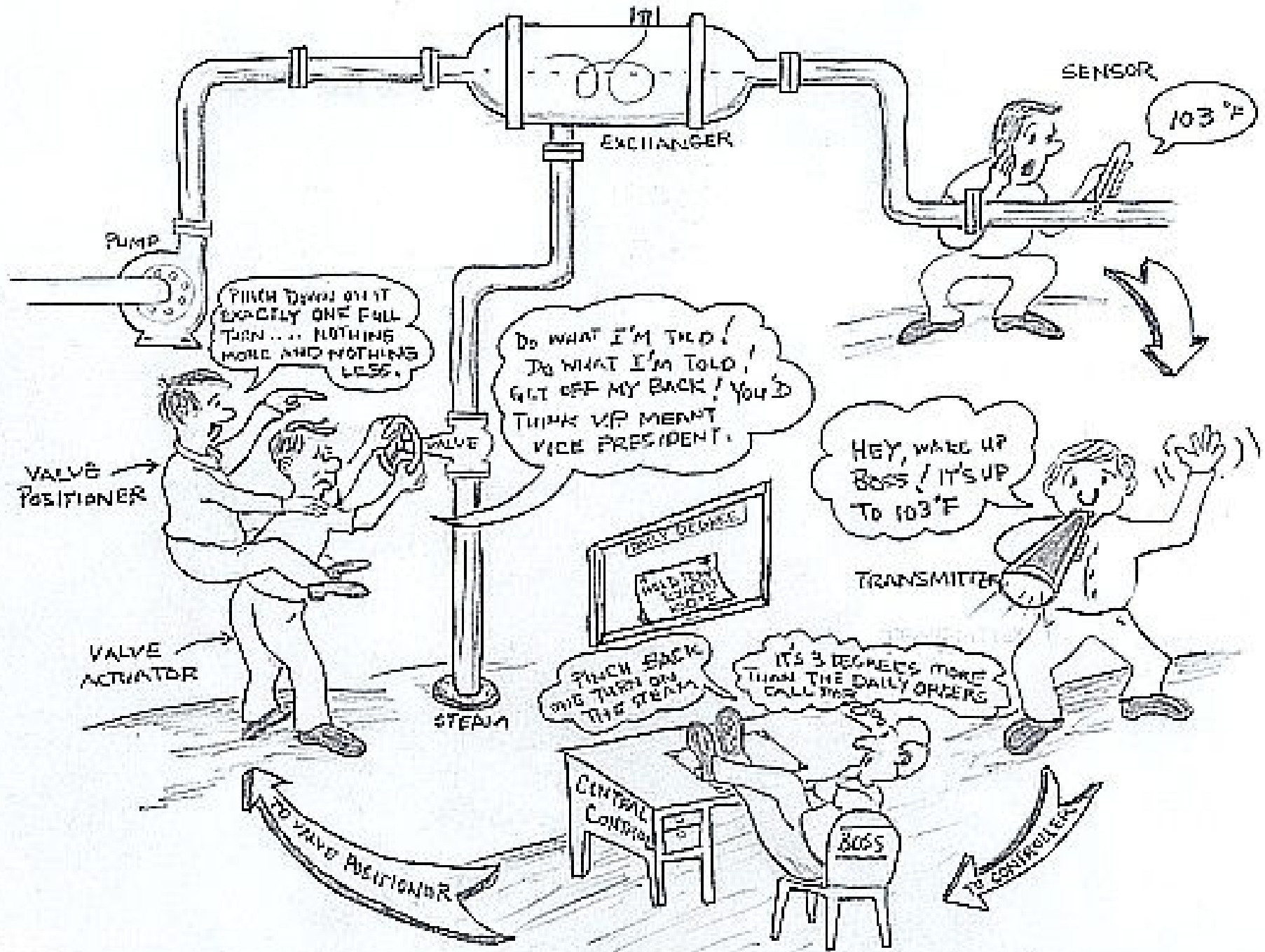


(a) Process control system (heating system)



Primjer održavanja konstantne razine tanka regulacijom izlaznog toka





Tipovi regulatora

U praksi se sureću sljedeće vrste regulatora:

- **P regulator** - proporcionalno djelovanje na regulacijsko odstupanje
- **D regulator** - derivacijsko djelovanje na regulacijsko odstupanje
- **I regulator** - integralno djelovanje na regulacijsko odstupanje

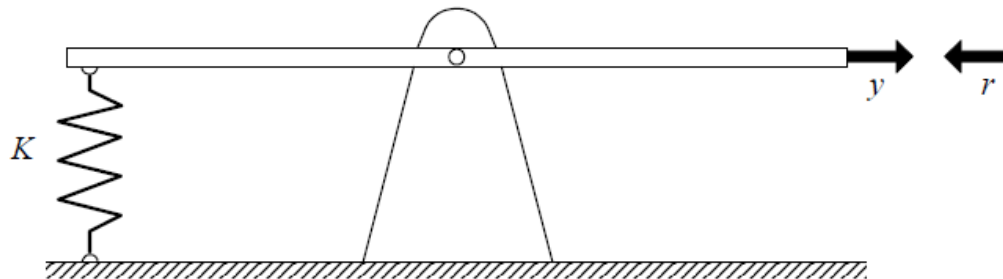
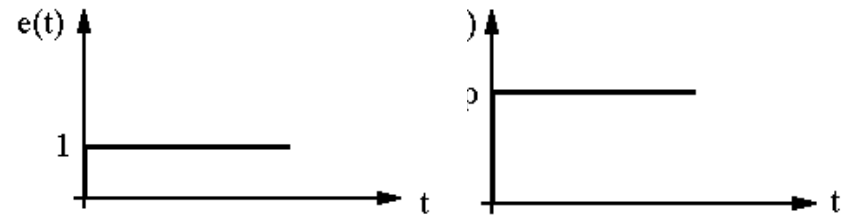
Moguće su i **P**, **PI**, **PD** i **PID** inačice djelovanja.

D djelovanje se praktički nikada ne koristi samostalno.

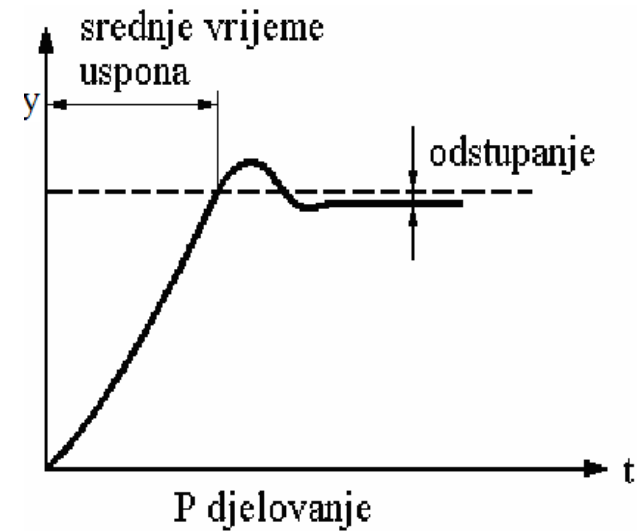
P - regulator

Karakteristike P-regulatora

- veće pojačanje manje odstupanje
- veće pojačanje manje vrijeme uspona
- veće pojačanje veće oscilacije
- preostaje odstupanje regulirane veličine



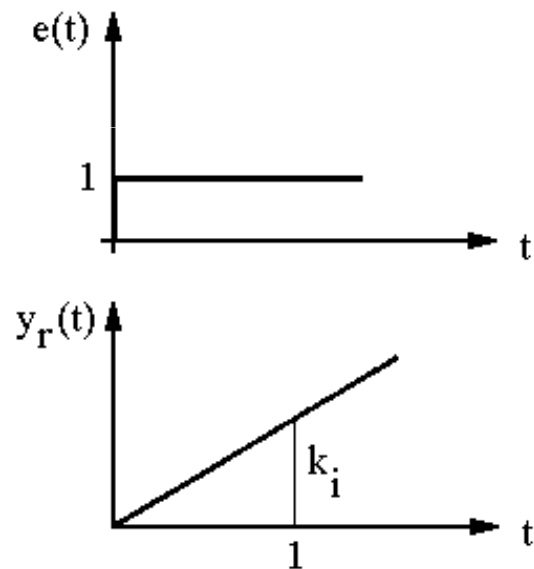
Klackalica s oprugom – P regulator



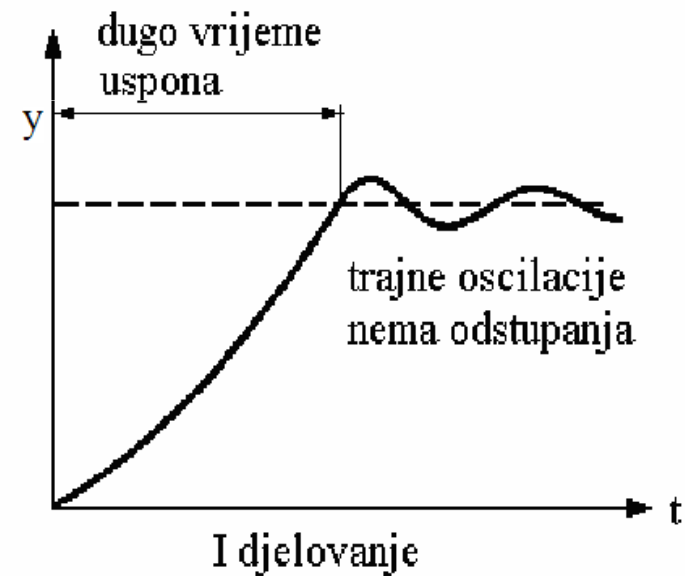
I - regulator

Karakteristike I-regulatora

- imaju svojstvo eliminacije pogreške
- brzina djelovanja proporcionalna je veličini pogreške



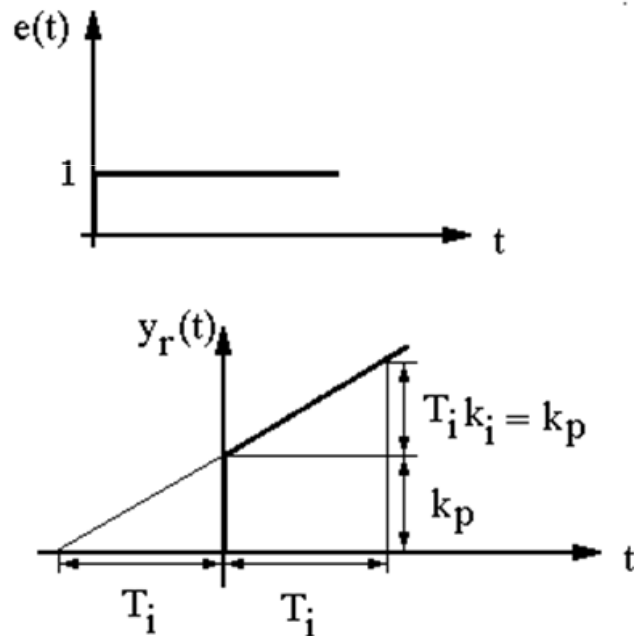
$$y_r(t) = k_i \int e(t) dt$$



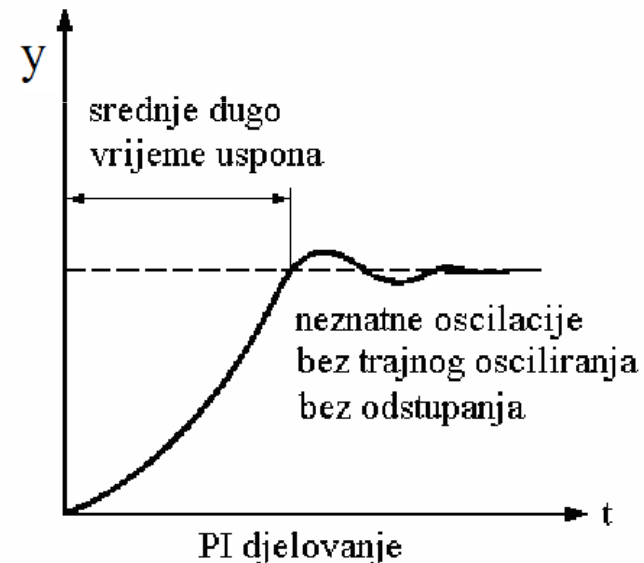
PI - regulator

Karakteristike PI-regulatora

- Proporcionalno djelovanje daje neposrednost i stabilnost djelovanja, dok integracijsko djelovanje otklanja odstupanje.
- Tijekom prijelaznih pojava pojavljuju se oscilacije.



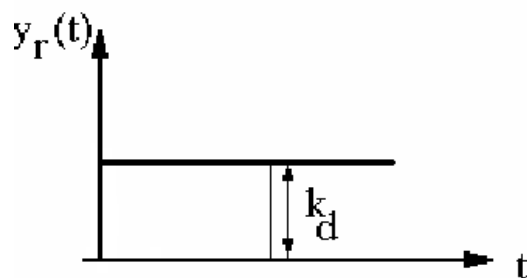
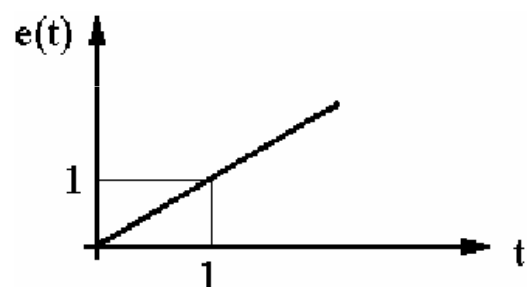
$$y_r(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt$$



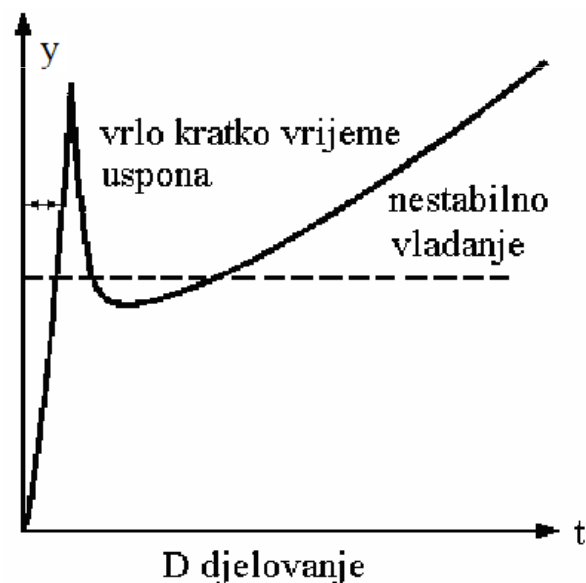
D - regulator

Karakteristike D-regulatora

- diferencijalno djelovanje ovisi o brzini promjene pogreške
- djelovanje regulatora je najveće kada je brzina promjene pogreške najveća
- regulator daje signal samo dok traje promjena ulaznog signala
- u praksi se ne koristi samostalno, već se koristi u kombinacijama PD ili PID djelovanja



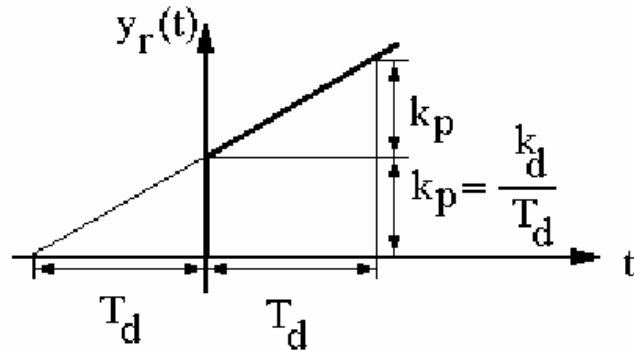
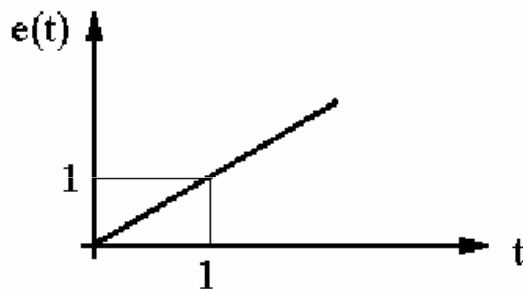
$$y_r(t) = k_d \frac{de(t)}{dt}$$



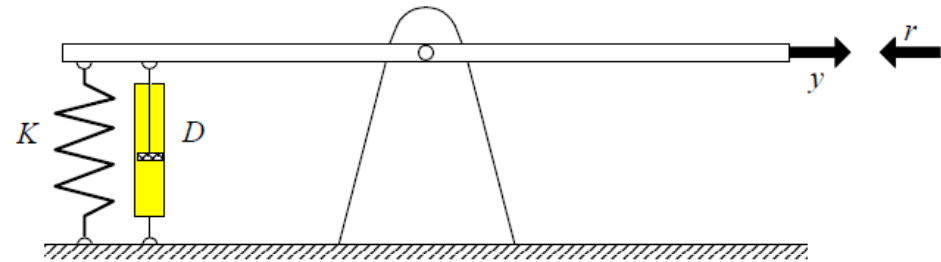
PD - regulator

Karakteristike PD-regulatora

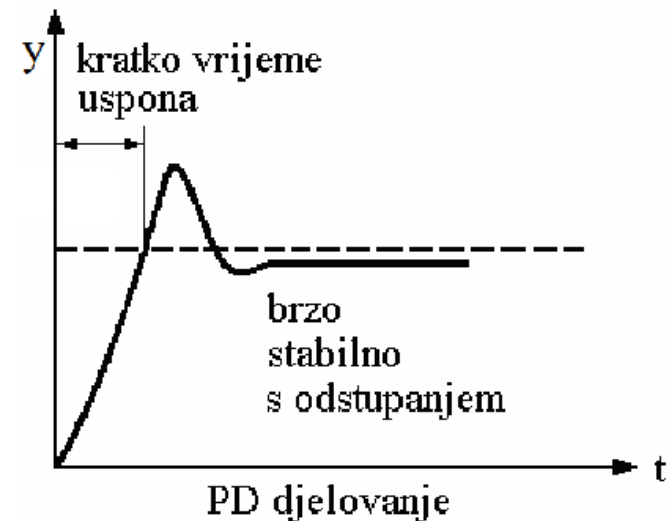
- Proporcionalno djelovanje daje neposrednost i stabilnost djelovanja te otklanja veća odstupanja, dok derivacijsko djelovanje daje brzinu odziva
- Preostaje odstupanje regulirane veličine



$$y_r(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt}$$



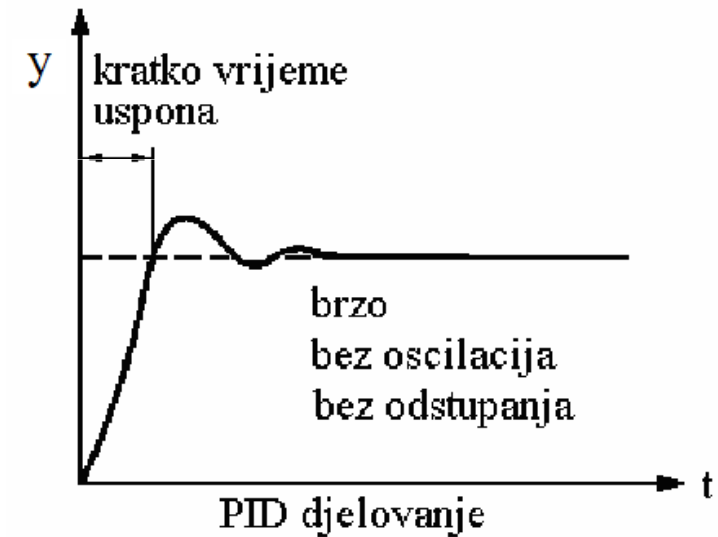
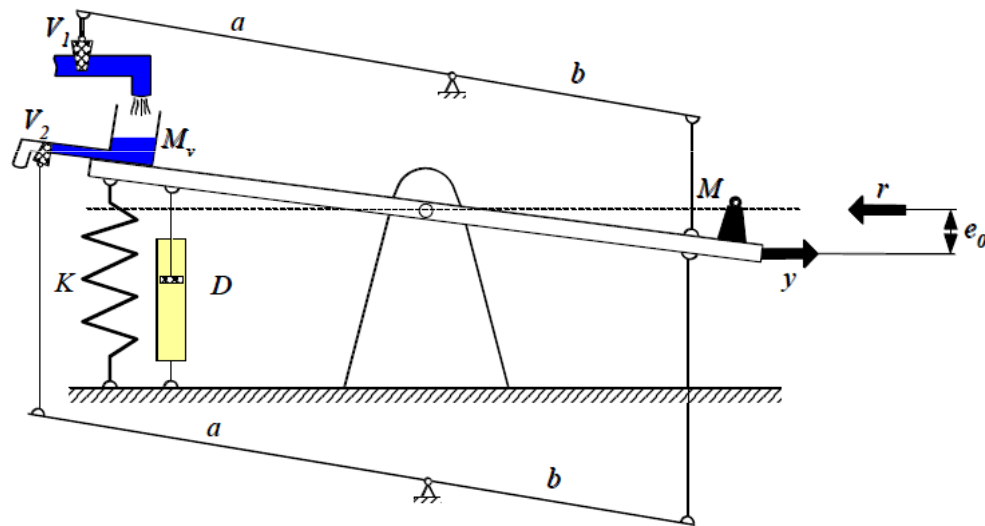
Klackalica s oprugom i viskoznom prigušivačem – PD regulator



PID - regulator

Karakteristike PID-regulatora

- Proporcionalno djelovanje osigurava mu stabilnost, integracijsko otklanja odstupanje, a derivacijsko poboljšava brzinu odziva i prigušuje eventualnu sklonost sustava k osciliranju



Klackalica s oprugom, viskozim prigušivačem i mehanizmom za punjenje i pražnjenje spremnika - PID regulator

PID - regulator

Iz prije navedenogaže se zaključiti sljedeće:

- Povećanjem proporcionalnog (P) pojačanja regulatora, odnosno krućom oprugom, može se dobiti brži sustav, koji će uz to imati manje trajno regulacijsko odstupanje. No, pri tom sustav postaje skloniji oscilacijama.
- Povećanjem derivacijskog (D) pojačanja regulatora, odnosno većim viskoznim prigušenjem, oscilacije u sustavu će se smanjivati, ali prevelikim prigušenjem može se usporiti odziv.
- Uvođenjem integralnog (I) djelovanja eliminira se trajno regulacijsko odstupanje. Ipak, takvo djelovanje, posebno ako je pojačanje integralnog djelovanja značajno može loše utjecati na stabilnost sustava.

Načela podešavanja parametara PID regulatora

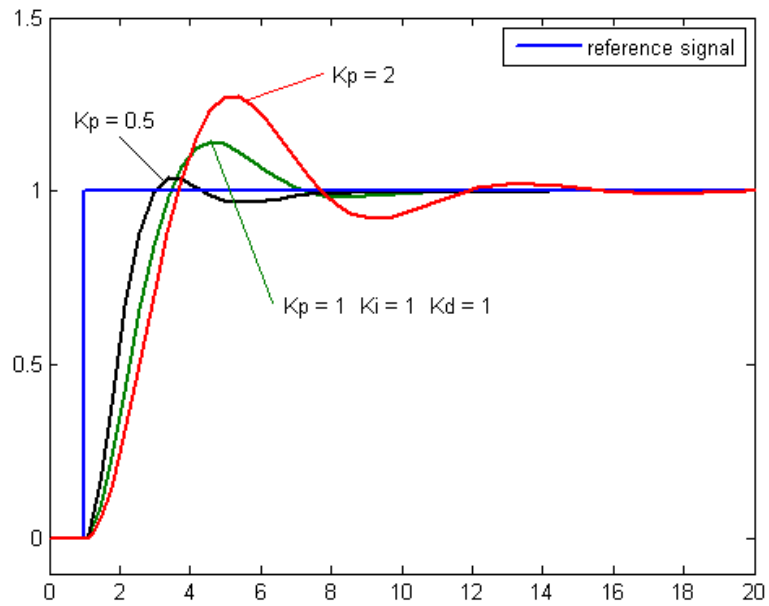
- Jednostavna načela podešavanja parametara PID regulatora dana su u tablici ispod
- PID regulator dan je svojom prijenosnom funkcijom:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \equiv K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

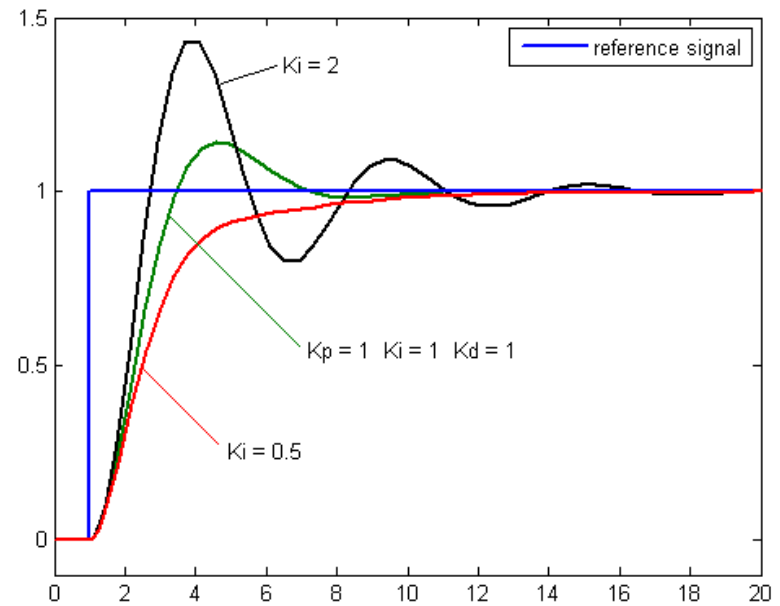
gdje je K_p pojačanje proporcionalnog djelovanja, K_I pojačanje integralnog djelovanja, K_D pojačanje derivacijskog djelovanja, T_d derivacijsko vrijeme ili vremenska konstanta derivacije, a T_i integralno vrijeme ili vremenska konstanta integracije

Utjecaj parametara PID regulatora na odziv sustava

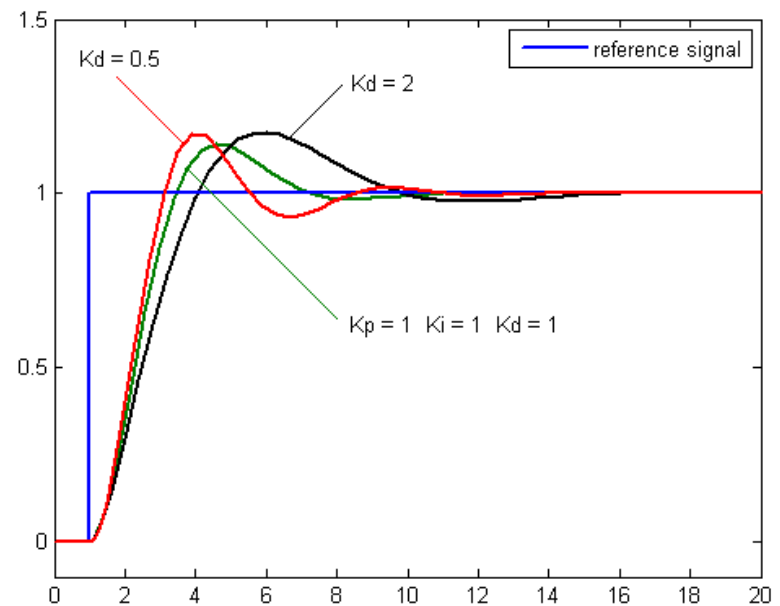
Regulacijsko djelovanje	Vrijeme porasta t_r	Maksimalni prebačaj M_p	Vrijeme smirivanja t_s	Trajno reg. odstupanje e_0
K_p	smanjuje se	povećava se	mali utjecaj	smanjuje se
K_I	smanjuje se	povećava se	povećava se	uklanja se
K_D	mali utjecaj	smanjuje se	smanjuje se	mali utjecaj



Promjena regulirane veličine za tri vrijednosti K_p



Promjena regulirane veličine za tri vrijednosti K_i



Promjena regulirane veličine za tri vrijednosti K_D

Načela podešavanja parametara PID regulatora

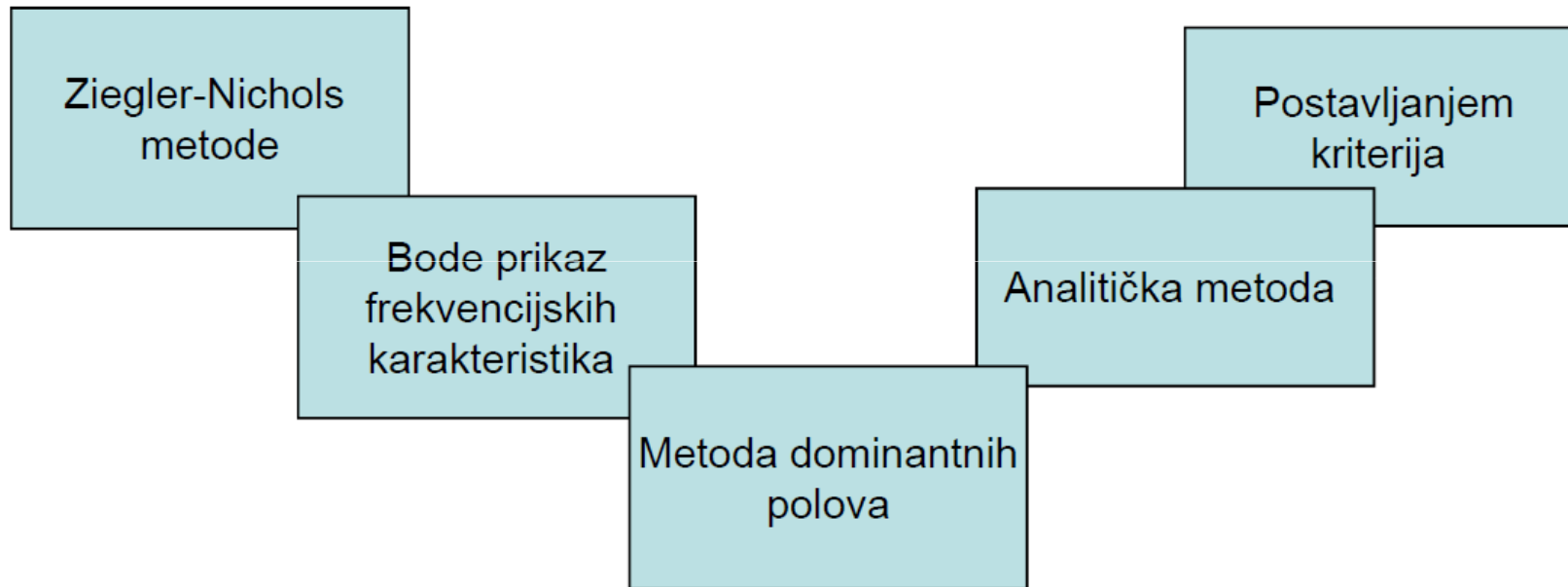
Za simulaciju jednostavnijih slučajeva mogu se slijediti ove smjernice:

1. Iz odziva u otvorenom krugu odrediti što se treba popraviti.
2. Dodaje se P djelovanje radi poboljšanja brzine odziva (vremena porasta).
3. Dodaje se D djelovanje radi smanjenja oscilacija odziva (maks. prebačaja).
4. Dodaje se I dio radi uklanjanja trajnog regulacijskog odstupanja.
5. Podešavaju se parametri regulatora dok se ne dobije željeni odziv zatvorenog kruga.

Važno je naglasiti da se poboljšanjem nekog svojstva odziva promjenama pojedinog djelovanja regulatora istovremeno utječe na druga svojstva odziva, te je često potrebno puno iteracija da bi se došlo do zadovoljavajuće podešenosti regulatora.

PID - regulator

Uobičajene metode projektiranja parametara regulatora



PID - regulator

Ziegler-Nicholsova metoda

- Postupci određivanja parametara regulatora su temeljeni na empirijskim istraživanjima Zieglera i Nicholosa.
- **Metoda ruba stabilnosti** (koristi se tamo gdje nije opasno dovesti regulacijske sustave do ruba stabilnosti; bitna iskustvena procjena)
- **Metoda prijelazne funkcije** (snima se prijelazna funkcija za otvoreni regulacijski krug). Vrlo često izvediva u radnim (industrijskim) uvjetima
- Koristi se tamo gdje se iz sigurnosnih razloga ne može koristiti metoda ruba stabilnosti.

Ziegler-Nicholsova metoda

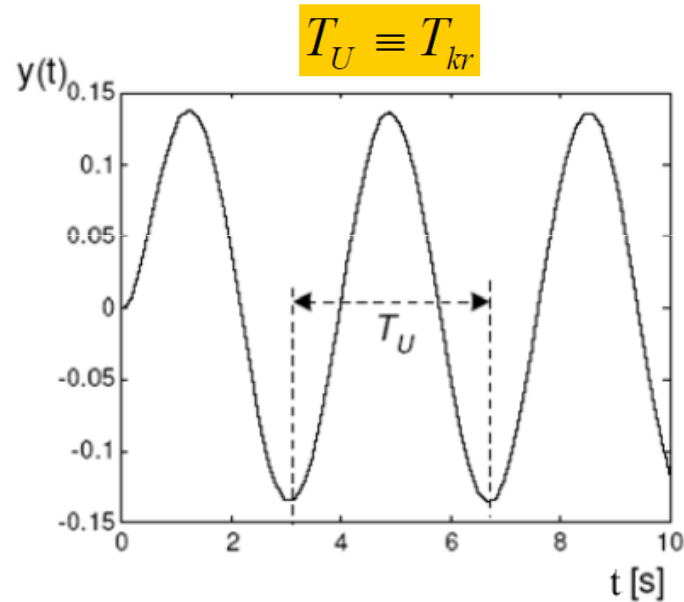
Metoda ruba stabilnosti

Postupak:

- Regulatoru koji se nalazi u regulacijskom sustavu odabere se samo proporcionalno djelovanje (isključuje se derivacijska i integralna komponenta);
- Pojačanje regulatora se povećava dok se ne proizvedu trajne oscilacije konstante amplitude. Pojačanje uz koje se dobiju trajne oscilacije označava se kritičnim (graničnim) pojačanjem regulatora K_{Rkr} ;
- Mjeri se iznos periode oscilacija T_{kr}
- Prema dobivenim vrijednostima K_{Rkr} i T_{kr} određuju se parametri regulatora P, PI i PID tipa prema relacijama navedenim u sljedećoj tablici

Ziegler-Nicholsova metoda

Metoda ruba stabilnosti



Ilustracija Ziegler-Nichols metode ruba stabilnosti

Određivanje parametara regulatora prema Ziegler-Nichols metodi ruba stabilnosti

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	K_R	T_I	T_D
P	$0.5K_{Rkr}$	-	-
PI	$0.6K_{Rkr}$	$0.8T_{kr}$	-
PID	$0.4K_{Rkr}$	$0.5T_{kr}$	$0.125T_{kr}$