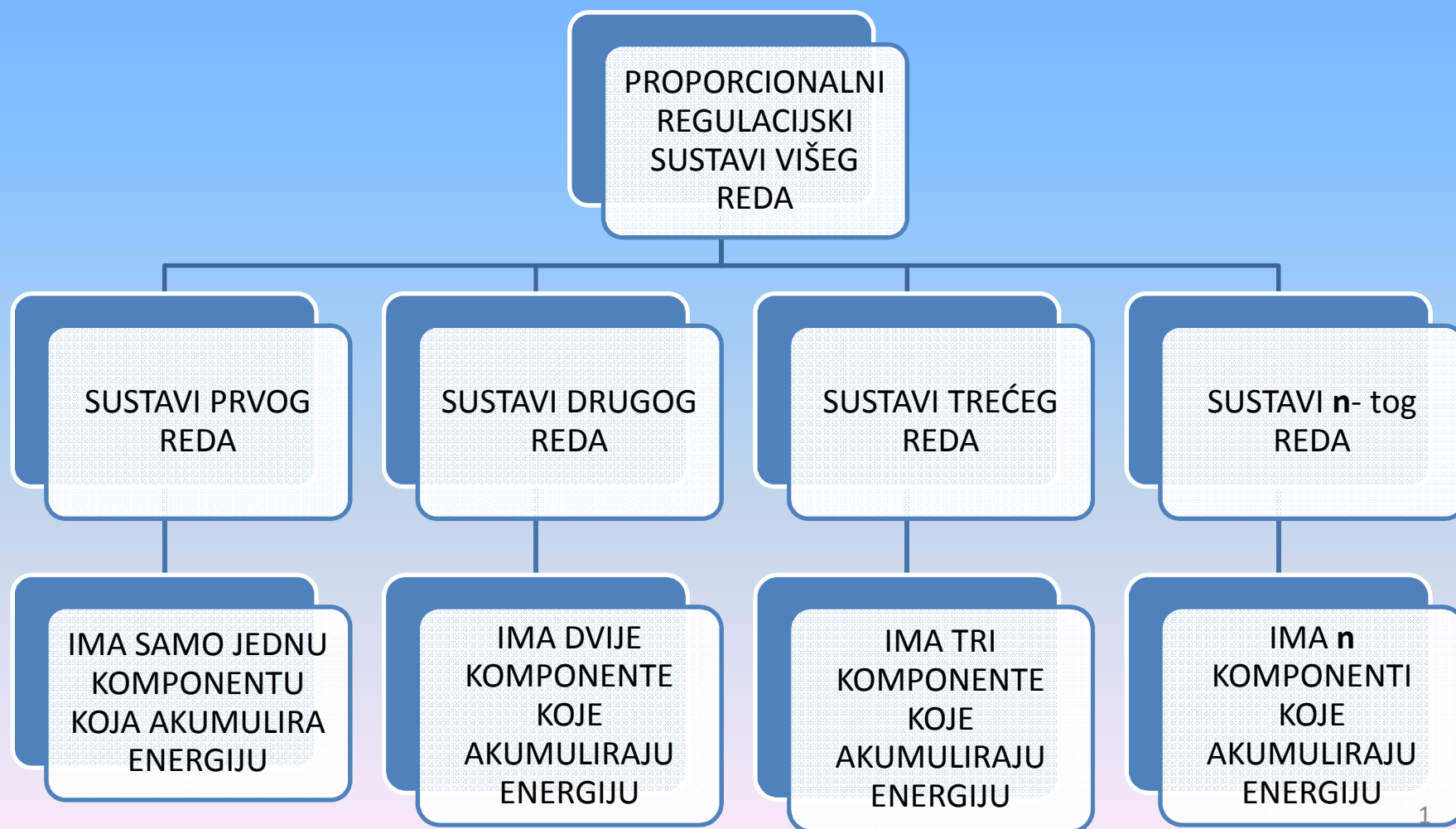
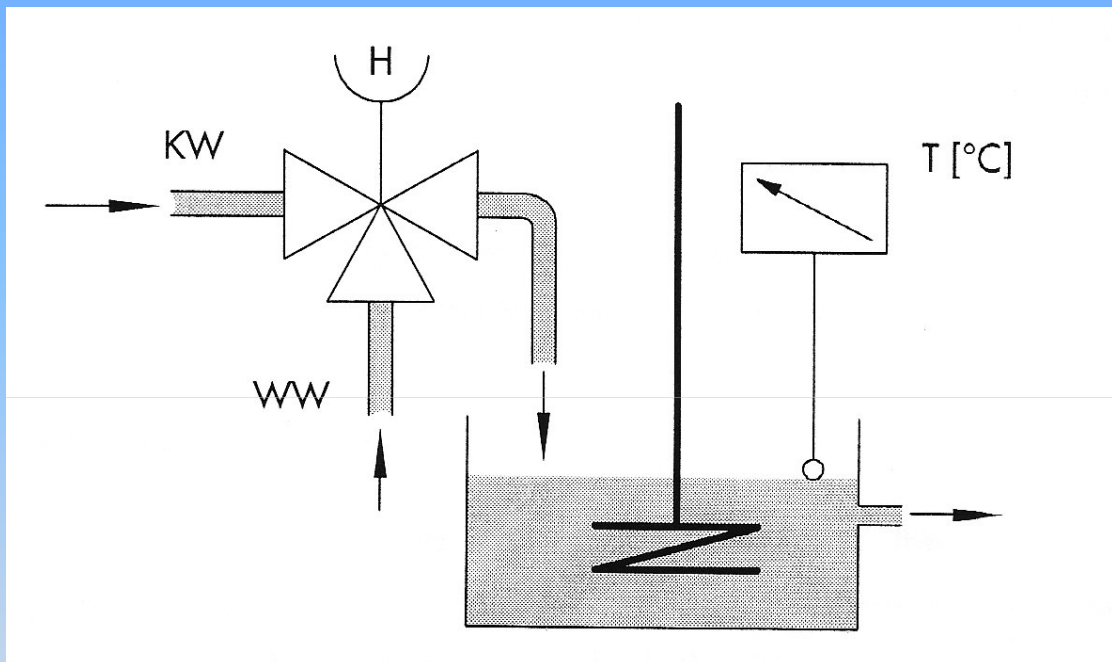


- Regulaijski proporcionalni sustavi s komponentama koje akumuliraju energiju klasificirani su prema broju komponenti koje akumuliraju energiju i uzrokuju kašnjenja u odgovoru
- Proporcionalni sustavi bez komponenti koje akumuliraju energiju zovu se još i **sustavi nultog reda** (takav sustav prikazan na slici 212. i 213.)



Sustav prvog reda

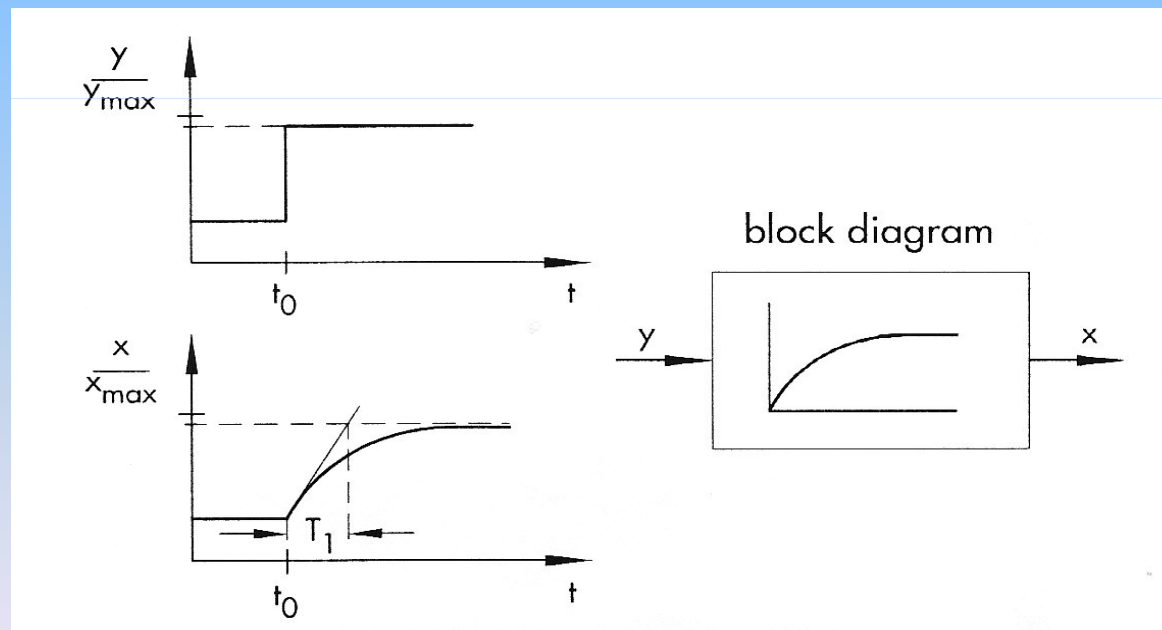
- Ovaj sustav ima samo jednu komponentu koja akumulira energiju i prikazan je na slici 219.



Slika 219. Sustav prvog reda; procesna varijabla: temperatura

- Tank s tekućinom posjeduje ulaz i izlaz tekućine, mješač i temperaturni senzor
- Temperatura se održava pomoću troputnog ventila

- Tank s tekućinom je zbog svoje veličine ustvari komponenta koja akumulira energiju
- Troputnim ventilom se regulira protok hladne (KW) i vruće (WW) tekućine u tank
- Promjena temperature u tanku nastupa postupno (stupnjevito) nakon promjene na troputnom ventilu (skokovita promjena)
- Dinamičko ponašanje sustava prvog reda uslijed skokovite promjene upravljane varijable y data je na slici 220.



Slika 220. Dinamičko ponašanje sustava prvog reda

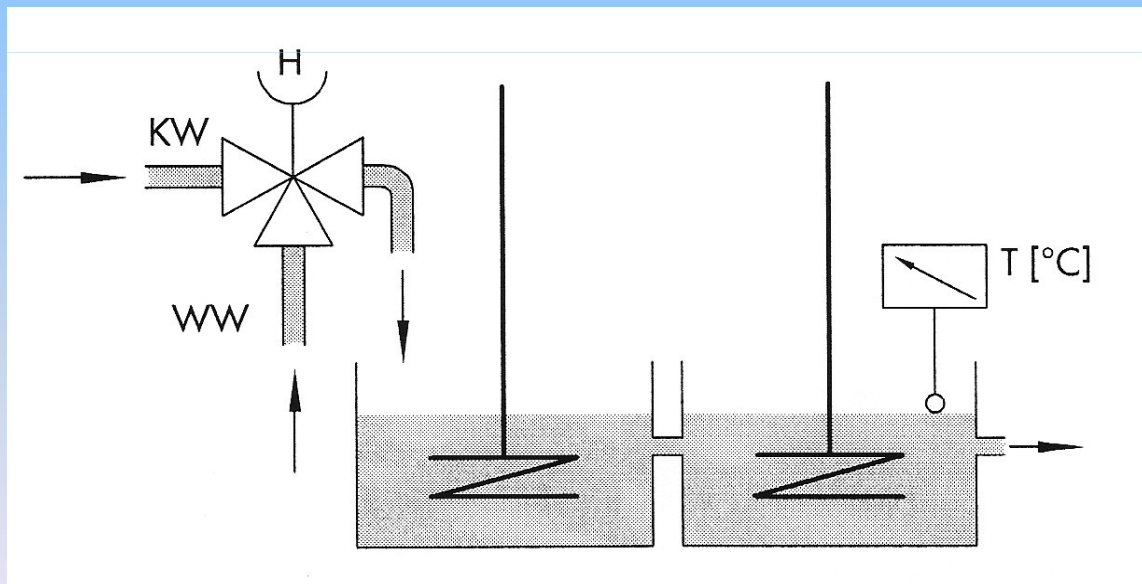
- Brzina odgovora izlaznog signala sustava označena je vremenskom konstantom T_1
- Ova vremenska konstanta označava vrijeme potrebno da procesna varijabla x (prikazana u obliku eksponencijalne krivulje) dosegne 63% od svoje konačne zadane vrijednosti koju će odrediti vrijednost skokovite promjene ulazne varijable
- Jednadžba kojim se opisuje sustav prvog reda je:

$$x(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_1}}$$

- Ovakvo ponašanje proporcionalnog sustava s kašnjenjem prvog reda naziva se još i ponašanje PT_1
- Što je veća vremenska konstanta T_1 , sporija je promjena procesne varijable x
- Vrijednost konstante T_1 može se odrediti i grafički pomoću tangente na krivulji kao što je prikazano na slici 220.

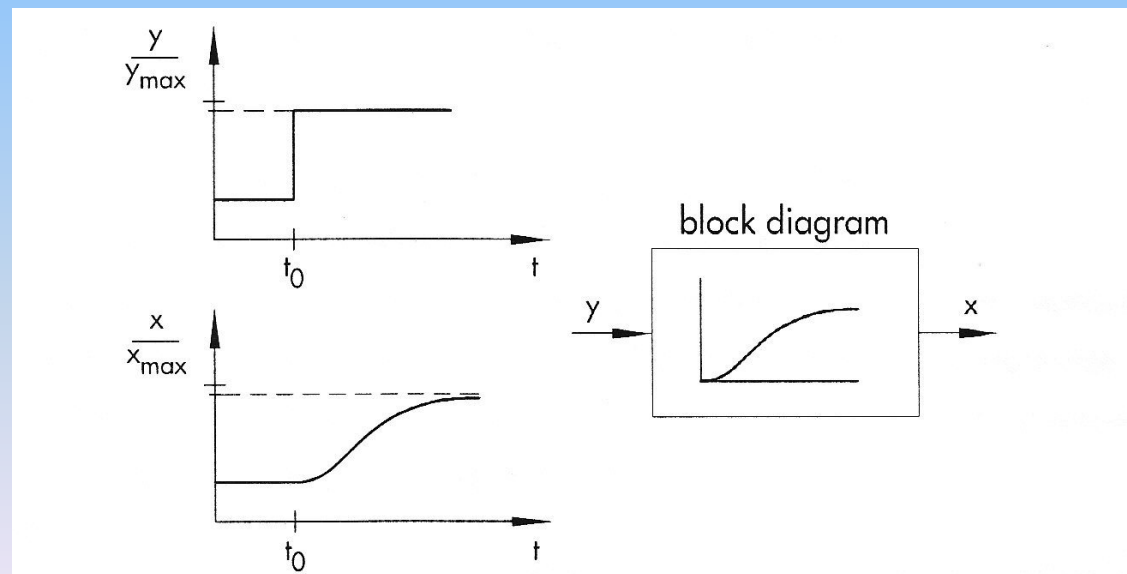
Sustavi drugog reda i viših redova

- Kod ovakvih sustava prisutne su dvije ili više komponenti koje akumuliraju energiju koje se nalaze između upravljane veličine i procesne varijable
- Prema broju ovakvih komponenti govori se o sustavima drugog, trećeg, četvrtog i ostalih viših redova i označavaju se shodno tome **PT₂**, **PT₃**, **PT₄** itd.
- Ako se serijski spoje dva sustava prvog reda dobiva se sustav drugog reda kako je prikazano na slici 221.

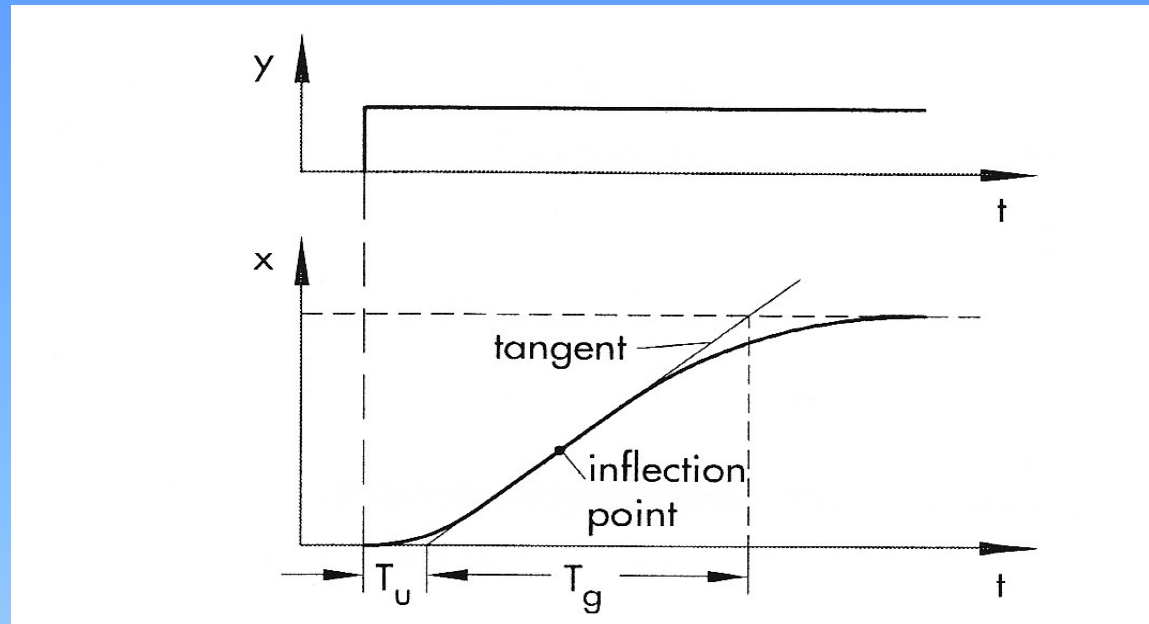


Slika 221. Proporcionalni sustav sustav drugog reda

- I u ovom slučaju procesna varijabla je temperatura tekućine u tanku, komponente koje akumuliraju energiju su dva serijski spojena tanka s tekućinom
- Stupnjeviti odgovor procesne varijable ne skokovitu promjenu vrijednosti ulaznog signala sadrži točku savijanja (*inflection point*) karakterističnu za proporcionalne sustave viših redova (prikazana na slikama 222. i 223.)
- Kod točke savijanja bitno je primjetiti da veličina promjene procesne varijable raste do točke savijanja, a nakon nje ta veličina promjene počinje kontinuirano opadati
- Dinamičko ponašanje sustava drugog i viših redova prikazano je na slici 222.



Slika 222. Dinamičko ponašanje sustava drugog i viših redova

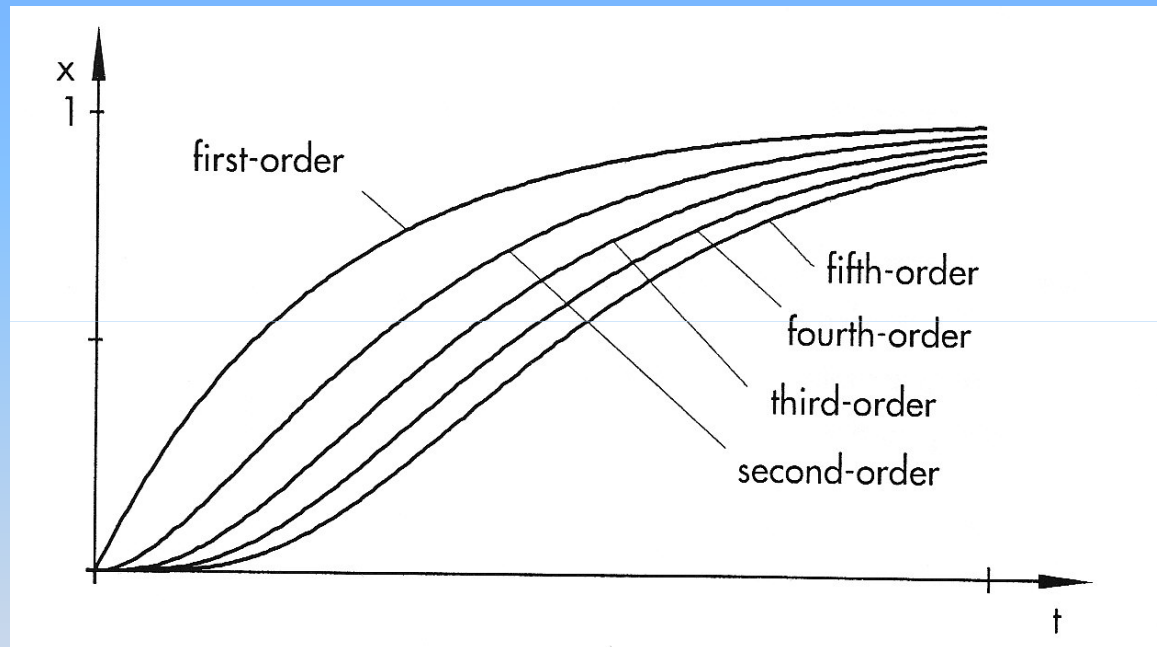


Slika 223. Skokoviti odgovor sustava višeg reda s točkom savijanja

- Karakteristike sustava viših redova koje su opisane vremenskim konstantama T_1 , T_2 itd. matematički se može napisati:

$$x(t) = (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) (1 - e^{-\frac{t}{T_2}})$$

- Što su vrijednosti vremenskih konstanta T_1 , T_2 , T_3 itd. manje, proporcionalni regulacijski sustav bolje radi
- Na slici 224. prikazana su dinamička ponašanja sustava jednog i viših redova

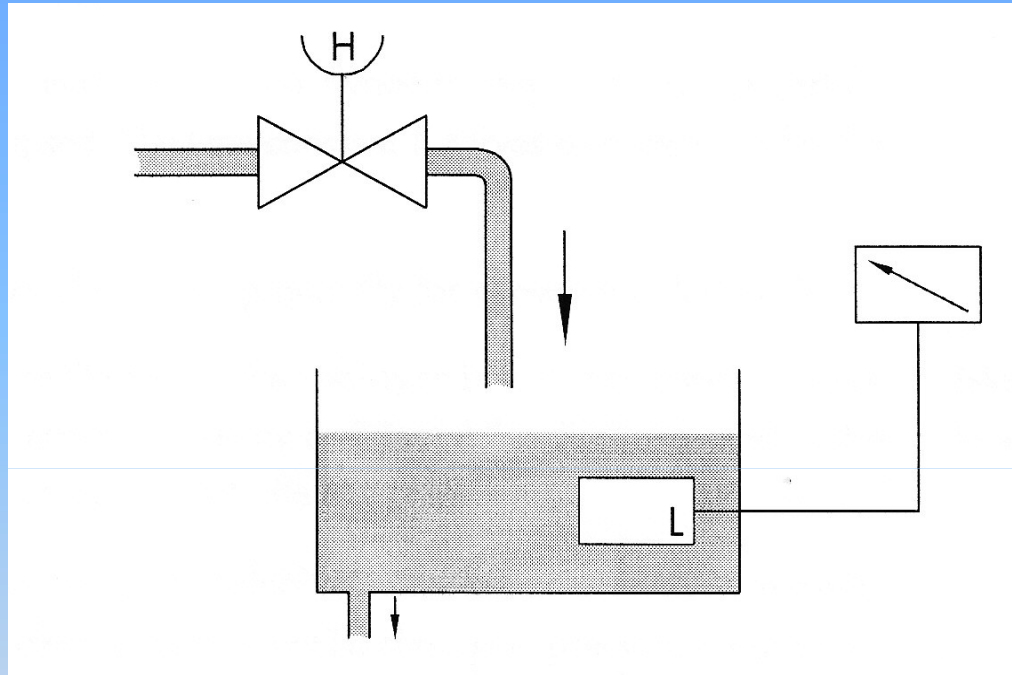


Slika 224. Dinamičko ponašanje sustava prvog i viših redova

INTEGRALNA REGULACIJA

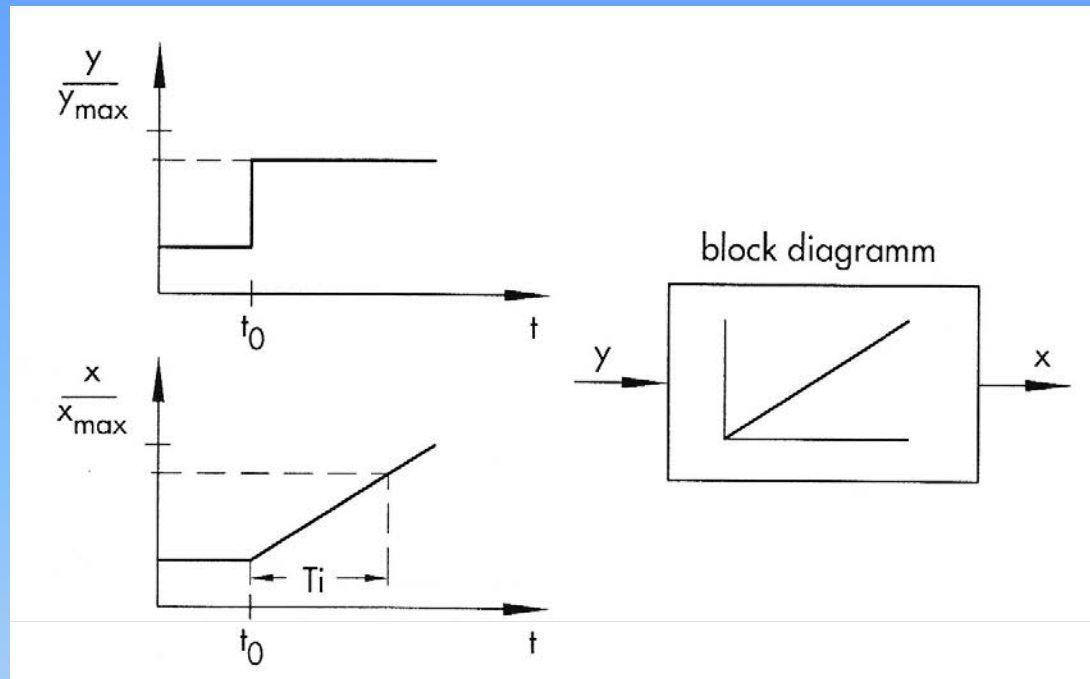
- Integralni sustavi regulacije djeluju sve dok vrijednost ulaznog signala ne postane nula, odnosno ovakav regulator utječe na to da vrijednost procesne varijable kontinuirano raste ili pada sve dok traje promjena vrijednosti ulaznog signala
- Ravnotežno stanje se kod ovakvog sustava ne postiže dok god traje poremećaj
- U praksi isključivih integralnih regulatora (I-regulatora) nema, ali njihovo djelovanje može se prilazati na primjeru tanka s vodom
- Razina tekućine u tanku će početi rasti kada količina tekućine koja dotječe kroz ventil bude veća od količine tekućine koja otječe iz tanka (slika 225.)
- Što je veća razlika između količine tekućine koja ulazi u tank i količine tekućine koja izlazi iz tanka , razina tekućine u tanku će brže rasti
- Vrijednost procesne varijable u sustavima integralne regulacije će rasti ili opadati dok regulacijski sustav ne postigne **granično stanje**

- U našem primjeru tanka, granično stanje počinje preljevanjem tekućine preko ruba tanka, ili u zatvorenom tanku kada se postigne stanje maksimalnog dopuštenog tlaka u tanku



Slika 225. Sustav integralne kontrole (procesna varijabla – razina tekućine u tanku)

- Na slici 226. prikazano je dinamičko ponašanje I – regulatora nakon skokovite promjene vrijednosti ulaznog signala i integrirane vrijednosti procesne varijable



Slika 226. Dinamičko ponašanje I-regulatora (y – položaj poluge ventila, x – razina tekućine u tanku)

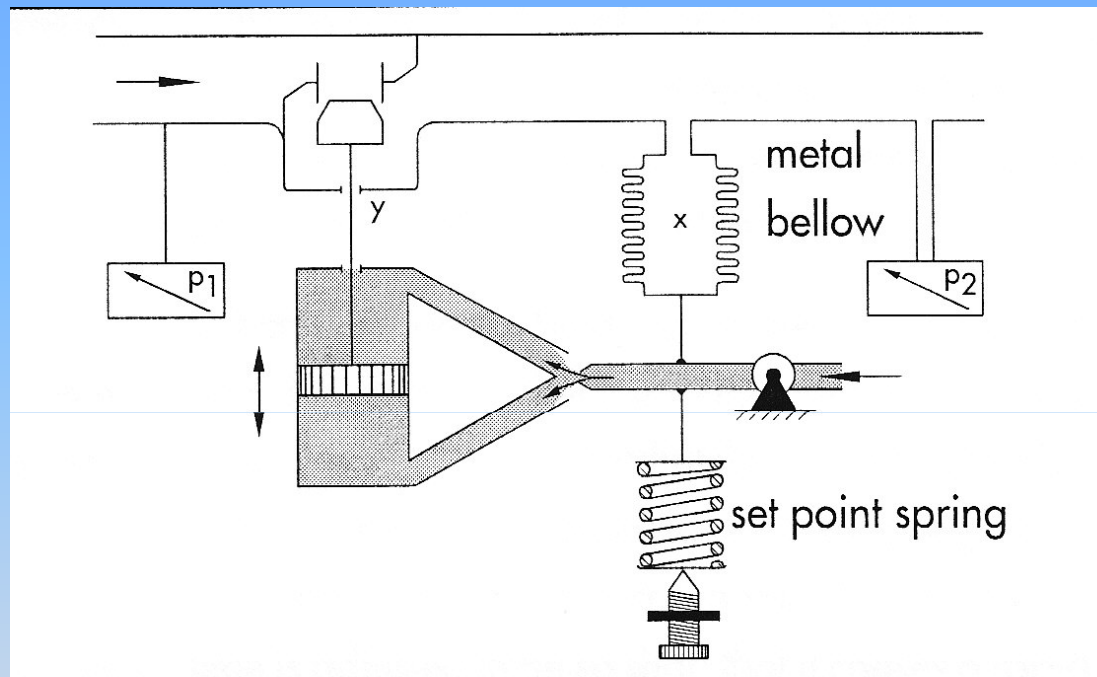
- Integralni regulator koristi se da potpuno ispravi manje pogreške koje se javljaju tijekom procesa regulacije (najčešće proporcionalne regulacije)
- Sve dok je vrijednost signala pogreške različita od nule, integralno djelovanje izaziva mjenjanje vrijednosti procesne varijable

- Matematički izraz integralne regulacije odnosi se na sliku 228. i glasi:

$$y = K_i \int e \, dt \quad \text{with: } K_i = \frac{1}{T_n}$$

- Gdje se vrijednost procesne varijable (**y**) mjenja **proporcionalno integralu** signala pogreške (**e**)
- Zbog toga razloga ovakva regulacije se i zove INTEGRALNA REGULACIJA
- Brzina mjnjanja procesne varijable ovisi o signalu pogreške i o vremenu integracije **T_n**)
- **K_i** je koeficijent integralnog prijenosa i recipročna je vrijednost vremena integracije
- Ako ovakav regulator ima kratko vrijeme integracije (**T_n**) tj. visok koeficijent integralnog prijenosa (**K_i**), izlazni signal regulatora će znatno brže i više djelovati nego kod I-regulatora s velikim vremenom integracije

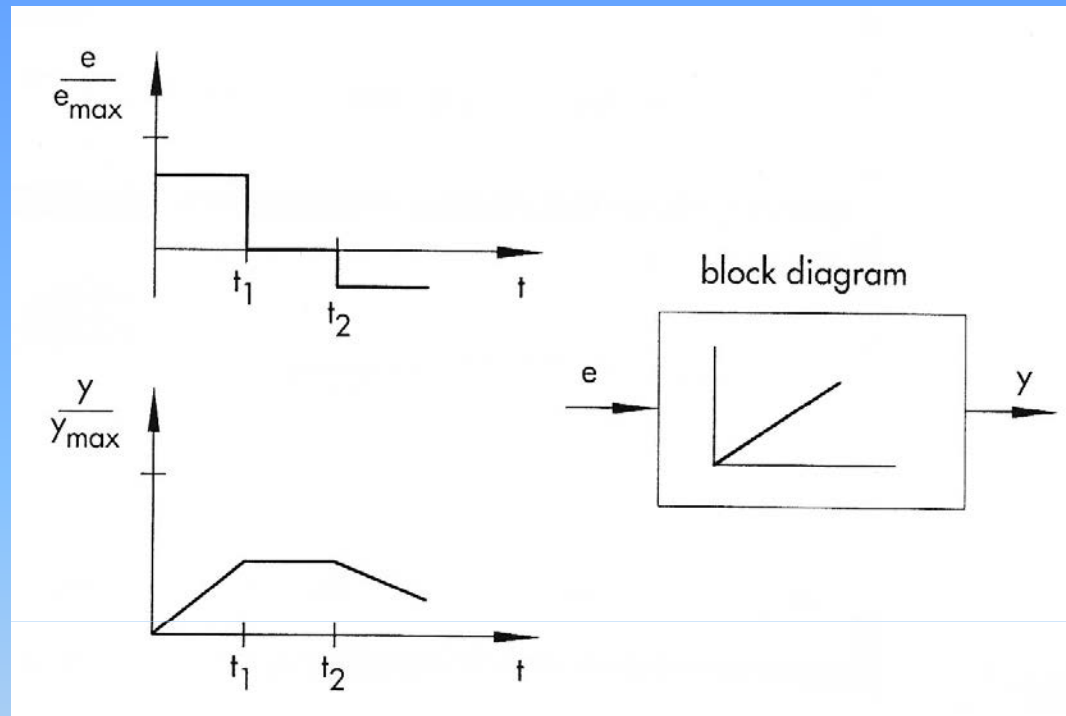
- Odnosno može se zaključiti: veći koeficijent K_i , veće integracijsko djelovanje I – regulatora
- Na slici 227. dat je primjer I-regulatora



Slika 227. I-regulator tlaka

- Izvršni element ovog regulatora je pneumatski cilindar
- Kada je signal greške jednak nuli, mlaznica zraka je usmjerena u sredinu razdjelnika zraka te se klip cilindra ne giba

- U trenutku kada vrijednost tlaka p_2 padne, mijeh pomiče mlaznicu prema gore, te zrak struji preko gornjeg dijela razdjelnika u prostor iznad klipa
- Na taj način zrak pomiče klip prema dolje što dalje dovodi do veće otvorenosti ventila koji kontrolira protok
- Ventil će se otvarati dok se ne postigne ravnoteža sila između zraka iznad i ispod klipa
- Postizanjem ravnoteže mlaznica se ponovo vraća u početno stanje tj. u sredinu razdjelnika odnosno vrijednost signala pogreške je ponovo nula
- Iako je ponovo vrijednost signala pogreške nula, ventil ostaje u novom, otvorenijem položaju
- Ako se uspoređuje dinamičko ponašanje P-regulatora i I-regulatora (slika 217. i slika 228.), može se primjetiti da upravljana veličina (procesna varijabla) y raste sporo samo u I-regulatorima, dok kod P-regulatora ona gotovo odmah postiže krajnju vrijednost
- Stoga je odgovor I-regulatora na poremećaje vrlo spor i trom, te se oni nikada sami ne koriste u sustavima regulacije

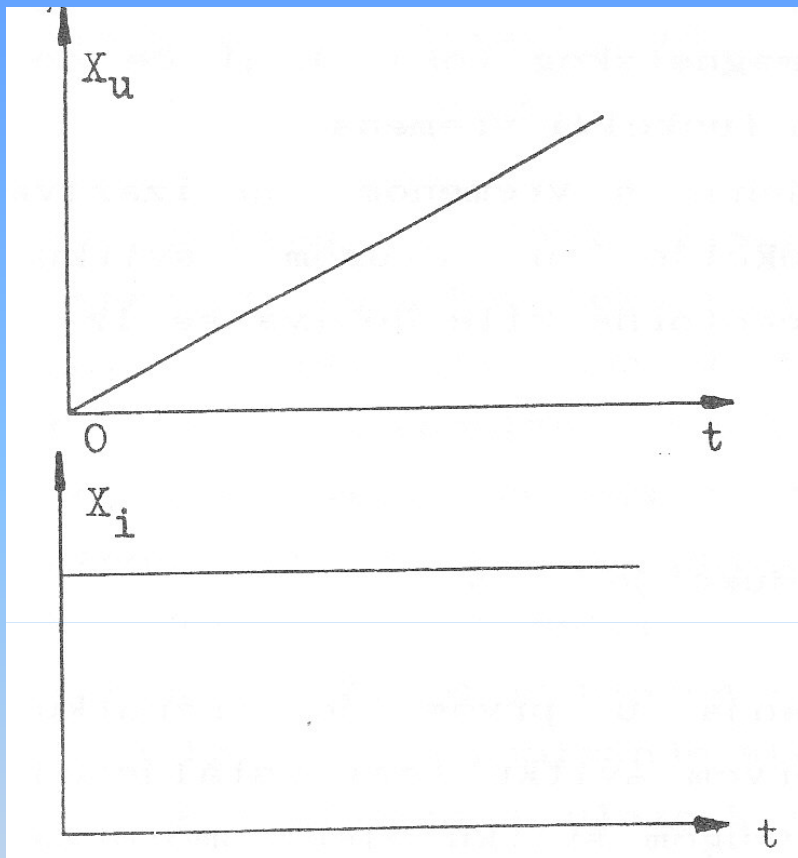


Slika 228. Dinamičko ponašanje I-regulatora (e: signal pogreške, y: izlazni signal)

- Prednosti I-regulatora je da ne postoji nikakva pogreška kod ravnotežnih stanja tj. ne javlja se statička pogreška
- Nedostaci su u tome što su spori i tromi te stoga uvijek dolaze u kombinaciji s drugim tipovima regulatora (s proporcionalnim i derivacijskim)

DERIVACIJSKA REGULACIJA

- Derivacijski regulatori generiraju izlazni signal iz promjene veličine signala greške, a ne kao P i I-regulatori samo iz amplitude (veličine) signala greške
- Glavna razlika između D-regulatora (derivacijskog) i P i I-regulatora je u tome što D-regulator uzima u obzir promjene veličine signala greške, jer regulacijski sustav mora različito reagirati na brzomjenjajuću grešku i na onu sporomjenjajuću
- Kada je signal pogreške konstantan tj. kada je u ravnotežnom stanju i ne mijenja se vrijednost tijekom određenog vremena, D-regulator ne prepoznaje takav signal pogreške i u tom slučaju izlazni signal s D-regulatora je nula
- Zbog ovoga slučaja D-regulatori nikada ne dolaze samostalno nego uvijek u kombinaciji kao PD (proporcionalno-derivacijski) ili PID (proporcionalno-integracijsko-derivacijski) regulatori
- Primjer dinamičkog ponašanja D-regulatora prikazan na slici 229.
- Primjer derivacijske regulacije može se objasniti na primjeru kočenja automobila
- Ako automobil vozi po autocesti, u trenutku kada vozač primjeti uključenje stop svjetala na autu ispred sebe, normalna reakcija će biti da pritisne papučicu kočnice (npr. snagom od 50%)



Slika 229. Dinamičko ponašanje D-regulatora

- Taj pritisak kočnice je proporcionalno djelovanje
- Nakon toga vozač promatra razdaljinu između vlastitog automobila i automobila ispred njega
- Ako je razdaljina konstantna tj. ne povećava se niti smanjuje (konstantna greška), proporcionalni odgovor je bio ispravan i nije potrebno dodatno (derivacijsko) djelovanje
- Ako se, međutim, razdaljina smanjuje velikom brzinom (velika promjene veličine signala pogreške), vozač brzo povećava pritisak na papučicu kočnice (derivacijsko djelovanje)

- Dakle proporcionalno djelovanje reagira prvo, a nakon toga derivacijsko djelovanje nadzire promjenu veličine signala pogreške
- Derivacijsko djelovanje se zbiva u trenutku promjene veličine signala pogreške

- Također derivacijsko djelovanje daje veći odgovor regulacijskog sustava prema većoj promjeni veličine signala pogreške
- Derivacijski regulatori mogu se opisati matematičkom jednadžbom:

$$y = K_D \frac{de}{dt}$$

- Gdje je K_D koeficijent derivacijskog prijenosa
- Derivacijska regulacija se ostvaruje na način da se vrijednost procesne varijable (**y**) mijenja uslijed derivacije signala pogreške (**e**) po vremenu (**t**)
- Kao što je već navedeno derivacijski regulatori najčešće dolaze u dvokomponentnoj i trokomponentnoj kombinaciji regulatora
- Najčešća dvokomponentna kombinacija regulatora je proporcionalno – derivacijski regulator (PD - regulator)

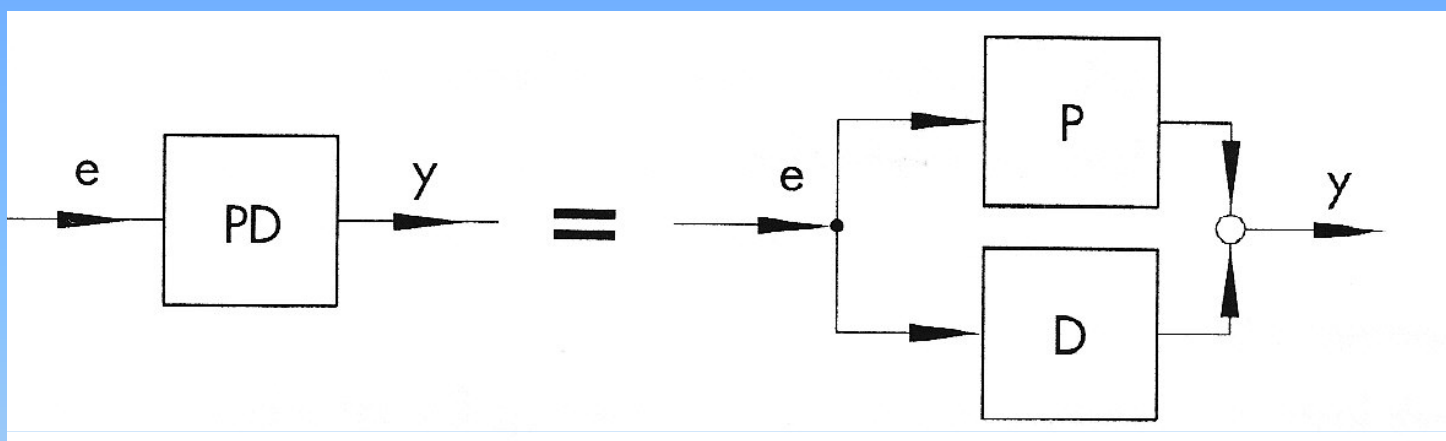
PROPORCIONALNO-DERIVACIJSKI REGULATORI

- Proporcionalno-derivacijski regulatori (PD - regualtori) dobivaju se regulacijskim djelovanjem *proporcionalnim plus derivacijskim* (P + D)
- Vrijednost izlaznog signala kod ovakvih regulatora dobiva se prema sljedećoj matematičkoj jednadžbi:

$$y = K_p \times e + K_D \frac{de}{dt}$$

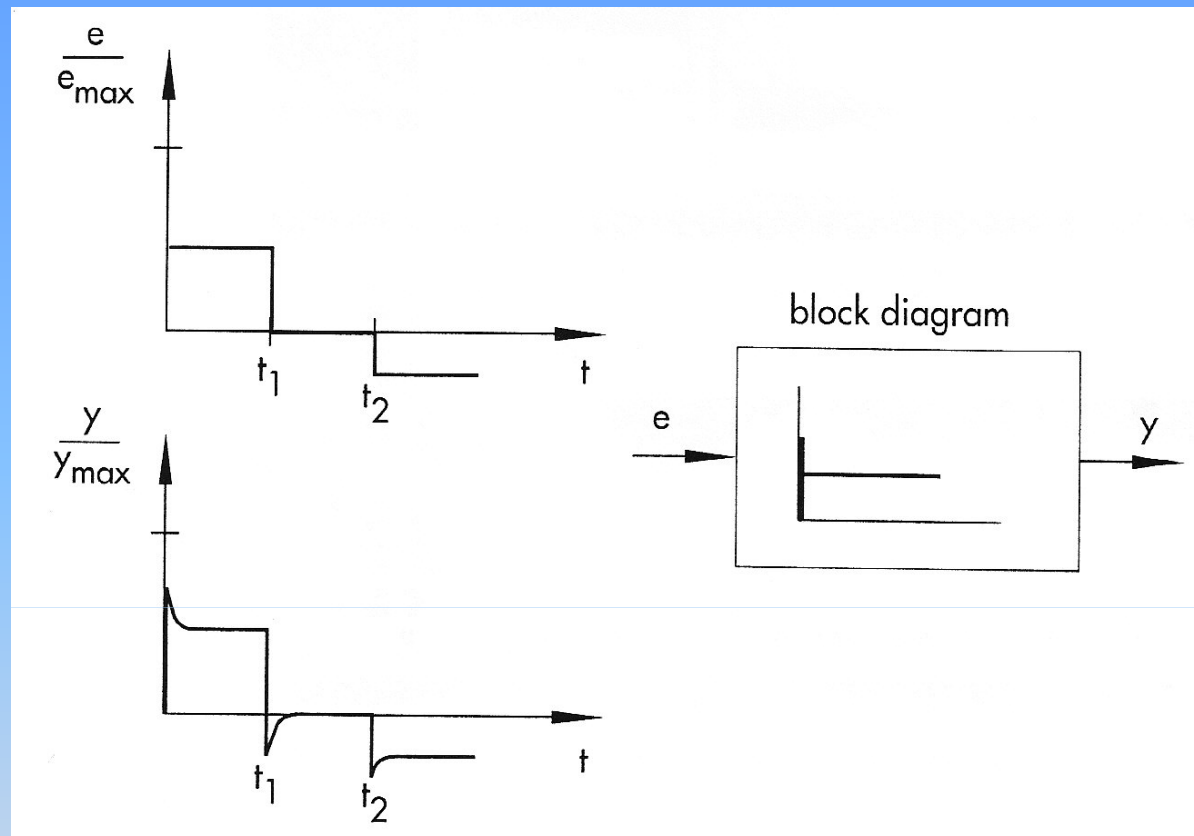
- Gdje također vrijedi da je: $K_D = K_p \times T_v$
- Faktor T_v je veličina vremena, a faktor K_D je već definirani koeficijent derivacijskog prijenosa
- Oba faktora koriste se za definiranje (mjerjenje) utjecaja D – komponente PD-regulatora
- Visoke vrijednosti ovih faktora znači da se postiže i jaka regulacijska karakteristika PD – regulatora

- Elementi PD – regulatora grafički su prikazani na slici 230. gdje se vidi njihov paralelan spoj



Slika 230. Elementi PD - regulatora

- Utjecaj D – komponente u PD – regulatoru povećava se proporcionalno povećanju vrijednosti veličine vremena T_v ili povećanju vrijednosti koeficijenta derivacijskog prijenosa K_D
- Kao što se vidi na slici 231. bilo koja promjena u vrijednosti signala pogreške (**e**) rezultira u kratkotrajnom naglom porastu (ili padu) vrijednosti procesne varijable, ali ovaj nagli puls porasta nakon vrlo kratkog vremena dolazi na stvarnu vrijednost izlaznog signala

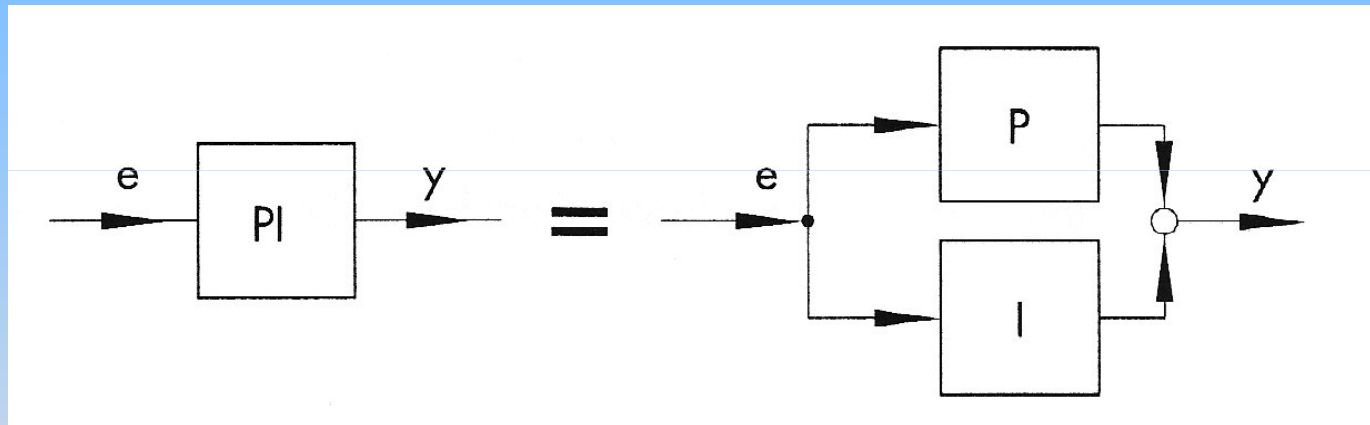


Slika 231. Dinamičko ponašanje PD – regulatora (e : signal pogreške, y : izlazni signal)

- PD – regulatori nalaze primjenu u regulacijskim sustavima gdje sam P – regulator nije dovoljan i gdje također služe da se spriječe oscilacije procesne varijable (pogotovo u slučajevima kad je koeficijent K_p visok)

PROPORCIONALNO-INTEGRACIJSKI REGULATORI

- Proporcionalno – integracijski regulatori (PI – regulatori) često se koriste u praksi i kombiniraju djelovanje proporcionalnih i integracijskih regulatora
- Kombinacija djelovanja dvaju regulatora izvodi se njihovim paralelnim spajanjem kao što je prikazano na slici 232.



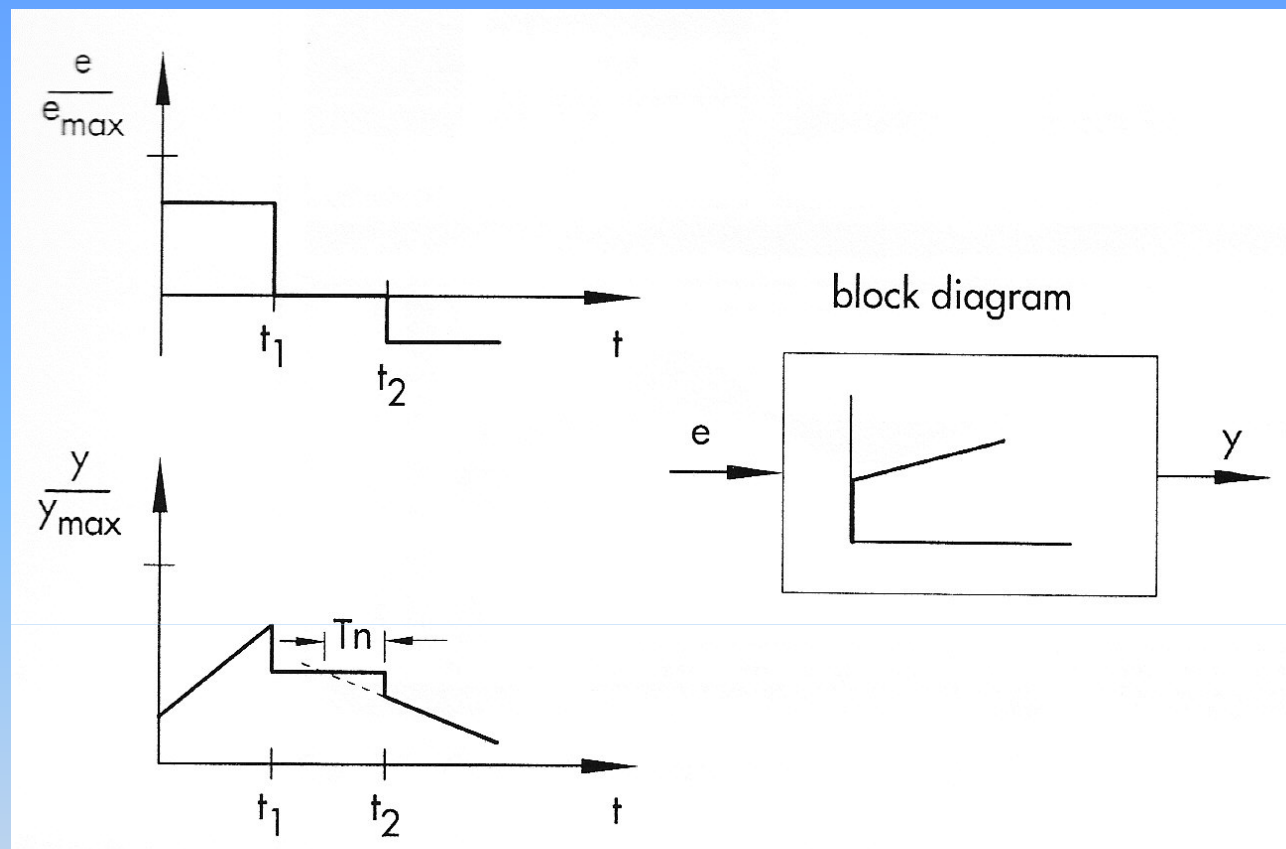
Slika 232. Elementi PI - regulatora

- Kada su ispravno dizajnirani kombiniraju prednosti oba tipa regulatora (stabilnost i brz odgovor, te nepostojanje pogreške kod ravnotežnih stanja)

- Matematička jednađba koja opisuje rad PI – regulatora glasi:

$$y = K_p \cdot e + K_i \int e dt \quad \text{with: } K_i = \frac{K_p}{T_n}$$

- Gdje je K_i koeficijent integracijskog prijenosa, a K_p proporcionalnog prijenosa
- Faktor T_n označava vrijeme koje protekne dok komponenta regulatora **I** ne generira jednaki izlazni signal kakav je već generirala **P** komponenta od početka pojave signala greške
- Kako se vidi sa slike 233. dinamičko ponašanje PI – regulatora označeno je koeficijentom proporcionalnog prijenosa K_p i faktorim T_n koji se još zove *reset vrijeme*
- Uslijed djelovanja P – komponente, izlazni signal (**y**) odmah reagira na pojavu signala pogreške (**e**), dok I – komponenta počinje djelovati tek poslije vremena T_n



Slika 233. Dinamičko ponašanje PI – regulatora (e : signal pogreške, y : izlazni signal)