

6. REGULATORI

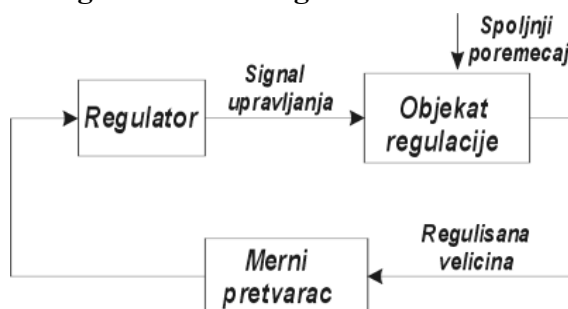
6.1. OPŠTI POJMOVI O REGULATORIMA

-Pojam regulacije

Na tok proizvodnog procesa utiču razni poremećaji i da bi se proces odvijao na unapred određen način potrebno je upravljati njime. Pod *upravljanjem* se podrazumeva skup radnji kojima se obezbeđuje željeni tok proizvodnog procesa u uslovima poremećaja. U velikom broju slučajeva u praksi tok nekog proizvodnog procesa određen je vrednošću neke fizičke veličine (temperatura u nekoj peći, visina nivoa tečnosti, ...). Zadatak upravljanja takvim procesima svodi se na održavanje vrednosti određene fizičke veličine u dozvoljenim (regularnim) granicama. Skup radnji kojima se to postigne naziva se *regulacija*. Kada se regulacija date fizičke veličine vrši automatski, pomoću određenih uređaja i mašina, radi se o *automatskoj regulaciji*. Uređaj koji obavlja taj zadatak naziva se *regulator*.

Kao što je poznato, krajnji cilj upravljanja proizvodnim procesima je neki koristan ili proizvodni rad. Taj rad obavlja mašina na koju se primenjuje upravljanje (*objekat upravljanja*). Prema tome, koristan proizvodni rad je rezultat usklađenog funkcionisanja mašine koja obavlja proizvodni proces i regulatora koji upravlja tom mašinom. Regulator i objekat upravljanja, međusobno povezani određenim funkcionalnim vezama, obrazuju funkcionalnu celinu koja se naziva *sistem automatskog upravljanja (SAU)*. Ako se radi o automatskoj regulaciji, govori se o *sistemu automatske regulacije (SAR)*.

- Uloga regulatora u regulacionom krugu



Slika 6.1.

Opšta blok-šema sistema automatske regulacije može se prikazati kao na slici 6.1. Na ovoj slici možemo uočiti da regulator, objekat regulacije i merni pretvarač, povezani međusobno odgovarajućim vezama, obrazuju zatvoren krug. Taj krug se naziva *regulacioni krug* ili *regulaciono kolo*.

Ulazni signal regulatora je izlazni signal mernog pretvarača. Pretvarač zadate vrednosti i detektor signala greške sastavni su elementi regulatora. Izlazna veličina regulatora je signal upravljanja, koji raspolaže dovoljnom snagom za pokretanje izvršnog organa objekta regulacije (regulacionog ventila, elektromotornog pogona i drugo). Na osnovu veličine i znaka signala greške, regulator proizvodi signal upravljanja, koji deluje na objekat regulacije u smeru smanjenja odstupanja njegove izlazne veličine od zadate vrednosti.

Uloga regulatora u regulacionom krugu je da na temelju odstupanja stvarne od željene vrednosti regulisane veličine, daje na svom izlazu, odnosno ulazu izvršnog organa objekta regulacije, takvu vrstu i vrednost signala koji će izvršni organ pokretati određenom brzinom i u određenom smeru.

-Karakteristične veličine

Signal upravljanja se, kod sistema automatske regulacije, naziva još i *regulaciona veličina*, a izlazna veličina objekta regulacije *regulisana veličina*.

Razlika između stvarne i zadate vrednosti regulisane veličine naziva se *regulaciono odstupanje*. Ono se izražava u procentima zadate vrednosti regulisane veličine:

$$\varepsilon = \frac{R - X}{R} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

gde je:

R — zadata vrednost (vrednost koju želimo da ima regulisana veličina), a

X — stvarna vrednost regulisane veličine $x(t)$.

Informacija o regulacionom odstupanju ε u celini je sadržana u signalu greške $e(t)$ (izlaznom signalu detektora signala greške), pa se veličina signala greške $e(t)$ uzima kao mera za određivanje regulacionog odstupanja ε .

Za razliku od regulacionog odstupanja, *dozvoljeno odstupanje* je maksimalno odstupanje merene veličine od zadate vrednosti za koju regulator još uvek ne reaguje. Tek kada razlika između stvarne i zadate vrednosti regulisane veličine postane veća od toga, regulator će početi da vrši regulaciju.

Ono što karakteriše regulatore su još i statičke i dinamičke karakteristike. *Statička karakteristika* regulatora predstavlja grafički prikazanu zavisnost izlazne veličine regulatora od njegove ulazne veličine i to u ustaljenom stanju. Za razliku od toga, *dinamička karakteristika* predstavlja zavisnost izlaza od ulaza regulatora u prelaznom periodu – kada regulator prelazi iz jednog stanja u neko drugo, dok se to drugo stanje ne ustali.

8.2 Klasifikacija regulatora

Regulatori se s obzirom na korištenje energije dele na dve osnovne vrste i to na:

-regulatore sa izvorom pomoćne energije, i

-regulatore bez izvora pomoćne energije.

Regulatori bez izvora pomoćne energije deluju na temelju trošenja energije signala regulisanih veličina i nemaju posebnih izvora za napajanje. Tako, na primer, deluju bimetalni regulatori i regulatori nivoa s plovkom.

Regulatori s izvorom pomoćne energije su oni regulatori koji troše pomoćnu energiju nekog izvora napajanja, i koji se za složenije primere regulacije skoro redovno primenjuju. To su najčešće regulatori s električnom, hidrauličnom i pneumatskom energijom.

Velika je raznolikost dinamičkih procesa kod pojedinih objekata regulacije, pa je i veliki broj raznih vrsta regulatora. Iz mnoštva raznih klasifikacija regulatora mogu se izdvojiti dve kao najopštije:

1) klasifikacija prema obliku statičkih karakteristika i

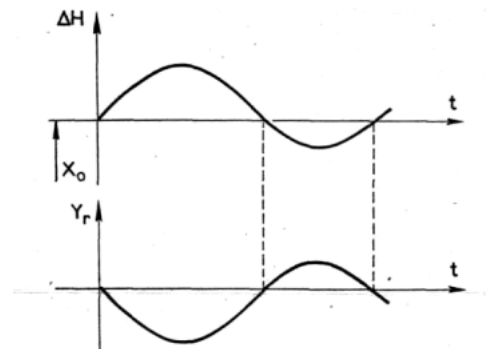
2) klasifikacija prema dinamičkim procesima u regulatoru.

Prema obliku statičkih karakteristika regulatori se dele na dve opšte klase: linearne i nelinearne regulatore, a prema karakteru dinamičkih procesa na kontinualne i diskontinualne (nekontinualne) regulatore.

U toku tehnološkog procesa merni element kontinualno (stalno) snima vrednost regulisane veličine. Upravljački signal za korekciju procesa, odnosno za održavanje zadate vrednosti regulisane veličine, takođe će imati kontinualni karakter. Sam proces regulisanja, odnosno regulaciono dejstvo izazvano signalima za upravljanje, može biti kontinualno ili diskretno. Ovo zavisi od konstrukcije i principa rada regulatora, pa se, zavisno od toga, regulacioni sistemi dele na sisteme sa kontinualnim i diskretnim regulisanjem.

Kod sistema sa *kontinualnim regulisanjem* ne samo što merni element obavlja kontinualno snimanje (praćenje) regulisane veličine nego je i samo regulisanje kontinualno. Drugim rečima, vrši se kontinualno podešavanje regulacionog organa prema zahtevima mernog elementa. To znači da promene parametara koji se kontrolišu, odnosno promene signala za upravljanje stalno prate odgovarajuće promene mehaničkih, električnih i drugih veličina u celom sistemu. Otuda svi elementi neprekidno deluju jedan za drugim u obliku neprekidne funkcije.

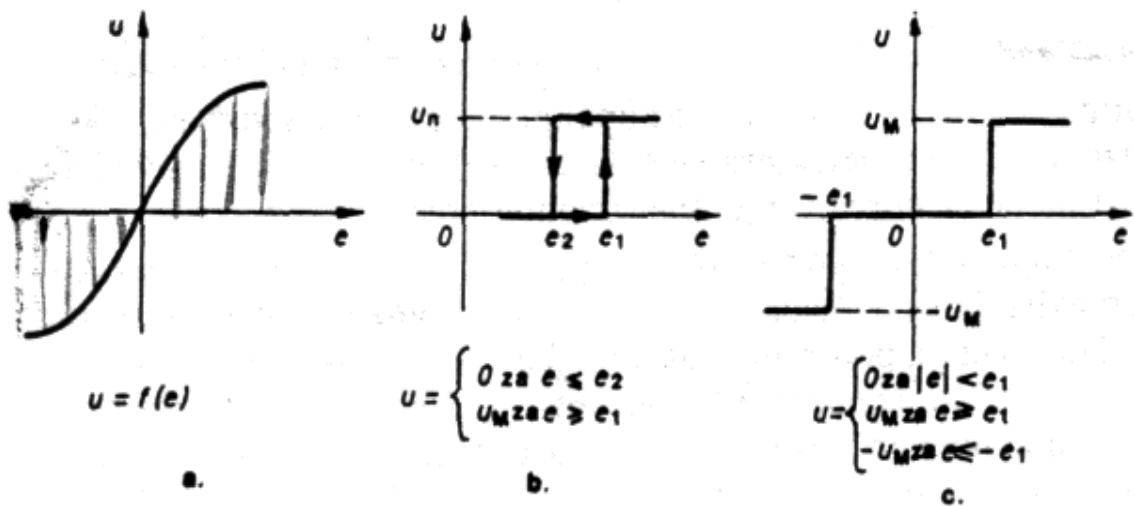
Na primer, ako se snimaju odstupanja nivoa vode u nekom rezervoaru od nultog nivoa i ako se ta odstupanja unose u dijagram H-t (veličina odstupanja - vreme), dobiće se neka kriva linija, kao na slici 6.2. Promene položaja zasuna (regulacioni organ), koji se otvara u određenom procentu i propušta manje ili više vode, na isti način se predstavljaju krivom (donja kriva na slici 6.2).



Slika 6.2 Promene veličina pri kontinualnom regulisanju

Kod sistema sa *diskontinualnim regulisanjem* merni element kontinualno snima regulisanu veličinu, ali regulisanje nije kontinualno, odnosno ne vrši se stalno podešavanje regulacionog organa u zavisnost od signala mernog elementa.

Kod *kontinualnih regulatora* matematička zavisnost regulacione veličine od signala greške ima oblik kontinualne funkcije (neprekidna funkcija, funkcija bez prekida) (slika 6.3 a). Kod *diskontinualnih regulatora* regulaciona veličina može imati dve, ili najviše tri, vrednosti za razne vrednosti signala greške. Pri promeni vrednosti signala greške vrednost regulacione veličine menja se skokovito sa jedne na drugu vrednost. Matematička zavisnost regulacione veličine od signala greške ima oblik diskontinualne (prekidne) funkcije (slika 6.3b i c).



Slika 6.3

6.3. Diskontinualni regulatori (Regulatori s nekontinualnim delovanjem)

U današnje se vreme sve češće koriste regulatori s nekontinualnim delovanjem, od kojih su najpoznatiji dvopoložajni, tropoložajni i impulsni regulatori. Pojedine vrednosti regulacione veličine kod ovih regulatora nastaju tako što se, pod dejstvom pojačanog signala greške, izvršni element regulatora postavlja u jedan od moguća dva ili tri položaja. Takvi regulatori pokreću izvršne organe u impulsima. Time se u mnogim slučajevima postižu jednostavnije izvedbe sistema za regulisanje i poboljšava kvalitet regulacije.

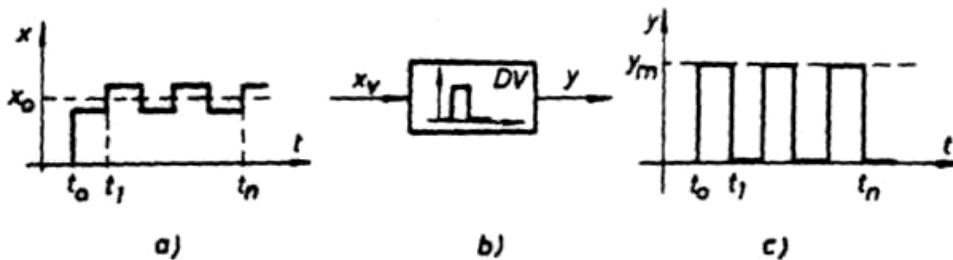
6.3.1 Dvopoložajni regulatori

Naziv ovih regulatora potiče od položaja (stanja) njihovog izvršnog dela i to od dva krajnja položaja: "uključeno" i "isključeno".

Idealnu karakteristiku takvog regulatora pokazuje slika 6.4. Na ovoj karakteristici se vidi da će kod odstupanja regulisane veličine x na vrednost višu od vrednosti x_0 , vrednost regulisane veličine y pasti na nulu (0), a kod odstupanja regulisane veličine na vrednost nižu od x_0 , vrednost regulisane veličine porasti na maksimalnu vrednost (y_m).

Pažljivijim posmatranjem prelazne karakteristike ovog regulatora vidi se, da se ovde izlazna veličina menja skokovito, odnosno proporcionalno promenama ulazne veličine. Ovo se vidi na ulaznim (a), izlaznim (c) i blok-šemom koja simbolički pokazuje dvopoložajne DV regulatore (b).

Slika 6.4.

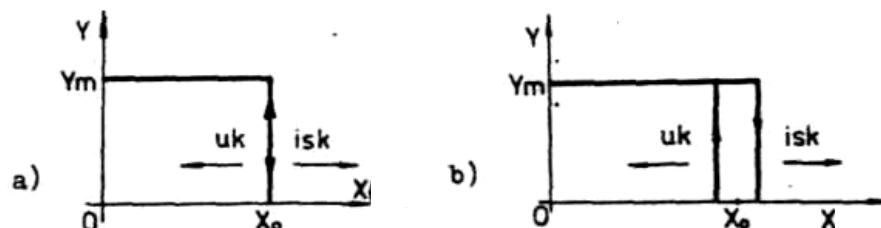


Statičke karakteristike dvopoložajnih regulatora pokazane su na slici 6.5.

Na slici 6.5.a prikazana je idealizovana statička karakteristika dvopoložajnog regulatora – dvopoložajni regulator bez histereze. Ovde se vidi karakteristika regulisanja temperature dvopoložajnim regulatorom, na primer regulisanja temperature električnog grijača, pegle ili grijača vode u električnom bojleru. Takav, idealizovani regulator radi kao veoma osetljiva sklopka, koja kod minimalnog prekoračenja zadate temperature (x_0) grijač isključuje i uključuje ga ponovno na maksimalnu snagu grijanja (Y_m), kod minimalnog smanjenja temperature ispod zadate vrednosti. Tako je dvopoložajni regulator temperature u posmatranom slučaju idealan preklopnik sa statičkom karakteristikom bez histereze.

Stvarni izgled statičke karakteristike dvopoložajnog regulatora pokazan je na slici 6.5b.

Slika 6.5.

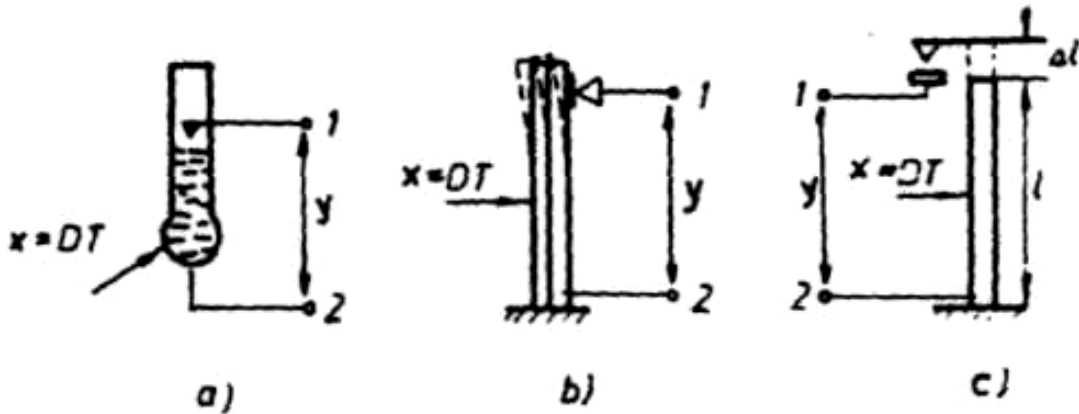


Ovde se vidi da uključivanje regulisane veličine na maksimalnu vrednost grijanja nastupa kod vrednosti nešto nižih, a njeno isključivanje kod vrednosti nešto viših od vrednosti x_0 .

Ovi se odnosi mogu još pobliže objasniti na jednostavnim primerima dvopoložajnih regulatora sa slike 6.6. Na slici 6.6a se vidi jednostavna izvedba regulatora s kontaktnim živinim termometrom, koji deluje na taj način da kod postignute željene vrednosti regulisane temperature (DT) spaja kontakte izvoda regulatora i na taj način omogućava (preko sporednih kontakata 1 i 2) isključivanje grijača, koji izaziva ovaj porast temperature ($DT=x$), i promenu izlazne veličine $y=h$.

Na slikama 6.6b i c vide se dve izvedbe regulatora: regulator s lisnatom bimetalnom trakom i štapnog bimetalnog regulatora, kod kojeg se s promenom temperature menja dužina štapa sa početne dužine l na vrednost $l+dl$, te tako otvaraju kontakti 1 i 2 kruga grejanja.

Slika 6.6.

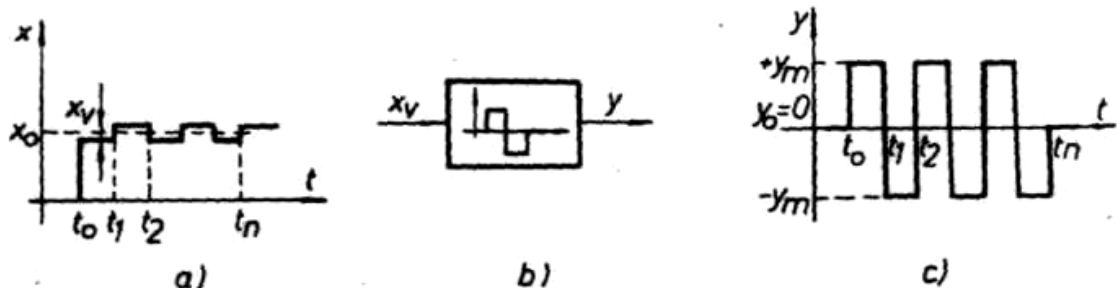


Osim ovih izvedbi regulatora temperature, veoma se često primenjuju i dvopoložajni regulatori nivoa s plovkom, regulatori pritiska gasova i tečnosti s kontaktnim manometrima. Dvopoložajni se regulatori veoma često primenjuju i kao sklopovi za blokiranje i signalizatori krajnjih i kritičnih ili opasnih stanja merenih i kontrolisanih veličina procesa.

6.3.2. Tropoložajni regulatori

Naziv ovih regulatora, kao kod dvopoložajnih regulatora, potiče od položaja (stanja) njihovih izvršnih delova.

Slika 6.7.



Na slici 6.7a je pokazan oblik ulaznog signala, kojem se vrednost menja tako da je od trenutka t_0 do t_1 , $x=x_0-x_v$, a od trenutka t_1 do t_2 , $x=x_0+x_v$, itd.

što je ustvari jednako kao i kod ulaznog signala opisanog dvopoložajnog regulatora.

Izlazni je signal kod ovog regulatora, međutim, znatno drugačiji i ima tri osnovne vrednosti (slika 6.7c):

- $y=0$, za vrednosti $x = x_0$,
- $y=+y_m$, za vrednosti $x = x_0-x_v$
- $y=-y_m$, za vrednosti $x = x_0+x_v$.

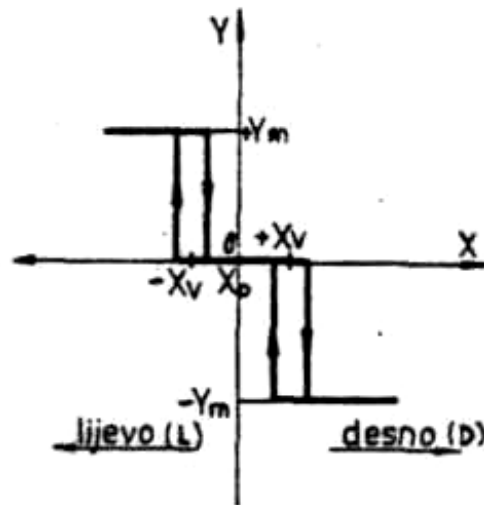
Vrednost izlazne veličine $y=0$, ovaj regulator postize u isključenom stanju (vreme prije t_0), i u vreme kad je postignuta jednakost stvarne i željene vrednosti regulisane veličine ($x=x_0$), odnosno kad ne postoji nikakvo regulaciono odstupanje (od trenutka t_n pa dalje).

Na slici je pokazan slučaj koji se i u stvarnosti najčešće susreće, kad je ugođenost regulaconog sistema uz proces takva, da se približavanje stvarne vrednosti regulisane veličine njenoj željenoj vrednosti izvodi nakon nekoliko prelaza $+Y_m, -Y_m, +Y_m, Y_0$. Nakon toga se proces regulisanja smiruje sve do nastupa novog poremećaja vrednosti regulisane veličine. Trajanje (širina) i period ponavljanja impulsa kod ovih regulatora mogu biti stalni ili da zavise od vrednosti regulaconog odstupanja.

Ovakav proces regulacije odvija se kod klimatizacije prostorija, kad na primer, kod održavanja određene temperature, regulacioni sistem osim grijanja uključuje i hlađenje ili ventilaciju. Time se postiže znatno veća tačnost regulacije.

Statička karakteristika ovakvih regulatora pokazana je na slici 6.8.

Slika 6.8.

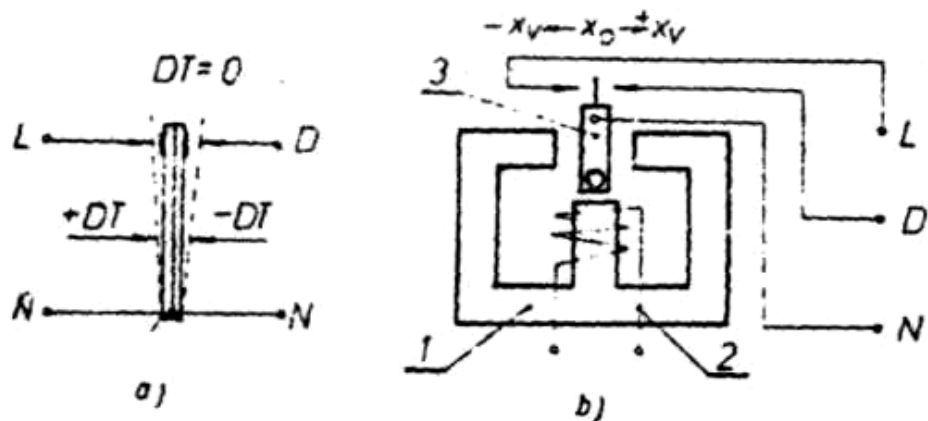


Ovo je karakteristika s mrtvim pojasom i histerezom i na njoj su označena bitna svojstva ovih regulatora.

Zbog toga što se izvršni organ objekta regulacije kreće najvećom mogućom brzinom, pri smanjenju regulacionog odstupanja na dozvoljenu vrednost izvršni organ se usled inercije ne može zaustaviti u trenutku kad napon napajanja padne na nulu, već će se kretati još izvesno vreme. Da ne bi došlo do pojave regulacionog odstupanja u suprotnom smeru i, usled toga, do čestog aktiviranja izvršnog organa čas u jednom čas u drugom smeru, mora se predvideti izvesna zona neosetljivosti regulatora (mrtva zona). Usled te zone neosetljivosti postoji statička greška, sa kojom regulator održava regulisanu veličinu na zadatoj vrednosti.

Neki primeri izvedbi tropoložajnih regulatora pokazani su na slici 6.9.

Slika 6.9.



Na slici 6.9a je prikazan najjednostavniji tropoložajni regulator, regulator s bimetalnom trakom. Osnovni, nulti ($y_0=0$), položaj izlaznih delova ovog regulatora postiže se kod referentne temperature, gde je njeno odstupanje od željene vrednosti jednako nuli ($DT=0$). Kod smanjenja temperature ispod željene vrednosti ($-DT$) traka se savija udesno i spaja kontakte za pripadni krug N-D. Kod povišenja temperature iznad željene vrednosti ($+DT$) traka se savija ulevo i spaja kontakte za suprotni pripadni krug N-L.

Jednako deluje i polarizovani relej (slika 6.9b), koji se sastoji od magnetskog jezgra 1, kalema 2 i polarizovane kotve 3, koja zavisno od regulacionog odstupanja x_r preklapa kontakte za smerove L i D.

Upotreba ovih regulatora je veoma česta i u poslednje vreme proširena na veoma veliki dio osnovnih vrsta procesa.

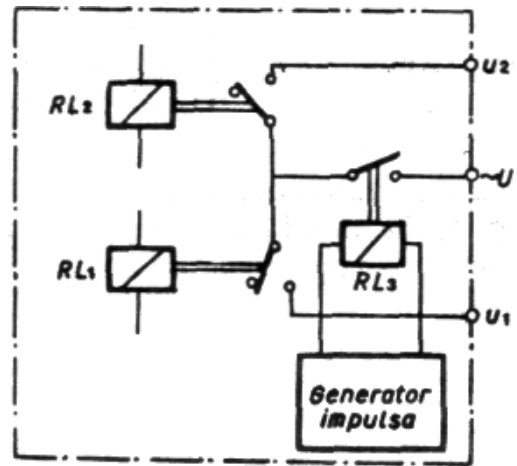
6.3.3. Impulsni regulatori

Impulsni regulatori su jedna vrsta diskontinualnih regulatora, koji objedinjuju dobre osobine diskontinualnih i kontinualnih regulatora. Kod impulsnih regulatora aktiviranje izvršnog organa je kratkotrajno (impulsno), pa je manja mogućnost da regulisana veličina premaši zadatu vrednost usled inercije izvršnog organa. S druge strane, amplituda signala upravljanja je konstantna kako pri velikim, tako i pri malim vrednostima regulacionog odstupanja. Na taj način signal upravljanja raspolaže dovoljnom snagom za pokretanje izvršnog organa, sve dok se regulaciono odstupanje amplituda signala upravljanja se smanjuje sa smanjenjem regulacionog odstupanja. Pri malim vrednostima regulacionog odstupanja njegova snaga može biti nedovoljna za pokretanje izvršnog organa. To ima za posledicu određenu statičku grešku sistema automatske regulacije.

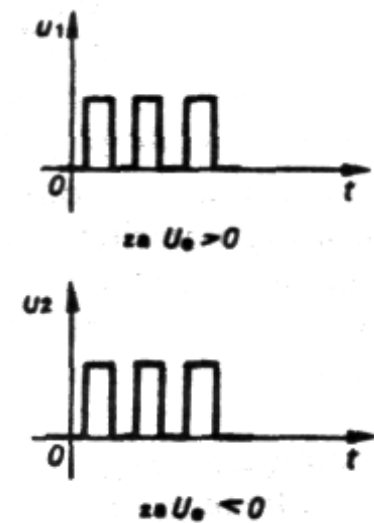
U daljem tekstu će delovanje impulsnih regulatora biti pobliže objašnjeno na jednostavnom primeru. Neće se ulaziti u detalje od čega se sastoji ceo impulsni regulator, već će naglasak biti samo na onom delu regulatora koji je bitan za razumevanje principa rada impulsnih regulatora.

Među elementima od kojih se sastoji ulazni deo regulatora neka se nalaze releji RL_1 i RL_2 koji se nalaze u mirnom stanju, tj. sa otvorenim kontaktima, kada je signal greške (U_e) jednak nuli, a kada je signal greške različit od nule kontakti ovih releja su zatvoreni. U izlaznom delu impulsnog regulatora postoji generator impulsa, koji pobuđuje relej RL_3 (slika 6.10). Ovaj relej, svojim kontaktima, periodično uključuje i isključuje napon napajanja izvršnog elementa sistema automatske regulacije. Na taj način se dobija prenosna karakteristika regulatora koja ima grafički oblik kao na slici 6.11.

Impulsni regulatori su posebno podesni za regulaciju proizvodnih procesa kod kojih postoji i veliko kašnjenje promene regulisane veličine u odnosu na promene regulacionog delovanja. Tako, na primer, nivo vode u bazenu za prečišćavanje se mnogo sporije menja od promena položaja regulacionog ventila. Kada



Slika 6.10



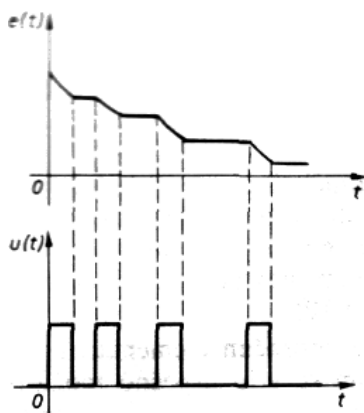
Slika 6.11

nivo vode poraste iznad zadanog, nastaje signal greške koji će proizvesti otvaranje regulacionog ventila. To, dalje, izaziva povećanje protoka vode. Da bi se nivo promenio, potrebno je da istekne određena količina vode, a za to je potrebno da prođe određeno vreme. Zbog toga se pokretački organ regulacionog ventila (elektromotor ili pneumatski cilindar) pobuđuje impulsno. Time se on pokreće korak po korak. Vreme između dva impulsa se podešava prema vremenu kašnjenja promene nivoa. Ako za to vreme nivo ne opadne na zadanu vrednost, signal greške će proizvesti još jedan impuls. Kada nivo, za vreme pauze između dva impulsa, dostigne zadanu vrednost, signal greške postaje jednak nuli. Releji RL_1 prelazi u mirni položaj. Njegov kontakt prekida kolo napajanja izvršnog organa sistema, bez obzira na periodično zatvaranje i otvaranje kontakta releja RL_3 .

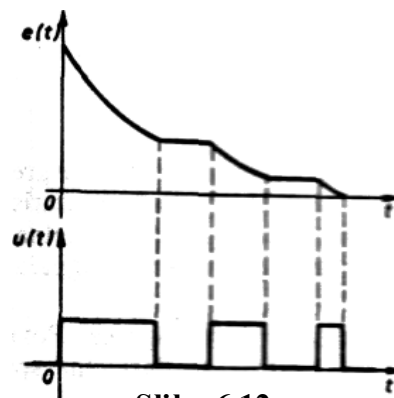
Dinamika regulacionog procesa je slična i kod sistema za regulaciju temperature pomoću radijatora ili izmenjivača toplote sa vodom. Da bi temperatura neke sredine porasla na određenu vrednost, potrebno je uneti u tu sredinu određenu količinu toplote, a za to je potrebno određeno vreme.

Impulsni regulatori sa konstantnim vremenom trajanja impulsa i konstantnom pauzom između njih su relativno spori. Da bi se proces regulacije ubrzao, primenjuje se modulacija impulsa impulsnog generatora. Najčešće su sledeće dve vrste modulacije: modulacija po vremenu trajanja impulsa i modulacija po dužini pauze između impulsa.

Modulacija po vremenu trajanja impulsa znači da vreme trajanja impulsa nije konstantno, već zavisi od veličine regulacionog odstupanja. Što je regulaciono odstupanje veće, vreme trajanja impulsa je duže. Time regulacioni organ ostaje duže aktivan, pa se brže smanjuje regulaciono odstupanje. Kako se regulaciono odstupanje smanjuje, trajanje impulsa je sve kraće. Time se sprečava mogućnost da regulisana veličina premaši zadanu vrednost. Na slici 6.12 prikazana je zavisnost vremena trajanja impulsa od veličine signala greške za slučaj modulacije po vremenu trajanja impulsa.



Slika 6.13



Slika 6.12

Modulacija po dužini pauze između impulsa sastoji se u tome da je vreme trajanja impulsa konstantno, a vreme pauze između dva impulsa se menja obrnuto srazmerno veličini regulacionog odstupanja. Kada je vrednost regulacionog odstupanja velika, impulsi su češći, tako da se izvršni organ češće aktivira i, na taj način, brže smanjuje regulaciono odstupanje. Kako se regulaciono odstupanje smanjuje impulsi su sve ređi i, kad postane jednako nuli, impulsi nestaju. Na slici 6.13 prikazana je zavisnost dužine pauze između impulsa od veličine regulacionog odstupanja.

6.4. Kontinualni regulatori

6.4.1 Opšte karakteristike i klasifikacija

Ima tehnoloških procesa kod kojih skokovite (diskontinualne) promene regulisane veličine pogoršavaju kvalitet proizvodnog procesa. Tako, na primer, kod parnih kotlova na tečno gorivo regulacija odnosa tečnog goriva i vazduha u smeši za sagorevanje mora biti kontinualna, jer gorivo i vazduh kontinualno dotiču u plamenik, gde se mešaju i dobijena smeša ubrizgava u ložište u kome sagoreva. Isto tako, kod alatnih mašina za konturnu obradu mašinskih delova, rezni alat ne sme da se kreće skokovito u odnosu na predmet koji se obrađuje, jer bi došlo do lomljenja reznog alata.

Regulator je uređaj ili skup uređaja kojim se postiže automatsko regulisanje fizičkih veličina (automatska regulacija). Regulator formira upravljački signal na objekat upravljanja na osnovu informacije o odstupanju regulisane veličina od njene zadate vrednosti.

Zaključujemo da na ulaz regulatora deluju dve veličine, stvarna i zadata, a na izlazu se dobija upravljačka veličina.

Kontinualnim regulatorima se nazivaju regulatori kod kojih je signal upravljanja kontinualna (neprekidna) funkcija signala greške. Ovi regulatori na svako odstupanje regulisane veličine od njene željene vrednosti reaguju tako, da proizvode kontinualne signale, koje pojačavaju i pomoću njih izvode pomeraje izvršnih organa sve dotle, dok regulisanu veličinu ne stabilišu na željenoj vrijednosti. Drugim rečima kontinualni regulatori su regulatori u užem smislu koji proizvode kontinualne signale, koji pojačani izvode pomeraj izvršnih uređaja sve dok postoji odstupanje regulisane veličine o njene željene vrednosti. S obzirom na karakter dejstva dele se na:

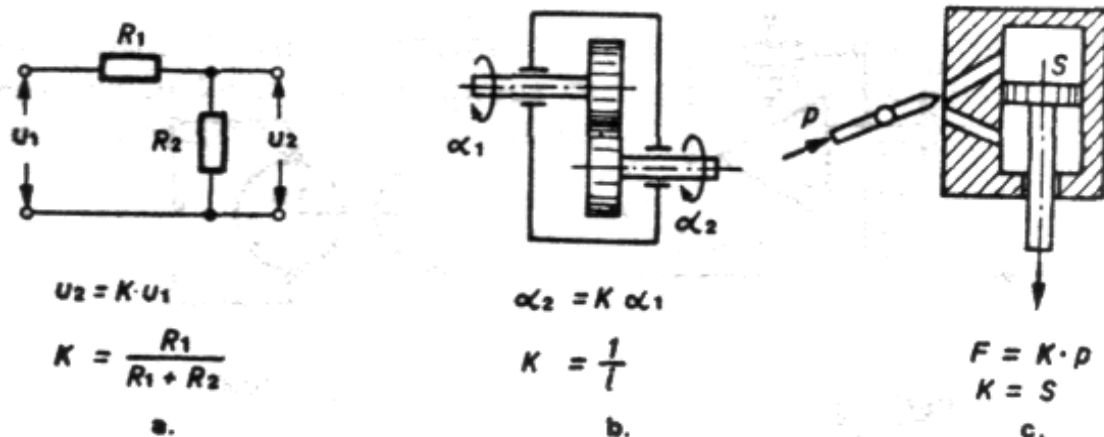
- Proporcionalne (P) regulatore
- Integralne (I) regulatore
- Diferencijalne (D) regulatore
- Kombinovane (PI, PD i PID) regulatore

6.4.2 Proporcionalni (P) regulator

Kontinualni regulatori kod kojih je regulaciono delovanje (signal upravljanja), kao funkcija vremena, srazmerno signalu greške posmatranom kao funkcija vremena:

$$u(t) = K_p \epsilon(t) \quad (6.2)$$

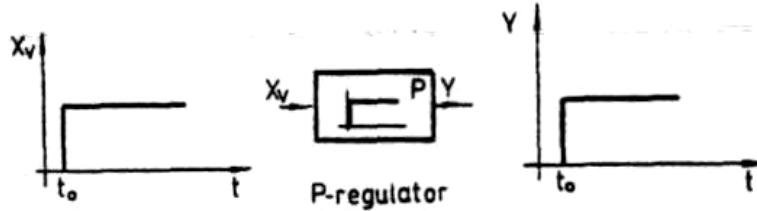
nazivaju se proporcionalni regulatori ili, skraćeno, P-regulatori. Konstanta K_p naziva se konstanta proporcionalnog delovanja ili pojačanje. Na slici 6.14 prikazani su neki primeri fizičkih elemenata koji imaju osobinu proporcionalnog delovanja.



Slika 6.14

Za proporcionalne je regulatore karakteristično da deluju trenutno i najvećom raspoloživom snagom. Ta osobina rezultira netačnošću delovanja i stalnim ostavljanjem određenog regulacionog odstupanja. To je odstupanje obrnuto pojačanju regulatora, i čim je pojačanje regulatora veće regulaciono je odstupanje manje. Pojačanje, međutim, ne smije biti ni preveliko jer se može pojaviti nestabilnost delovanja regulacionog sistema.

Na slici 6.15 pokazano je simboličko prikazivanje P-regulatora s ulaznim i izlaznim signalima prelaznih karakteristika.

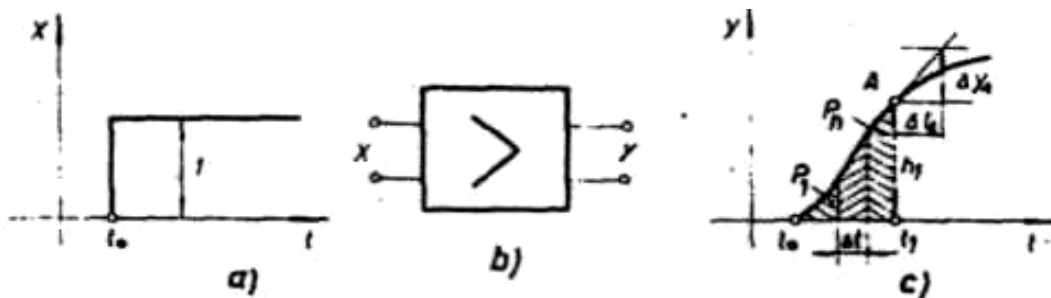


Slika 6.15

Osnovna karakteristična veličina proporcionalnog regulatora je proporcionalno područje X_p . Ovo područje predstavlja vrednost promene regulisane veličine (x), potrebne za pomak izvršnog organa iz jednog u drugi krajnji položaj, odnosno za celo radno područje (Y_p). Najvažnija veličina koja karakteriše P-regulatore je opisano proporcionalno područje.

6.4.3. Regulatori s integralnim dejstvom ili I-regulatori

Bliže fizičko i matematičko objašnjenje integralnog (I) dejstva može se pokazati pomoću slike 6.16.



Slika 6.16

Neka dio regulacionog kola pobuđen signalom x skokovitog oblika (slika 6.16a) daje na izlazu odziv pokazan karakteristikom $y=f[x(t)]$. Takav dio, prikazan blok šemom (slika 6.16b), može biti mehanički ili električni, na primjer pojačavač čiji je izlazni signal električna snaga $y=P_{el}=f(t)$ (slika 6.16c).

Integralno dejstvo u tački t_1 jednako je ukupnoj površini koju kriva $y=f[x(t)]$ zatvara sa t-osom od trenutka t_0 do t_1 . Ova se površina može dobiti integraljenjem (sabiranjem) malih površina p_1, \dots, p_n odnosno sumom

$$Y_I = K \sum_{i=1}^n x_i \cdot dt_i = K \cdot (x_1(t_1 - t_0) + x_2(t_2 - t_1) + x_3(t_3 - t_2) + \dots) \quad (6.3)$$

gde je K pojačanje tog dela regulacionog kola, $i=1 \dots i=n$ broj elementarnih površina P , x_i pripadne vrednosti izlazne veličine i dt_i odgovarajući intervali na vremenskoj osi ($dt_i=t_i-t_{i-1}$).

(Jednačina 6.3 se čita na sledeći način: Y_I je jednako K puta suma proizvoda x_i i dt_i gde i ide od 1 do n .)

Ako su vremenski intervali između kojih se izračunavaju te površine jako jako mali onda važi

$$Y_I = K \int_{t_0}^t x(t) dt \quad (6.4)$$

Kako je već ranije spomenuto, integraljenje u matematici znači sabiranje veoma (beskonačno) malenih veličina u konačnu sumu.

Kontinualni regulatori kod kojih je regulaciono delovanje (signal upravljanja) srazmerno integralu signala greške nazivaju se *regulatori sa integralnim dejstvom* ili skraćeno *I-regulatori*. Drugim rečima, signal upravljanja je srazmeran površini koju signal greške zaklapa sa vremenskom osom od početka delovanja pa do trenutka posmatranja.

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (6.5)$$

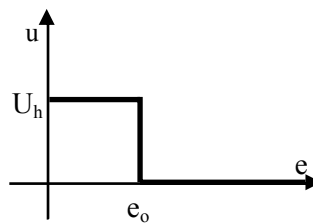
Gde su: t – vreme delovanja ulaznog signala i $e(t)$ - signal greške u trenutku t ,

Karakteristične veličine integralnog (I) regulatora su:

Izvršno područje U_h - maksimalna promena izlazne veličine I-regulatora.

K_I – pojačanje I regulatora

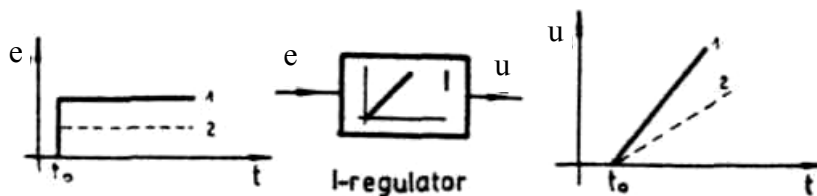
T_I – integraciona vremenska konstanta



Slika 6.17.

Statička se karakteristika I-regulatora može pokazati na pojednostavljen i idealizovan način kao na slici 6.17. Prema njoj se u izvršnom području U_h , sve moguće promene regulacionog odstupanja e uvek svedu na nulu i tako se, bez ikakve greške regulacije, regulisana veličina održava na njenoj željenoj vrednosti x_0 .

Prelazna karakteristika ovog regulatora pokazana je na slici 6.18.



Slika 6.18.

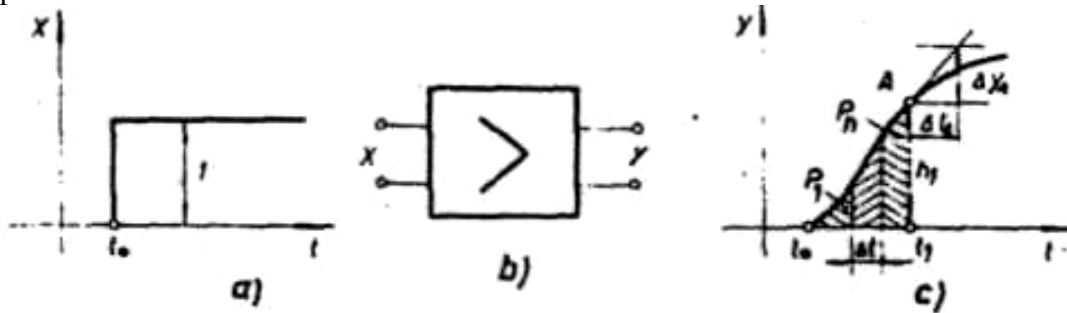
Ovde je ucrtan skokoviti oblik ulaznog signala, simbolična blok-šema i oblik izlazne karakteristike. Prelazne su karakteristike pokazane za dva slučaja vrednosti ulaznih signala. Iz slike se vidi da I-regulator deluje tako da na primer na dvostruko veći ulazni signal daje dvostruko brži porast izlaznog signala. Porast izlaznog signala je tako kod ovog regulatora funkcija vrednosti promene ulaznog signala.

Osobitosti delovanja I-regulatora mogu se najbolje objasniti pomoću statičkih i prelaznih karakteristika. Iz statičkih se karakteristika vidi da I-regulatori ne ostavljaju nikakva regulaciona odstupanja, odnosno da deluju maksimalno tačno. Iz prelaznih se karakteristika vidi i da su ovi regulatori spori i da brzina njihovog delovanja zavisi od vrednosti regulacionog odstupanja. To su dve najvažnije osobine I-regulatora.

Primer integralnog delovanja ima veoma mnogo. To su: punjenje električnog kondenzatora, rezervoara krutim ili tekućim materijalima, sumiranje električne energije brojilima, sumiranje pređenog puta, ukupnog vremena rada itd.

6.4.4.) Regulatori sa diferencijalnim dejstvom

Bliže fizičko i matematičko objašnjenje diferencijalnog (D) dejstva može se pokazati pomoću slike 6.19.



Slika 6.19

Neka dio regulacionog kola pobuđen signalom x skokovitog oblika (slika 6.19a) daje na izlazu odziv pokazan karakteristikom $y=f[x(t)]$. Takav dio, prikazan blok šemom (slika 6.19b), može biti mehanički ili električni, na primer pojačavač čiji je izlazni signal električna snaga $y=P_{el}=f(t)$ (slika 6.19c).

Diferencijalno dejstvo u trenutku t_1 predstavlja nagib tangente na krivu $y=f[x(t_1)]$ u tački t_1 . Taj je nagib jednak tangenti ugla kojeg ona zatvara sa vremenskom osom, odnosno

$$Y_D = K \cdot \frac{Dy_1}{Dt_1} \quad (6.6)$$

Diferencijalno dejstvo u ovoj tački izlazne krive predstavlja brzinu promene izlazne veličine. Brzina promene izlazne veličine je veća gde je kriva strmija, pa je diferencijalno dejstvo najjače onda, kad je brzina promene izlazne veličine najveća.

Kontinualni regulatori kod kojih je regulaciono delovanje (signal upravljanja) srazmerno brzini promene signala greške nazivaju se *regulatori sa diferencijalnim dejstvom*. Matematički izraz za signal upravljanja je u ovom slučaju:

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.7)$$

gde je T_d – diferencijalna vremenska konstanta regulatora.

Zaključak: Regulator sa diferencijalnim dejstvom na svom izlazu daje signal ka objektu upravljanja, a taj signal se opire promeni ulaznog signala. Izlazni signal regulatora će da traje samo onoliko koliko traje promena vrednosti ulaznog signala (dokle god se signal na ulazu regulatora menja: raste ili opada).

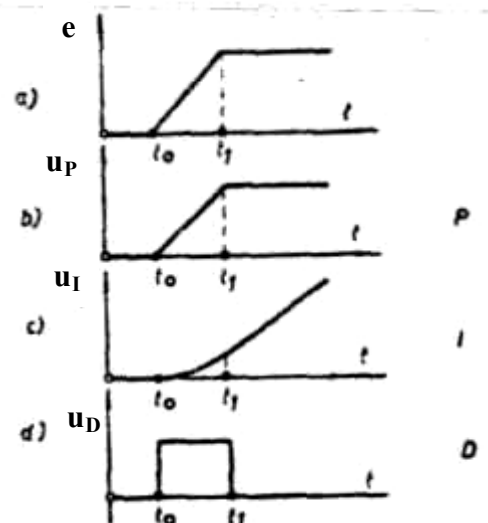
Praktično se ne koriste regulatori koji imaju samo diferencijalno dejstvo, već se koriste složeni regulatori koji u sebi sadrže kombinaciju proporcionalno-diferencijalnog (PD) ili proporcionalno-integralno-diferencijalnog (PID) delovanja.

*Uporedni pregled P, I i D dejstva

U cilju poređenja delovanja P, I i D dejstva, na slici 6.20 je grafički prikazan oblik signala koji pojedini regulatori daju na svom izlazu u zavisnosti od istog signala greške.

Ako signal greške ima oblik kao na slici 6.20a, onda će proporcionalno dejstvo elementa u svakom trenutku biti određeno proizvodom pojačanja K i ulaznog signala x odnosno $Y_p=Ke(t)$ (slika 6.20b), integralno i diferencijalno dejstvo su prikazani na slikama 6.20c i 6.20d, respektivno.

Slika 6.20.



6.4.5. Kombinovani kontinualni regulatori

6.4.5.1 Regulatori sa proporcionalno - integralnim delovanjem ili PI-regulatori

Ako bismo uporedili osobine P i I regulatora mogli bismo reći da je P-regulator, regulator s brzim ali netačnim delovanjem, a I-regulator, regulator sa sporim ali tačnim delovanjem. Iz spomenutih se osobina ovih regulatora vidi, da nijedan od njih nije sam za sebe pogodan za regulisanje procesa kod kojih je potrebno brzo i tačno regulisanje. Ovakvo je regulisanje ipak najpotrebnije i najčešće. Zato se upotrebljavaju regulatori s obe vrste djelovanja odnosno PI-regulatori.

U prethodnim lekcijama su dati matematički izrazi za P i I-delovanja:

za P-regulator:
$$u_P = K_P \cdot e(t)$$

i I – regulator:
$$u_I = \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(t) dt$$

Izraz za prelaznu karakteristiku PI-regulatora može napisati u sledećem obliku:

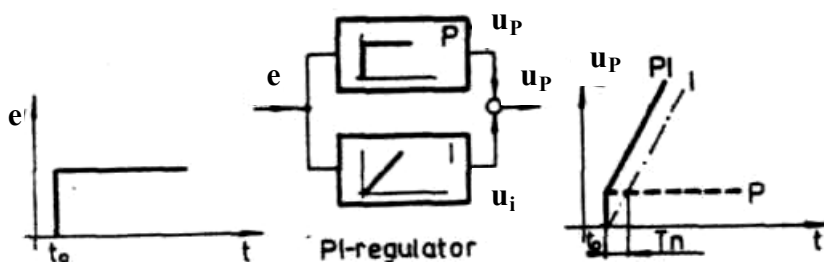
$$u_{PI} = K_P \cdot e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (6.8)$$

Ovde su: u_{PI} – upravljačko dejstvo PI regulatore, K_P – pojačanje P dela regulatora, T_I – integraciona vremenska konstanta, $e(t)$ – signal greške, t_0 – trenutak u kojem je došlo do pojave signala greške i t – vreme u kojem se posmatra delovanje regulatora.

Zaključak: izlazni signal PI regulatora je jednak zbiru signala koje daju P i I regulatori

Prelazna karakteristika ovog regulatora pokazana je na slici 6.21.

Slika 6.21.



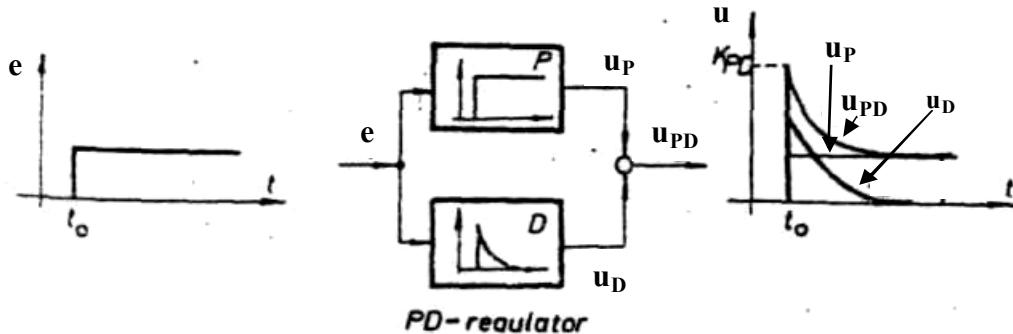
Na ovoj se slici vide oblici ulaznog skokovitog signala i izlaznog signala (prelazne karakteristike) PI-regulatora. Na blok šemi simbolički je pokazano, kako se paralelnim spajanjem P i I-regulatora, čiji su ulazi međusobno spojeni i na koje se dovodi isti ulazni signal, a izlazni im se signali međusobno sabiraju u zajednički, može dobiti PI-regulator.

Ovakav regulator ima dobra svojstva oba spojena regulatora: deluje brzo kao P-regulator i tačno kao I-regulator. Ukupno delovanje PI-regulatora će biti već kod malih regulacionih odstupanja brzo i snažno zbog P-delovanja, a tačno zbog I-delovanja

6.4.5.2 Regulatori s proporcionalno-diferencijalnim delovanjem ili PD-regulatori

Osnovna osobina ovih regulatora je da kod njih vrednost izlazne veličine ne zavisi samo od vrednosti regulacionog odstupanja, nego i od brzine promene tog odstupanja. Tako u početnom delu prelaznog procesa izlazna veličina najčešće ima najveću vrednost, koja se zatim smanjuje na vrednost određenu P-delovanjem PD-regulatora. To je naročito izraženo kod skokovitih promena ulazne veličine (slika 6.22).

Slika 6.22.



Prenosna karakteristika PD-regulatora može se odrediti pomoću paralelnog spajanja i na temelju izraza za pojedinačna delovanja P i D - regulatora:

$$u_{PD}(t) = K_p e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.9)$$

gde je T_d =diferencijalna vremenska konstanta, $de(t)/dt$ brzina promene signala greške, a u_{PD} – ukupno upravljačko dejstvo ovog regulatora.

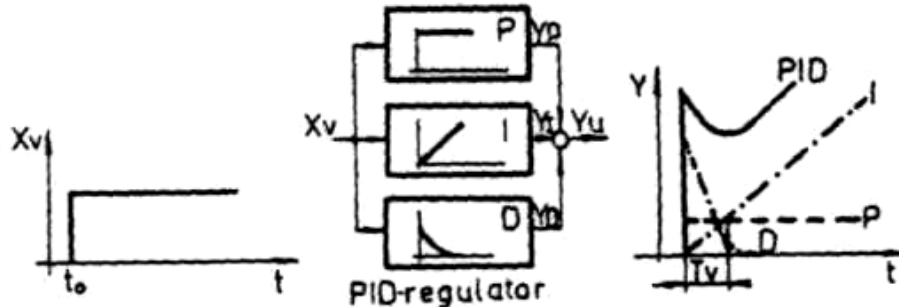
Zaključak: izlazni signal PD regulatora je jednak zbiru signala koje daju P i D regulatori.

PD-regulator se može zamisliti kao regulator s promenljivim pojačanjem, tako da mu je pojačanje veliko pri svakom nastupu poremećaja, a nakon toga se to pojačanje smanjuje i postaje jednako pojačanju samog P-regulatora. Pojačanje PD-regulatora zapravo zavisi od brzine promene signala greške, pa bi ono, u idealnom slučaju, pri pobuđivanju PD-regulatora skokovitim signalom u trenutku t_0 , bilo veoma (beskonačno) veliko. U praktičnim slučajevima ovo je pojačanje mnogo manje i iznosi 6 do 10 K_P .

Praktična primena PD-regulatora uobičajena je samo kod procesa, čija izlazna veličina raste po eksponencijalnom zakonu u odnosu na ulaznu veličinu. To je slučaj kod održavanja smera (kursa) kretanja, položaja u prostoru, neutronskog toka itd.

6.4.5.3. Regulatori s proporcionalno-integralno-diferencijalnim delovanjem ili PID-regulatori

U načelu se PID-regulator može izvesti kao paralelan spoj tri regulatora, po jednog sa P-, I- i D-delovanjem. Na zajednički ulaz ovih regulatora dovodi se ulazna signal greške $e(t)$, a ukupna izlazna veličina se dobija kao zbir svih izlaznih veličina spojenih regulatora. Prikaz u načelu ovakvog regulatora pokazan je na slici 6.23.



Slika 6.23.

Izraz za prenosnu karakteristiku ovog regulatora može se takođe izvesti pomoću spomenute slike:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6.10)$$

u kojem su uvrštene sve veličine karakteristične za svako od spomenutih P-, I-, i D-delovanja.

Zaključak: izlazni signal PID regulatora je jednak zbiru signala koje daju P, I i D regulatori.

D-delovanje kod ovih regulatora prvo počinje delovati. Drugo je delovanje proporcionalno, koje je prema D-delovanju malo, ali koje takođe nastupa u početnom trenutku (P). Treće delovanje je I-delovanje koje dolazi u delovanje najkasnije, ali koje s vremenom snažno naraste, pa regulaciono odstupanje smanjuje praktično na nulu.

PID-regulator sjedinjuje sva dobra svojstva osnovnih vrsta regulatora. Pomoću D - delovanja deluje veoma brzo i unapred sprečava velika regulaciona odstupanja, P - delovanje mu daje stalno i dovoljno jako pojačanje, a I - delovanje mu osigurava tačno i potpuno otklanjanje regulacionog odstupanja.

U industrijskim uslovima umesto konstanti $1/T_I$ i T_D koriste se konstante $K_I=1/T_I$ i $K_D=T_D$ koji se podešavaju na samom regulatoru. Ako bismo ove konstante uvrstili u relaciju 6.10 dobićemo:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Pomoću PID-regulatora praktično je moguće osigurati regulisanje svih vrsta procesa, bez obzira na njihove osobine, koje ovise o vrsti njihovih prelaznih karakteristika, tromosti, akumulativnosti itd. Pregled vrsta procesa, njihovih prelaznih karakteristika i pogodnih vrsta regulatora, koji su preporučivi za regulisanje tih procesa pokazan je na slici 6.24.

Prema ovoj se slici vidi da je najpogodnije regulisanje izvesti tako da se za:

- procese bez izjednačenja primene regulatori s P-, i I- delovanjem,
- procese s eksponencijalnim porastom izlazne veličine, regulatori s P-, PD- i PID-delovanjem,
- procese s proporcionalnim delovanjem, regulatori s I-, i PI- delovanjem,
- procese s proporcionalnim delovanjem i mrtvim vremenom regulatori s I-delovanjem,
- procese prvoga reda, regulatori s P-, I- i PI-delovanjem, i za
- procese višeg reda. regulatori s P-, PI- i PID- delovanjem.

6.5. Blok dijagram regulatora

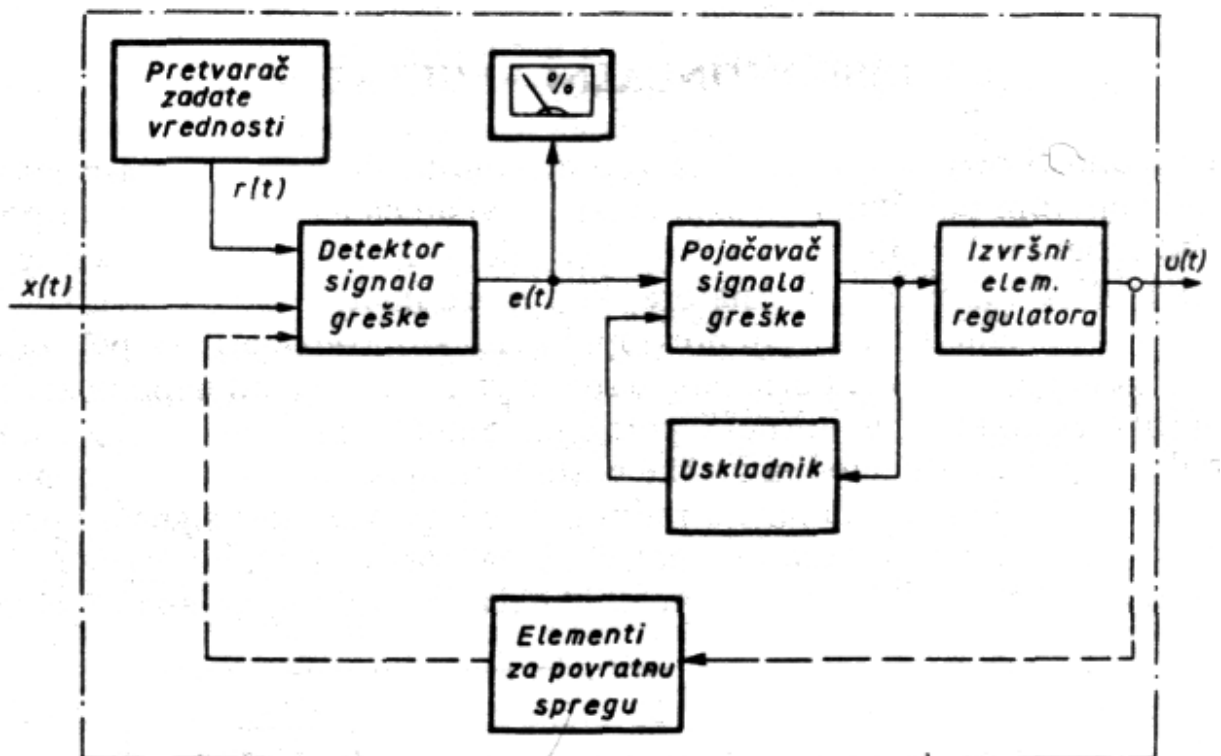
Ulazni signal regulatora je izlazni signal mernog pretvarača. Pretvarač zadate vrednosti i detektor signala greške sastavni su elementi regulatora. Izlazna veličina regulatora je signal upravljanja, koji raspolaže dovoljnom snagom za pokretanje izvršnog organa upravljanog objekta (regulacionog ventila, elektromotornog pogona i drugo).

Na osnovu veličine i znaka signala greške, regulator proizvodi signal upravljanja, koji deluje na upravljani objekat u smeru smanjenja odstupanja njegove izlazne veličine od zadate vrednosti.

Potrebno je naglasiti da regulator mora da obezbedi dinamiku signala upravljanja usklađenu sa dinamičkim osobinama objekta regulacije. Zbog toga, regulator sadrži, pored pretvarača zadate vrednosti, detektora signala greške, pojačavača i izvršnih elemenata, i elemente za usklađivanje dinamike regulacionog signala sa dinamičkim osobinama objekta regulacije. Ovi elementi se nazivaju uskladnici.

U cilju usklađivanja dinamike regulacionog signala sa dinamičkim osobinama objekta regulacije kod nekih regulatora se primenjuje povratna sprega. Radi toga neki regulatori sadrže, pored već nabrojanih elemenata, i elemente za povratnu spregu. Na osnovu svega rečenog, strukturna blok-šema regulatora može se prikazati kao na slici 6.25.

Slika 6.25

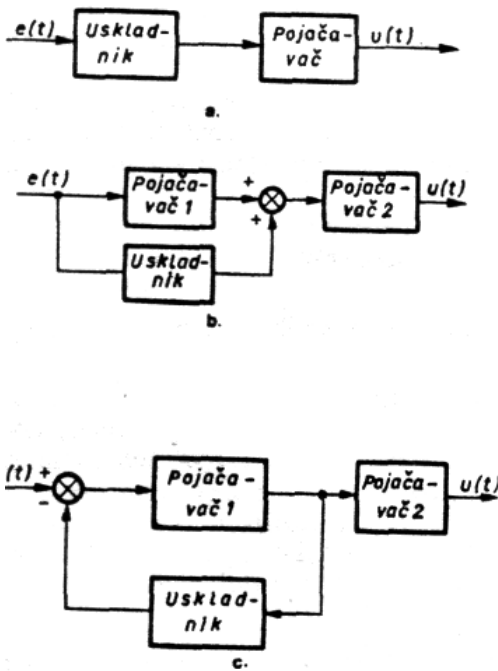


6.5.1 Uskladnici

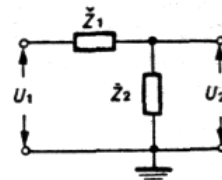
Uskladnici su elementi koji se sprežu sa pojačavačem amplitude signala greške, sa ciljem da se dinamika signala upravljanja uskladi sa dinamičkim karakteristikama upravljanog objekta. Moguća su tri načina sprežanja: redna sprega, paralelna sprega i sprega postavljanjem uskladnika u kolo povratne sprege pojačavača signala greške (slika 6.26).

Za proračun elemenata uskladnika najpodesnija je redna sprega. Povratnom spregom se vrlo uspešno može ostvariti željeno usklađivanje. Paralelna sprega je podesna za ostvarenje složenog delovanja regulatora.

Jedan primer uskladnika kod elektronskih regulatora je delitelj napona sastavljen od dve impedanse, kao što je prikazano na slici 6.27.



Slika 6.26



Slika 6.27

Kada su naponi U_1 i U_2 prosto-periodične funkcije vremena, podesnije je da se, umesto zavisnosti između ovih napona kao vremenskih funkcija, posmatra zavisnost između kompleksnih likova tih napona. Prema slici 6.27, između kompleksnih likova napona U_1 i U_2 postoji relacija:

$$\check{U}_2 = \frac{\check{Z}_2}{\check{Z}_1 + \check{Z}_2} \check{U}_1 \quad (6.11)$$

Vidimo da je veza između kompleksnih likova napona U_1 i U_2 određena izrazom uz \check{U}_1 , koji zavisi od elemenata uskladnika (impedansi \check{Z}_1 i \check{Z}_2). Ovim izrazom je, u stvari, određen količnik kompleksnih likova \check{U}_1 i \check{U}_2 . Matematički izraz koji određuje količnik kompleksnih likova izlazne i ulazne veličine nekog dinamičkog elementa ili sistema naziva se prenosna funkcija. Prenosna funkcija uskladnika sa slike 6.27 data je izrazom:

$$W(j\omega) = \frac{\check{U}_2}{\check{U}_1} = \frac{\check{Z}_2}{\check{Z}_1 + \check{Z}_2} \quad (6.12)$$

Veličina W je funkcija kružne učestanosti ulaznog napona ω . Kako se kod svih reaktivnih komponenti impedanse (induktivnih i kapacitivnih) javlja izraz $j\omega$, za argument funkcije W se uzima izraz $j\omega$. U tablici 6.1. prikazani su karakteristični tipovi uskladnika realizovanih pomoću otpornika i kondenzatora.

Tabela 6.1

		Frekventna prenosna funkcija	Električna sema	Otskočni odziv
TIP USKLADNIKA	IZVODNI	$W(j\omega) = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{1+jT_1\omega}{1+jT_2\omega}$ $T_1 = R_1 C$ $T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$		
	INTEGRALNI	$W(j\omega) = \frac{1+jT_1\omega}{1+jT_2\omega}$ $T_1 = R_2 C$ $T_2 = (R_1 + R_2) C$		
	INTEGRALNO IZVODNI	$W(j\omega) = \frac{(1+jT_1\omega)(1+jT_3\omega)}{(1+jT_2\omega)(1+jT_4\omega)}$ $T_1 = R_1 C_1$ $T_3 = R_2 C_2$ $T_2 \cdot T_4 = T_1 \cdot T_3$ $\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_4} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{R_2 C_1}$		

Izvodni ili diferencijalni uskladnik ima osobinu da izlazni napon u_2 , kao funkcija vremena, zavisi od zbira ulaznog napona u_1 , kao funkcije vremena, i njegovog prvog izvoda, to jest:

$$u_2 + T_2 \frac{du_2}{dt} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(u_1(t) + T_1 \frac{du_1}{dt} \right) \quad (6.13)$$

gde je:

$$T_1 = R_1 C, \quad T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C.$$

U jednačini (8.4) izrazi $\frac{du_1}{dt}$ i $\frac{du_2}{dt}$ predstavljaju prve izvode napona u_1 i u_2 izražene u obliku tzv. diferencijalnog količnika. (Diferencijalni količnik je količnik beskrajno malog priraštaja funkcije dy i beskrajno malog priraštaja argumenta dx .)

Kod integralnog uskladnika izlazni napon u_2 zavisi od zbira ulaznog napona u_1 , kao funkcije vremena, i njegovog integrala:

$$u_2 + \frac{1}{T_2} \int u_2 dt = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(u_1(t) + \frac{1}{T_1} \int u_1 dt \right), \quad (6.14)$$

gde je:

$$T_1 = R_2 C, \quad T_2 = (R_1 + R_2) C.$$

Kako je $T_1 < T_2$, to je $1/T_1 > 1/T_2$. Iz toga sledi da je veći udeo integrala napona u_1 od integrala napona u_2 u prethodnoj jednačini.

Integralno-izvodni ili integralno-diferencijalni uskladnik se može lakše shvatiti posmatranjem njegovog odskočnog odziva (prikazanog u trećoj koloni tablice 6.1). Neposredno posle pojave ulaznog napona u_1 dolazi do izražaja izvodno (diferencijalno) delovanje uskladnika. Ovo delovanje u toku vremena iščezava, a povećava se integralno delovanje.

6.6. Povratna veza u jedinicama regulacionih kola

Prenos signala s izlaza na ulaz dela, jedinice ili sistema naziva se povratnom vezom. Regulacioni sistem je glavna povratna veza s izlaza na ulaz procesa. Svaki od delova regulacionog sistema deluje u glavnoj grani povratne veze, ali i sam može imati vlastitu povratnu vezu.

Ovo se može pokazati pomoću slike 6.28, gdje se dio regulacionog sistema sastoji iz regulatora i sklopova povratne veze (R i PV). Na pojačavač regulatora ovde deluju tri signala: signali regulisane veličine x , željene vrednosti x_0 i signal povratne veze $F(y)$. Ukupno delovanje svih signala zajedno je takvo, da osigurava najbolje moguće delovanje celog sistema. Takva povratna veza je najčešća u regulatorima kao delovima regulacionih kola.

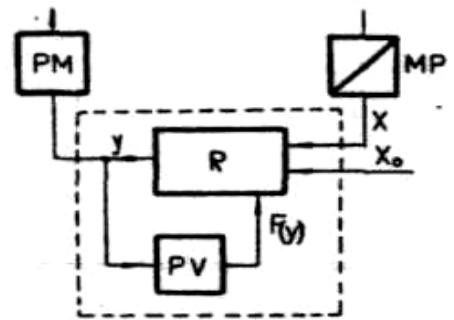
Povratna veza je pozitivna ako je signal, vraćen s izlaza na ulaz istog predznaka kao i ulazni signal (slika 6.29). Ta se dva signala onda podudaraju i sabiraju, pa pojačanje delova raste, a ukupni signal iznosi:

$$z = x - x_0 + F(y) = x_v + F(y)$$

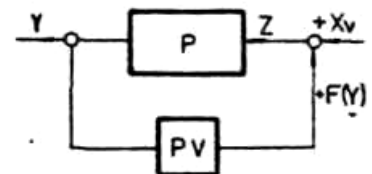
Na ovaj način rade mehanički i električni oscilatori.

Povratna veza je negativna, ako je signal, vraćen sa izlaza na ulaz, predznaka suprotnog ulaznom signalu (slika 6.30). Ta se dva signala međusobno poništavaju, pa pojačanje slabi, odnosno ukupni je ulazni signal

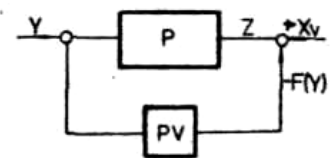
$$z = x_v - F(y)$$



Slika 6.28.



Slika 6.29.



Slika 6.30.

6.7. Regulatori bez i sa povratnom spregom

Neki objekti regulacije, kao i neki izvršni elementi sistema automatske regulacije imaju osobinu da integriraju (uvećavaju u toku vremena) regulaciono odstupanje. Tako, na primer kod sistema za pozicioniranje, elektromotor jednosmerne struje proizvodi ugaoni pomeraj koji je srazmeran integralu napona na krajevima rotora. Naime, brzina obrtanja je srazmerna naponu na krajevima rotora, a ugaoni pomeraj osovine je jednak integralu brzine obrtanja. Prema tome, ugaoni pomeraj osovine je srazmeran integralu napona upravljanja motorom. To praktično znači da ako bi se elektromotorom upravljalo bez povratne sprege, kada pokretni deo mašine dođe u zadati položaj, potrebno je smanjiti napon na nulu da bi se elektromotor zaustavio. Međutim, ako se iz nekog razloga napon na krajevima motora poveća iznad nule, ali dovoljno da može da pokrene motor, ovaj će se polako obrtati i udaljavati pokretni deo mašine od zadatog položaja i, na taj način, uvećavati grešku. Primenom negativne povratne sprege, ukoliko se javi odstupanje pokretnog dela mašine od zadatog položaja, javlja se signal greške koji, u regulatoru, proizvodi signal upravljanja u smeru vraćanja pokretnog dela mašine prema zadatom položaju.

Sličnu osobinu ima i rezervoar sa tečnošću kod kojeg se vrši regulacija nivoa menjanjem protoka. Protok je jednak brzini promene zapremine tečnosti u rezervoaru, tj.:

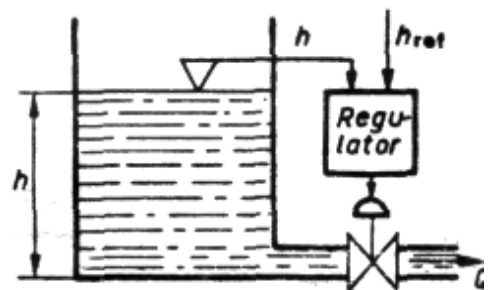
$$Q = \frac{dV}{dt} = S \frac{dh}{dt},$$

gde je: S — površina poprečnog preseka rezervoara, a dV/dt i dh/dt predstavljaju brzine promene zapremine V i visine nivoa h . Visinu h nalazimo iz poslednje jednačine matematičkom operacijom inverznom operaciji diferenciranja, a to je integraljenje:

$$h = \frac{1}{S} \int_0^t Q(t) dt.$$

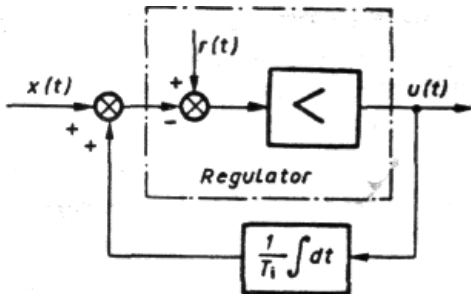
Regulator nivoa proizvodi signal upravljanja koji deluje na regulacioni ventil (videti sliku 6.31), povećavajući ili smanjujući slobodnu površinu kroz koju ističe tečnost. Pod pretpostavkom da je visina nivoa opala ispod zadate vrednosti, regulator će delovati na zatvaranje zatvarača sve dok nivo ne počne da raste i ne dostigne zadatu vrednost. Kada nivo tečnosti dostigne zadatu vrednost, signal greške postaje jednak nuli i izvršni elemenat se zaustavlja. Zasun, dakle, ostaje u položaju u kojem je visina nivoa rasla. Zbog toga će nivo i dalje da raste, sve dok se ne aktivira izvršni elemenat regulatora i počne da otvara zatvarač. To znači da će usled integracione osobine rezervoara kao objekta regulacije, regulator da aktivira izvršni organ čas u jednom čas u drugom smeru. Posledica toga je da nivo osciluje oko zadate vrednosti. Pored toga što je takav regulacioni proces slabog kvaliteta (nivo tečnosti nije konstantan, već stalno osciluje oko zadate vrednosti) često aktiviranje izvršnog organa (regulacionog zatvarača) dovodi do brzog trošenja njegovih pojedinih delova. Kod regulacionog ventila se, na primer, troše zaptivni prstenovi, pa dolazi do propuštanja tečnosti izvan hidrauličnog sistema. Ovo je naročito štetno ako je tečnost hemijski agresivna ili otrovna.

Radi ublažavanja, ili potpunog otklanjanja opisanih pojava, osim ranije opisanih metoda (primena uskladnika ili regulatora sa složenim delovanjem) primenjuje se i *povratna sprega kod regulatora*. Ovu povratnu spregu treba razlikovati od osnovne povratne sprege u sistemu automatske regulacije kojom se zatvara regulacioni krug. Ovde je reč o povratnoj sprezi koja obuhvata samo regulator, pa je možemo uslovno nazvati lokalnom povratnom spregom.

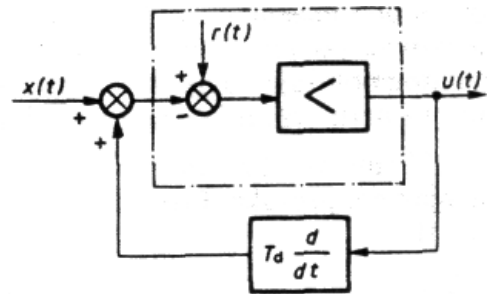


Slika 6.31

Za objekte regulacije sa izraženom integracionom osobinom, poboljšanje kvaliteta regulacionog procesa, kao i povećanje stepena stabilnosti uvodi se diferencijalno delovanje regulatora. Diferencijalno delovanje se može postići i stavljanjem integralnog uskladnika u kolo povratne sprege regulatora. (Analogno tome, integralno delovanje se može postići stavljanjem diferencijalnog uskladnika u kolo povratne sprege regulatora, videti sliku 8.19).



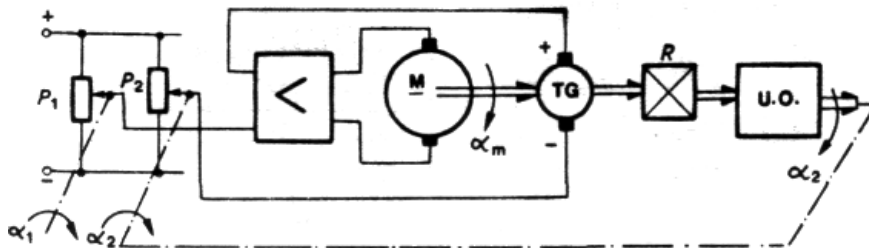
Slika 6.32



Slika 6.33

Ranije smo naveli primere objekata regulacije sa veoma izraženim osobinama inercije (izmenjivači toplote, rezervoari sa tečnošću i drugi), koje izazivaju kašnjenje u uspostavljanju regulisane veličine na zadatu vrednost. Jedan od načina da se uskladi brzina reagovanja regulatora sa brzinom upravljanog objekta jeste povećanje inercije regulatora primenom povratne sprege po brzini promene signala upravljanja, odnosno po njegovom prvom izvodu. Na slici 6.33 prikazana je strukturna blok-šema regulatora sa povratnom spregom po prvom izvodu signala upravljanja. Pri porastu brzine promene signala upravljanja (povećanja ili smanjenja) povećava se vrednost signala negativne povratne sprege. Kako se ovaj signal oduzima od ulaznog signala regulatora, smanjuje se ulazni signal, odnosno usporava povećanje signala upravljanja.

Na slici 6.34 prikazana je principska šema sistema za automatsku regulaciju ugaono g položaja. Pretvarač zadatog ugaono g položaja α_1 je potenciometar P_1 .



Slika 6.34

Ulogu mernog pretvarača obavlja potenciometar P_2 , čiji je klizač mehanički vezan za osovinu upravljanog objekta UO. Izvršni element regulatora je elektromotor jednosmerne struje sa mehaničkim reduktorom R. Tahogenerator TG služi za ostvarenje povratne sprege po brzini. Napon greške U_e na ulazu pojačavača iznosi:

$$U_e = U_{\alpha_1} - U_{\alpha_2} - U_{TG},$$

gde je U_{TG} — izlazni napon tahogeneratora, čija je vrednost određena relacijom:

$$U_{TG} = K_d \frac{d\alpha_1}{dt}.$$

6.8. Elektronski regulatori za linearnu statičku i dinamičku obradu

Iz dosadašnjeg izlaganja o regulatorima proizilazi da se u njima vrši obrada signala iz mernih pretvarača, čiji je rezultat signal upravljanja određenih statičkih i dinamičkih karakteristika. Takođe je ranije ukazano da se matematičke operacije nad signalima tehnički najlakše ostvaruju sa signalima električne prirode. Razvojem operacionim pojačavača stvorene su mogućnosti za veoma raznovrsnu, kako statičku, tako i dinamičku, obradu električnih signala.

Pod statičkom obradom signala podrazumeva se pojačanje amplitude i snage signala, pretvaranje naizmeničnog signala u jednosmerni i obrnuto i dr.

Pod dinamičkom obradom signala podrazumeva se promena oblika signala kao funkcije vremena (diferenciranje signala po vremenu, integraljenje u vremenu, zakašnjanje i druge obrade). U tablici 6.2 prikazane su šeme sa operacionim pojačavačem za pojedine obrade signala karakteristične za regulatore. Osim pojačanja snage, skoro sve druge obrade signala mogu se ostvariti operacionim pojačavačem.

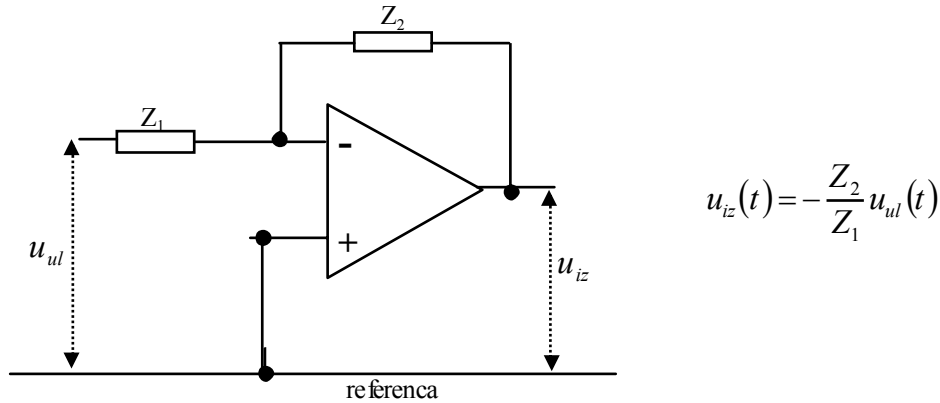
Elektronski regulatori PI, PD i PID tipa najčešće se realizuju pomoću operacionih pojačavača sa odgovarajućim uskladnicima iz tablice 6.2 u povratnoj grani pojačavača. Izlazni deo elektronskog regulatora je pojačavač snage, koji može biti tranzistorski, magnetni ili neki drugi pojačavač snage.

Tablica 6.2.

VRSTA OPERACIJE	PRINCIPSKA ŠEMA
ALGEBARSKO SABIRANJE $U = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n)$	
POJAČANJE SA INVERZIJOM $U_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_1$	
POJAČANJE BEZ INVERZIJE $U_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_1$	
I/U PRETVARAČ $U_2 = -\frac{R_2}{R_1} R I_1$	
U/I PRETVARAČ $I_2 = \frac{U_1}{R}$	
INTEGRATOR NAPONA $U_2 = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt$	
DIFERENCIJATOR NAPONA $U_2 = -RC \frac{dU_1}{dt}$	

6.8.1. Elektronski regulatori sa operacionim pojačavačem

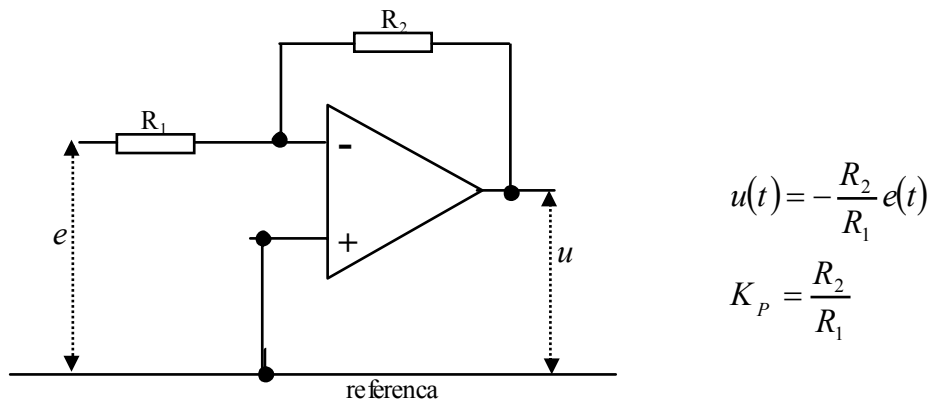
Kontinualni regulatori sa proporcionalnim, integralnim i diferencijalnim dejstvom, kao i njihove kombinacije, često se realizuju pomoću operacionih pojačavača. S obzirom na to da su operacioni pojačavači poznati iz elektronike neće se ulaziti u detalje sa izvedbom. Kolo operacionog pojačavača prikazano je na slici 6.35.



Slika 6.35 – Operacioni pojačavač

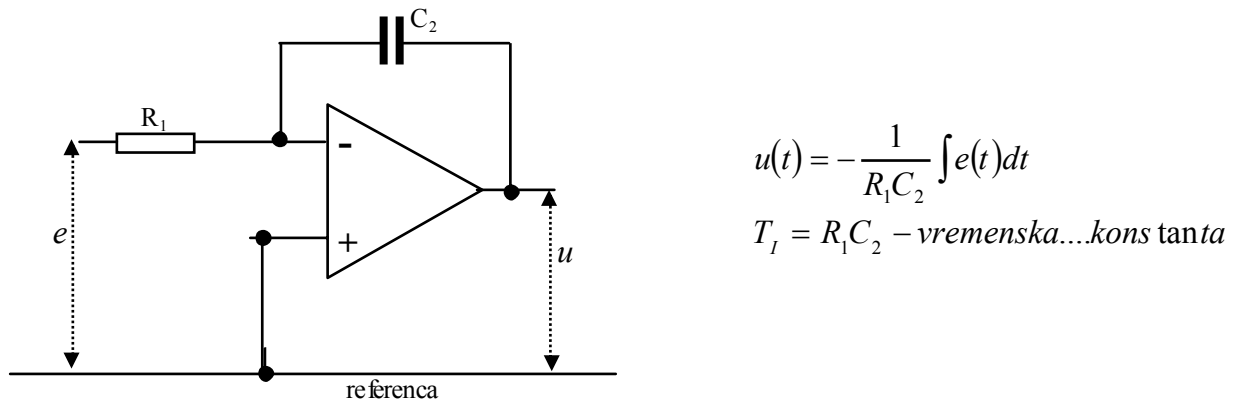
Kada se operacioni pojačavač koristi kao regulator, na ulazu deluje signal greške $u_{ul}(t) = e(t)$, a na izlazu se dobija upravljanje $u_{iz}(t) = u(t)$. Željeno dejstvo elektronskog regulatora ostvaruje se izborom odgovarajućih oblika impedansi Z_1 i Z_2 , koje sadrže pasivne elemente – otpornik otpornosti R , kondenzator kapacitivnosti C ili njihove kombinacije.

Regulator proporcionalnog dejstva je prikazan na slici 6.36.



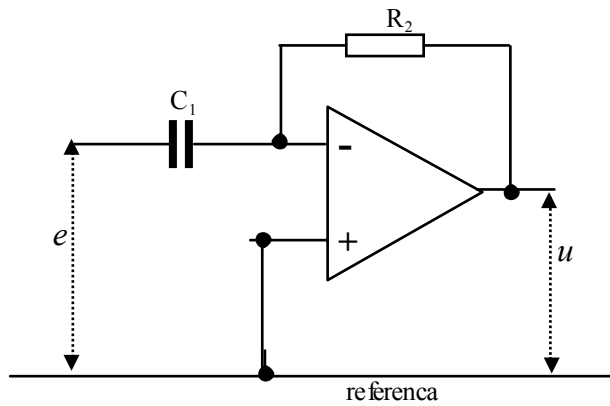
Slika 6.36 – P-regulator

Regulator integralnog dejstva (slika 6.37) u povratnoj grani sadrži kondenzator C_2 , dok je $Z_1=R_1$.



Slika 6.37 – I-regulator

Regulator diferencijalnog dejstva (slika 6.38) u direktnoj grani ima kondenzator C_1 , dok se u povratnoj grani nalazi otpornik R_2 .



$$u(t) = -R_2 C_1 \frac{de(t)}{dt}$$

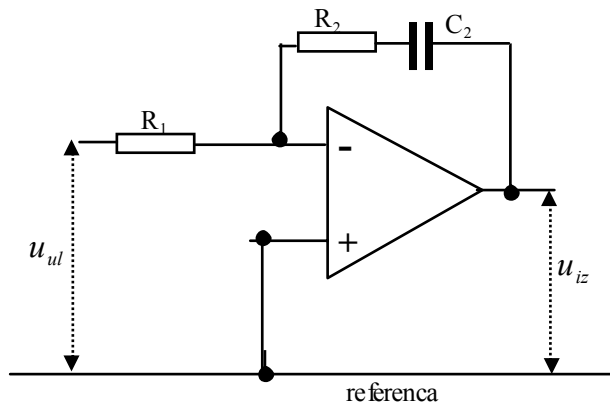
$$T_d = R_2 C_1 - \text{vremenska...konstanta}$$

Slika 6.38 – D-regulator

Izvedeni izraz se odnosi na idealno diferencijalno dejstvo koje je u praksi neostvarivo, jer kondenzator ima izvesnu termogenu otpornost, koja se može predstaviti redno vezanim otpornikom R_1 . Nedostaci ovog regulatora ogledaju se u činjenici da kondenzator u ulaznoj grani, pored sklonosti ka oscilovanju prenosi šumove i smetnje, što može da se nepovoljno odrazi na stabilnost i pouzdanost rada regulatora.

Regulatori sa složenim dejstvom – PI, PD i PID regulatori, realizuju se na dva načina: sa jednim pojačavačem i sa relativno složenim oblicima impedansi Z_1 i Z_2 , ili kao kombinacije više osnovnih već opisanih regulatora. Regulatori sa jednim pojačavačem su jednostavnije konstrukcije i zato su jeftiniji, ali je zato podešavanje konstanti regulatora teže nego kod drugog načina.

Principijelna šema **PI regulatora** prikazana je na slici 6.39.



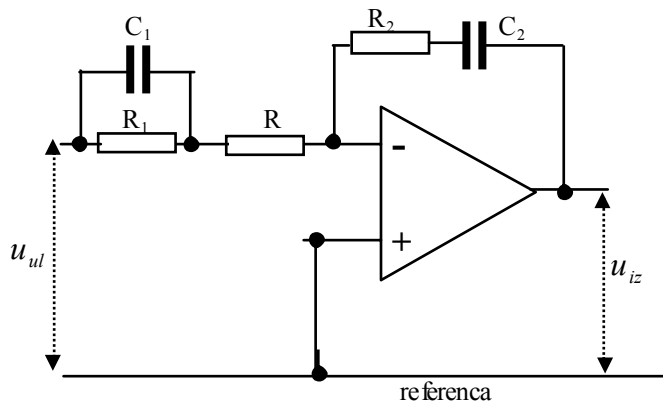
Slika 6.39 – PI regulator

$$u(t) = -\frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R_1 C_2} \int e(t) dt = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right)$$

Gde je $K_p = \frac{R_2}{R_1}$ koeficijent proporcionalnosti, a $T_i = R_2 C_2$ konstanta integralnog dejstva. Obe konstante se mogu podešavati nezavisno.

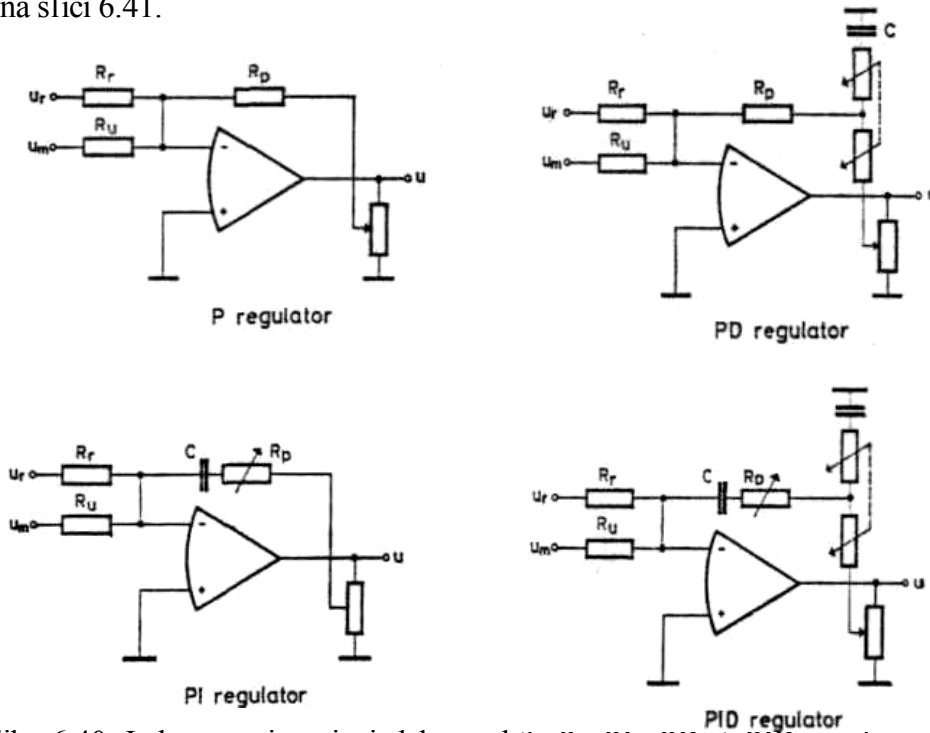
Kao što je poznato, paralelnom vezom proporcionalnog i integralnog regulatora takođe bi se dobio PI regulator. Ovo rešenje sadrži dva posebna regulatora, čije su šeme date na slikama 6.36 (proporcionalni regulator) i 6.37 (integralni regulator). Sabirna tačka je takođe proporcionalni regulator. To je operacioni pojačavač sa dva ulaza, koji na izlazu daje napon jednak zbiru ulaznih napona.

PID regulator sa jednim pojačavačem može se realizovati prema šemi prikazanoj na slici

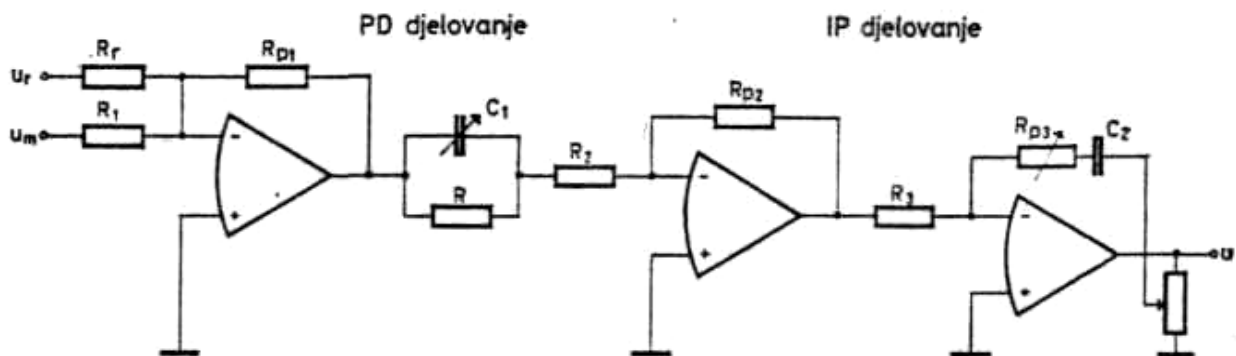


Slika 6.39 – PI regulator

Na slici 6.40. prikazani su primeri praktične primene jednostavnih spojeva osnovnih regulatora. U praksi se primjenjuju brojne i različite izvedbe elektronskih regulatora, a PID-regulator može i da se gradi stepenovanjem regulatora P-, PD- i PI-delovanja, npr. kao u slučaju na slici 6.41.



Slika 6.40. Jednostavni spojevi elektronskih P-, PI-, PD- i PID-regulatora.



Slika 6.41 Primer praktične izvedbe elektronskog PID-regulatora.

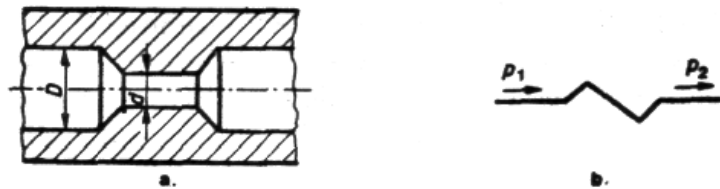
6.9. Pneumatski regulatori

Pneumatski sistemi automatskog upravljanja i regulacije imaju široku primenu u radnim sredinama u kojima se nalaze lako zapaljive, kao i eksplozivne supstance. Takav je slučaj, na primer, u rafinerijama nafte, fabrikama eksploziva i drugim hemijskim fabrikama. Električni i elektronski uređaji se u takvim sredinama koriste samo izuzetno, ako ne postoje drugi. Oni tada moraju biti izvedeni tako da ni u kom slučaju ne može doći do pojave električne varnice, o čemu mora postojati potvrda određene državne institucije.

Kod pneumatskih sistema prenosnik informacija i energije je vazduh, i to pod malim pritiskom (od 0,1 do 1 bar), tako da ne postoji ni teoretska mogućnost da oni izazovu požar ili eksploziju.

Radi lakšeg razumevanja principa rada pneumatskih regulatora opisaćemo prvo neke njihove standardne komponente.

Pneumatska prigušnica. Pneumatska prigušnica je element pneumatskog kola ekvivalentan električnom otporu. Ona služi za sniženje pritiska. Konstruktivno, prigušnica je jedna pregrada sa otvorom manjim od poprečnog preseka cevovoda u koji se ugrađuje. Na slici 6.37 prikazan je principski crtež pneumatske prigušnice.



Slika 6.37

Uz zanemarivanje pada pritiska usled trenja vazduha o zidove cevovoda, sila pritiska vazduha u suženom, delu cevi iznosi:

$$F_1 = p_1 \frac{d^2 \pi}{4}. \quad (6.15)$$

Ova sila potiskuje vazduh u cevovod iza pregrade i stvara pritisak p_2 , koji iznosi:

$$p_2 = \frac{F_1}{D^2 \pi/2}. \quad (6.16)$$

Zamenom izraza za F_1 iz jednačine (6.15) u jednačini (6.16) dobijamo zavisnost između pritisaka p_1 i p_2 :

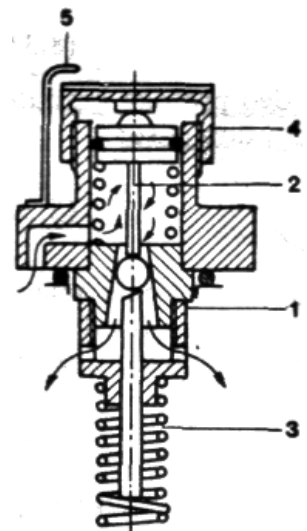
$$p_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 p_1 = K_p \cdot p_1, \quad (6.17)$$

gde je $K_p = \left(\frac{d}{D}\right)^2$ — koeficijent prigušenja prigušnice.

Prigušnica sa promenljivim koeficijentom prigušenja. Prigušnica sa promenljivim koeficijentom prigušenja, pored drugih primena, služi kod pneumatskih regulatora kao pretvarač zadate vrednosti regulisane veličine. Na slici 6.38 prikazano je jedno od konstruktivnih rešenja ove prigušnice

Otvor (1) za prolaz vazduha je konusnog oblika. U tom otvoru je smeštena jedna kuglica. Promenom položaja kuglice menja se veličina slobodnog otvora za prolaz vazduha.

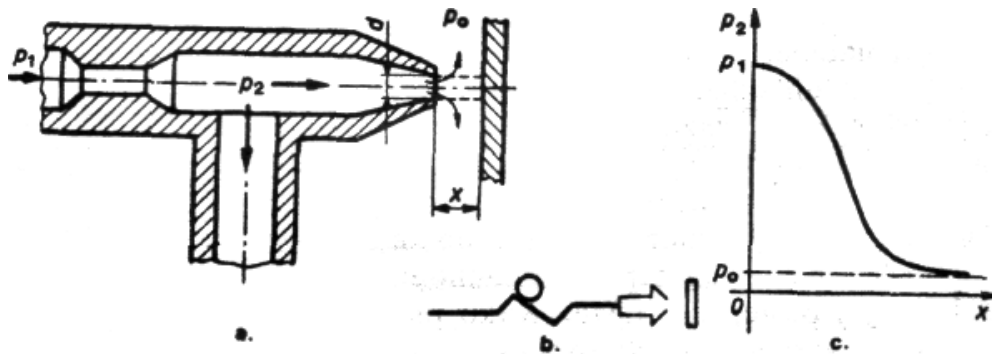
Na taj način se menja i koeficijent prigušenja prigušnice. Na čeonj strani navrtke (4) postavljena je skala sa kazaljkom (5) na



Slika 6.38

kojoj se očitava vrednost izlaznog pritiska p_2 u procentima od 0% do 100%.

Mlaznica sa zaslonom. Mlaznica sa zaslonom služi kao pretvarač mehaničkog pomeraja u promenu pritiska vazduha.



Slika 6.39

Na slici 6.39. je prikazana principijska šema mlaznice. Ovde će biti opisan princip delovanja mlaznice sa zaslonom. Pre svega, navedimo da vertikalni deo cevi služi za odvođenje pritiska p_2 radi dalje obrade. Pri razmatranju se mora imati u vidu da je kod mlaznice protok vazduha veliki, jer vazduh ističe u atmosferu, pa se mora uzeti u obzir dinamička zavisnost između pritiska i protoka. Tako je protok vazduha kroz prigušnicu određen relacijom:

$$Q_1 = S_p \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}, \quad (6.18)$$

gde je S_p - površina otvora u prigušnici, a ρ - specifična gustina vazduha. Protok vazduha kroz mlaznicu dat je sa :

$$Q_2 = S_m \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_0)}, \quad (6.19)$$

gde je S_m — slobodna površina kroz koju vazduh ističe u atmosferu. Ova površina je, približno, jednaka površini omotača cilindra čiji je prečnik d jednak prečniku otvora mlaznice, a visina x jednaka rastojanju zaslona od otvora mlaznice:

$$S_m = \pi \cdot d \cdot x \quad (6.19)$$

Izjednačavanjem protoka, Q_1 i Q_2 , pri čemu je zanemaren deo protoka vazduha kroz vertikalni deo cevi, i rešavanjem dobijene jednačine po p_2 , dobija se:

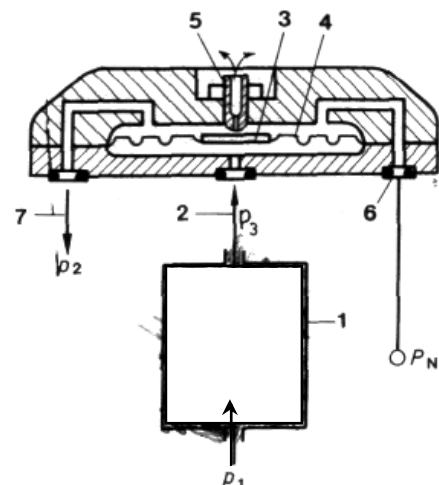
$$p_2 = \frac{S_p^2}{S_p^2 + S_m^2} p_1 + \frac{S_m^2}{S_p^2 + S_m^2} p_0. \quad (6.20)$$

Ovde je promenljiva veličina S_m , koja zavisi od rastojanja x prema relaciji (6.19). Kada se posmatraju samo mali priraštaji pritiska p_2 u zavisnosti od malih pomeranja zaslona u odnosu na neki srednji položaj x_0 , dobija se približno linearna zavisnost promene pritiska p_2 od pomeraja zaslona Δx :

$$\Delta p_2 = -(k_1 p_2 + k_2 p_0) \Delta x, \quad (6.21)$$

gde su k_1 i k_2 konstante. Na slici 6.39c grafički je prikazana zavisnost pritiska p_2 od rastojanja x .

Pneumatski integrator. - Pneumatski integrator je, konstrukciono, povećana zapremina, u koju utiče vazduh iz cevovoda, u kombinaciji sa pneumatskim pojačavačem pojačanja jednakog jedinici. Ovaj element je analogan elektronskom integratoru. Na slici 6.40 prikazana je principijska šema pneumatskog integratora. Vazduh iz



Slika 6.40

napojnog izvora pod pritiskom p_n ulazi u gornju komoru pojačavača, pritiskajući membranu (4) nadole. Time se oslobađa otvor (5) kroz koji vazduh odlazi u atmosferu. Usled toga je pritisak na izlazu (7) jednak atmosferskom pritisku. Kada na ulaz integracione komore (1) dovedemo pritisak p_1 , on se neće odmah preneti na izlaz komore (2), odnosno na ulaz pojačavača. Komora se puni vazduhom, pa pritisak u njoj postepeno raste. Kako pritisak p_3 raste, tako se membrana (4) diže. Njen zaslon (3) smanjuje isticanje vazduha kroz mlaznicu u atmosferu. Usled toga se povećava pritisak u gornjoj komori pojačavača. Pritisak u gornjoj komori je u svakom trenutku jednak pritisku u donjoj. Prema tome, kako raste pritisak na izlazu integracione komore (1), tako raste i pritisak na izlazu (7).

6.9.1. Princip rada pneumatskih regulatora

Princip rada pneumatskih regulatora sastoji se u sledećem.

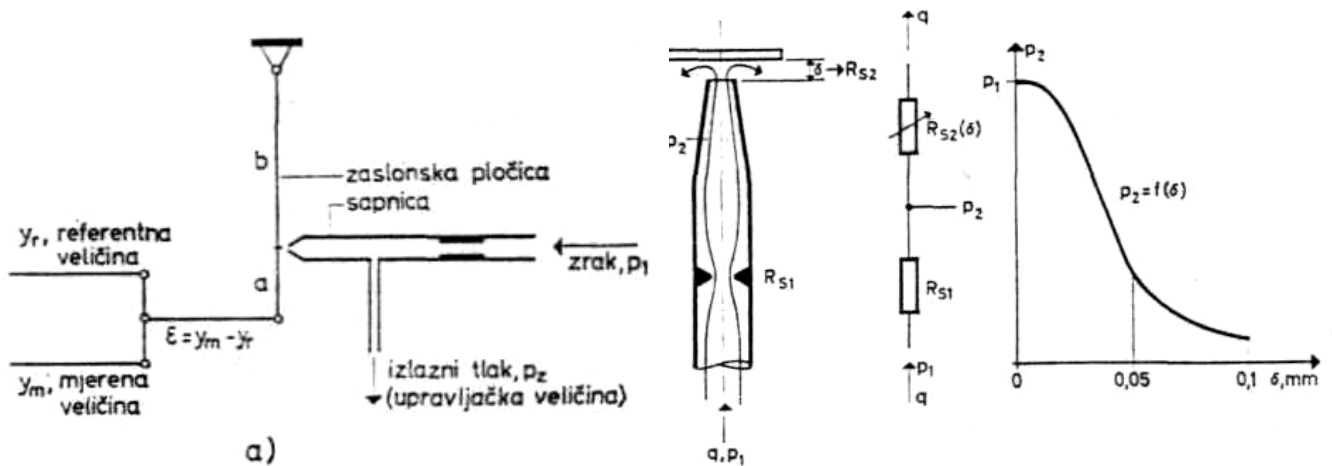
Pneumatski regulator prima pneumatski signal u vidu strujanja vazduha pod pritiskom srazmernim regulisanoj veličini. U pneumatskom detektoru signala greške nastaje signal čiji je pritisak srazmeran razlici pritiska pretvarača zadate vrednosti i pritiska ulaznog signala. Vazduh pod ovim pritiskom ulazi u pneumatski pojačavač, iz kojeg izlazi vazduh pod pojačanim pritiskom i odlazi u pneumatski cilindar kao izvršni element pneumatskog sistema automatske regulacije.

6.9.2. Princip izvedbe pneumatskih regulatora

- *Proporcionalni pneumatski regulator*

Najjednostavnija izvedba pneumatskog regulatora prikazana je na slici 6.41. To je mlaznica sa zaslonom. Pritisak p , u prostoru mlaznice upravljački je pritisak zavisano od udaljenosti δ , zaslonske pločice od mlaznice. Idealizovano, to je zavisnost

$$p = p_0 + k_1 \delta, \quad (6.21)$$



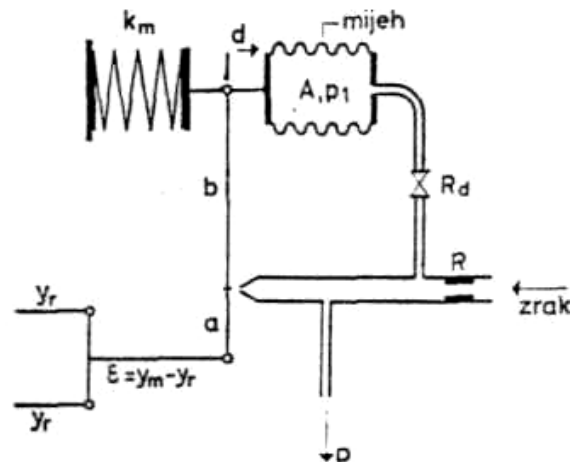
Slika 6.41. Jednostavna izvedba pneumatskog regulatora.

gde je p_0 početni pritisak, a k_1 koeficijent. Pomoću prikladnog mehaničkog sklopa postignuto je δ proporcionalno razlici referentne vrednosti i vrednosti merene veličine:

$$\delta = \frac{b}{a+b} k_2 (y_r - y_m), \quad (6.22)$$

Sa a i b označene su udaljenosti središta mlaznice od ležišta zaslonske pločice i njenog kraja na kojem je hvatište u kojem deluje pomak proporcionalan $\varepsilon = (y_r - y_m)$. k_2 je konstanta.

Statička karakteristika spoja mlaznica — zaslonska pločica vrlo je strma, pa je upravljački pritisak visoko osetljiv na promene δ . Razmak manji od 0,05 mm može već prouzrokovati promenu upravljačkog pritiska gotovo u čitavom njegovu opsegu. Širina proporcionalnog opsega takvog regulatora vrlo je mala, pa regulator deluje poput dvopoložajnog regulatora. Proporcionalni pneumatski regulator se zato izvodi prema principu prikazanom na slici 6.42. Osetljivost spoja mlaznica — zaslonska pločica smanjena je ugradnjom mijeha, koji deluje na položaj ležišta odbojne pločice kao povratna veza.



Slika 6.42 Pneumatski proporcionalni regulator.

Označi li se pomak ležaja zaslonske pločice sa d , radna površina mijeha sa A i njegova konstanta elastičnosti sa k_m (na slici je svojstvo elastičnosti mijeha prikazano perom), tada pri ravnoteži sila vredi

$$k_m d = -A(p - p_0). \quad (6.23)$$

Negativni predznak na desnoj strani znači da se porastom pritiska mijeh rasteže i podsiče kretanje poluge ulevo, što je dogovorno negativan smer. Razmak zaslonske pločice od mlaznice i pomaka ležišta pločice d , prouzrokovan mijehom povezuje sada jednačina:

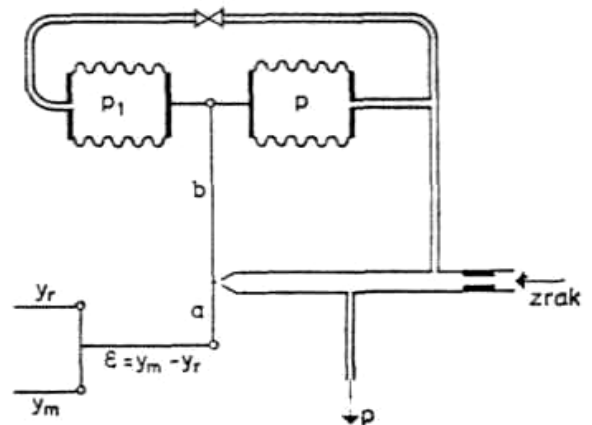
$$\delta = \frac{b}{a+b} k_2 (y_r - y_m) + \frac{a}{a+b} d. \quad (6.24)$$

Dobijene se jednačine mogu povezati tako da daju upravljačku veličinu p kao funkciju od $\varepsilon = y_r - y_m$:

$$\frac{p - p_0}{y_r - y_m} = \frac{k_1 k_2 b / (a - b)}{1 + k_m a A / (a - b) k_0}. \quad (6.25)$$

- *Proporcionalno-integralni pneumatski regulator*

Prikaz izvedbe proporcionalno-integralnog pneumatskog regulatora prikazan je na slici 6.43. Njegovo se delovanje može protumačiti na sličan način kao i delovanje prethodno opisanog proporcionalnog regulatora. Pri tom je potrebno poći od pretpostavke da vlada ravnotežno stanje i da su pritisci u oba mijeha jednaki, $p = p_2$. Neka se zatim u trenutku t_0 zaslonska pločica pomakne za $\Delta\delta$ kao posledica promene $\Delta\varepsilon$. Vrednost pritiska p sledi odmah ovu promenu kao u prethodno opisanom proporcionalnom regulatoru. Taj pritisak vlada odmah i u desnom



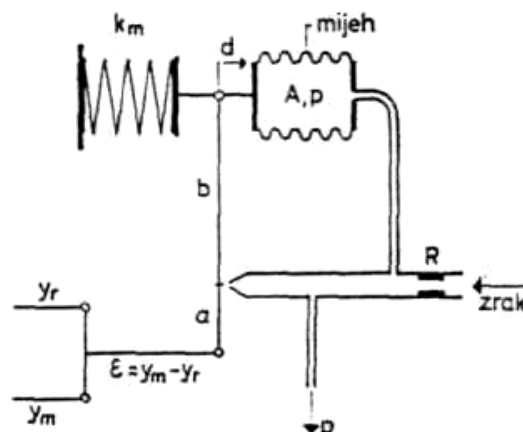
Slika 6.43 Pneumatski proporcionalno-integralni regulator.

mijehu, ali ne i u levom, jer zbog otpora R prigušnice u priključnoj cevčici levog mijeha zrak utiče u ovaj mijeh polagano.

Tako se u prvom trenutku kao posledica porasta p skokovito pomakne ležište zaslonske pločice za Δd , da bi se zatim porastom pritiska p_2 u levom mijehu smanjila razlika $p - p_2$ i ležaj zauzeo početni položaj. Radne površine oba mijeha su jednake.

- *Proporcionalno-diferencijalni pneumatski regulator*

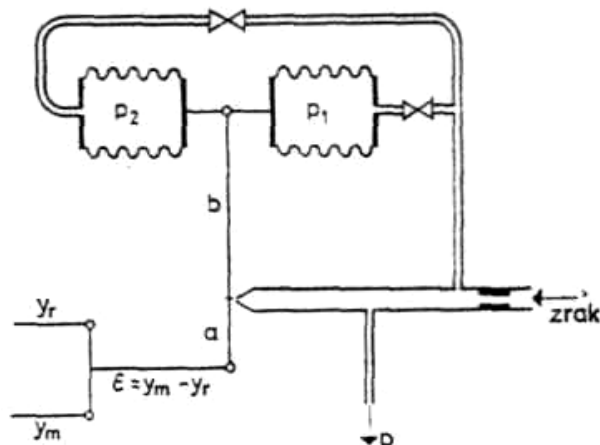
Prikaz izvedbe proporcionalno-diferencijalnog pneumatskog regulatora prikazan je na slici 6.44. Izveden je kao i proporcionalni regulator s time da je u priključnoj cevčici mijeha ugrađena prigušnica. Na taj način nakon delovanja skokovite promene δ poraste skokovito pritisak p , a pritisak u mijehu p_1 raste polagano i prouzrokuje postepeno pomicanje ležišta zaslonske pločice, a time i povećanje δ i pad pritiska p .



Slika 6.44 Pneumatski proporcionalno-derivacijski regulator.

- *Proporcionalno-integralno-diferencijalni pneumatski regulator*

Na slici 6.45. prikazana je izvedba proporcionalno-integralno-diferencijalnog pneumatskog regulatora. Nastao je povezivanjem prethodno opisanih regulatora, pa i nije potreban poseban opis njegovog ponašanja.

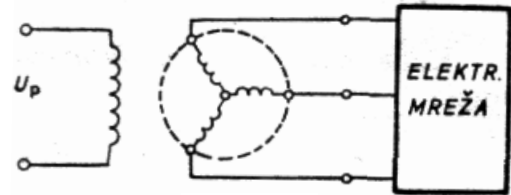


Slika 6.45 Pneumatski proporcionalno-integralno-derivacijski regulator.

7. OBJEKTI REGULACIJE

Objektom regulacije nazivamo proces ili sistem kojim želimo da upravljamo. Tako, na primer, kod regulisanog procesa proizvodnje pare u parogeneratoru (parnom kotlu) objekat regulacije je parogenerator. Kod sistema za regulaciju napona mrežnog generatora to je sam mrežni generator. Rezervoar sa tečnošću je objekat regulacije u sistemu za regulaciju nivoa tečnosti u tom rezervoaru itd.

Više puta u toku izlaganja gradiva je naglašeno da regulator mora da uskladi dinamiku signala upravljanja sa dinamičkim osobinama procesa koji se odvija u objektu regulacije da bi regulacioni proces bio uspešan i kvalitetan. Prema tome, za uspešno rešenje zadatka automatske regulacije veliki značaj ima dobro poznavanje dinamičkih karakteristika procesa koji se odvija u regulisanom objektu. Pored toga, potrebno je poznavanje uzroka koji izazivaju promene regulisane veličine u odnosu na zadanu vrednost. Uzroci promene izlazne veličine kod neregulisanih procesa mogu se podeliti na dve opšte vrste: na promene ulazne veličine procesa i na spoljne poremećaje. Uzmimo kao primer objekta regulacije mrežni generator (slika 7.1). Ulazna veličina je pobudni napon, a izlazna veličina je napon na izlaznim šinama generatora.



Slika 7.1

Izlazni napon generatora jednak je indukovanj elektromotornoj sili umanjenoj za pad napona na unutrašnjem otporu (ot-poru namotaja), koji stvara struja opterećenja:

$$U = E - R_g I.$$

Indukovana elektromotorna sila E je srazmerna pobudnom naponu U_p :

$$E = kU_p,$$

gde je k — koeficijent srazmernosti.

Promene pobudnog napona predstavljaju promene ulazne veličine, a promene struje koje nastaju usled promene opterećenja u mreži predstavljaju spoljne poremećaje. Zadatak regulatora je da kompenzuje uticaj tih promena i da održava izlazni napon na konstantnoj vrednosti.

Neki objekti regulacije imaju osobinu da pri promeni ulazne veličine, posle okončanja prelaznog procesa, izlazna veličina se ustali na konstantnu vrednost. Takav je, na primer, mrežni generator.

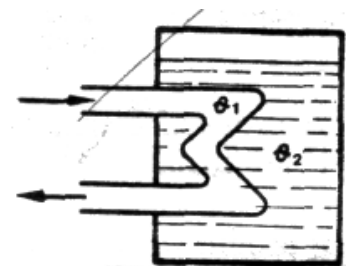
Objekti regulacije kod kojih se, pri određenoj promeni ulazne veličine, izlazna veličina neprekidno uvećava nazivaju se integracioni objekti. U tu grupu spada rezervoar sa tečnošću u kojem se deluje na nivo menjanjem protoka. Matematička veza između visine nivoa i protoka određena je relacijom:

$$h = h_0 + \frac{1}{S} \int_0^t Q(t) dt.$$

U slučaju da se protok promeni sa jedne konstantne vrednosti na drugu, pri kojoj nivo počinje da raste, nivo će neprekidno da raste iako je protok konstantan. O ovoj osobini rezervoara sa tečnošću se mora voditi računa pri projektovanju regulatora nivoa.

Veliki broj objekata regulacije ima veoma izražene osobine inercije. Tu spadaju razni izmenjivači toplote, alatne mašine sa masivnim pokretnim delovima i dr.

Neka je temperatura medija, posredstvom kojeg se prenosi toplota θ_1 , a temperatura medija na koji se prenosi toplota θ_2 (slika 7.2). Brzina, kojom se prenosi količina toplote q kroz zidove cevi, iznosi:



Slika 7.2

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_\theta} \quad (7.1)$$

gde je R_θ — toplotna otpornost zidova cevi. S druge strane, količina toplote q , kojom raspolaže medij na temperaturi θ_2 , izračunava se:

$$q = C_\theta \cdot \theta_2 + q_0 \quad (7.2)$$

gde je C_θ - toplotni kapacitet medijuma.

Primenom operacije diferenciranja na poslednju jednačinu dobija, se:

$$\frac{dq}{dt} = C_\theta \cdot \frac{d\theta_2}{dt} \quad (7.3)$$

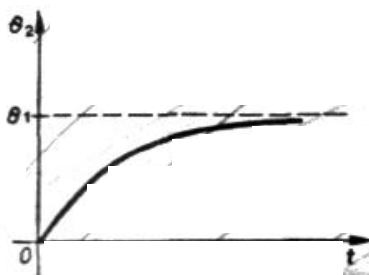
Kada se izraz (7.3) za dq/dt zameni u jednačinu (7.1) i dobijena jednačina sredi, dobija se:

$$R_\theta C_\theta \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2 = \theta_1(t) \quad (7.4)$$

Poznavanjem promene temperature θ_1 u zavisnosti od vremena t , pomoću jednačine (7.4) moguće je odrediti θ_2 . Neka promena temperature Θ_1 ima oblik odskočne funkcije. Tada je zavisnost (7.4) određena relacijom:

$$\theta_2(t) = \theta_1 \cdot (1 - e^{-t/R_\theta C_\theta}) \quad (7.5)$$

čiji je vremenski dijagram prikazan na slici 7.3.



Slika 7.3

Dinamičke osobine koje opisuje jednačina (7.4) imaju i mnogi drugi objekti regulacije. One bi se mogle izraziti opštom jednačinom:

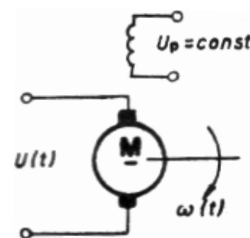
$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = Kx(t), \quad (7.6)$$

gde je $x(t)$ — ulazna, a $y(t)$ izlazna veličina. Parametar T uvek ima dimenziju vremena i naziva se vremenska konstanta objekta. K je konstanta proporcionalnosti između ustaljenih vrednosti ulazne i izlazne veličine objekta.

U jednačini (7.6), pored promenljive y , figurira i njen prvi izvod dy/dt . Jednačina tog oblika se u matematici naziva diferencijalna jednačina prvog reda. Objekti regulacije čije se dinamičke osobine mogu predstaviti tom jednačinom nazivaju se objekti sa osobinom inercije prvog reda.

Kao drugi primer objekta sa osobinom inercije prvog reda posmatraćemo elektromotor jednosmerne struje sa nezavisnom konstantom pobudom, kod kojeg je izlazna veličina brzina obrtanja rotora ω (slika 7.4). Ukoliko se zanemari induktivnost namotaja, dinamička ravnoteža u električnom kolu rotora je određena jednačinom:

$$R \cdot i + e_k = u(t), \quad (7.7)$$



Slika 7.4

gde je R — omski otpor namotaja, u — napon napajanja rotora, a e_k — kontraelektromotorna sila. Kao što je poznato od ranije, kontraelektromotorna sila je određena relacijom:

$$e_k = C'_e \omega, \quad (7.8)$$

gde je: C'_e - - električna konstanta motora, a ω — brzina obrtanja.

Osim toga, u svakom trenutku na osovini rotora postoji dinamička ravnoteža između obrtnog momenta i svih momenata opterećenja. Obrtni moment motora: sa nezavisnom pobudom srazmeran je struji rotora:

$$M = C'_m \cdot i, \quad (7.9)$$

gde je C'_m - mehanička konstanta motora.

Uzećemo, za početak, da moment opterećenja potiče od inercije obrtnih masa: Ovaj moment je određen relacijom:

$$M_p = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.10)$$

gde je J — ukupan moment inercije sveden na osovину rotora, dok je ugaono ubrzanje prikazano prvim izvodom ugaone brzine $d\omega/dt$.

Uzimajući u obzir jednačine (7.9) i (7.10), dinamička ravnoteža između obrtnog momenta i momenta opterećenja može se izraziti sa:

$$C'_m \cdot i = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.11)$$

Kada se reši ova jednačina po struji i , i dobijeni izraz, kao i izraz (7.8) za e_k zameni u jednačinu (7.7), dobija se:

$$\frac{RJ}{C'_e C'_m} \frac{d\omega}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C'_e} u(t). \quad (7.12)$$

Uvođenjem novih konstanti motora namesto onih u jednačini (7.12):

$$T_m = \frac{RJ}{C'_e C'_m}, \quad (7.13)$$

$$K_v = \frac{1}{C'_e},$$

Dobijamo

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega(t) = K_v u(t). \quad (7.14)$$

Veličina T_m ima dimenziju vremena i naziva se mehanička vremenska konstanta motora. Konstanta K_v se naziva brzinska konstanta motora. Ona predstavlja konstantu srazmernosti između ustaljene vrednosti ugaone brzine i napona na krajevima rotora. Kada je promena napona rotora $u(t)$ oblika odskočne funkcije, ugaona brzina u ustaljenom stanju je konstantna, pa je njen prvi izvod $d\omega/dt$ jednak nuli.

Iz jednačine (7.14) sledi da je tada:

$$\omega = K_v U.$$

Poređenjem jednačine (7.14) sa jednačinom (7.6) vidimo da su istog oblika. Znači da elektromotor jednosmerne struje, kao objekat regulacije, ima osobinu inercije prvog reda.

Objekti regulacije koji imaju integracione osobine i osobine inercije, mogu se opisati jednačinom oblika:

$$T^2 \ddot{y} + 2\xi T \dot{y} + y = k_1 x(t) + k_2 \dot{x}(t), \quad (7.15)$$

gde je: T - vremenska konstanta, ξ — koeficijent prigušenja, a k_1 i k_2 koeficijenti proporcionalnog i diferencijalnog delovanja. Izrazi: \dot{y} , \ddot{y} i \dot{x} predstavljaju prvi i drugi izvod izlazne veličine y , odnosno prvi izvod ulazne veličine x , po vremenu. Jednačina (7.15) se u matematici naziva diferencijalna jednačina drugog reda. Kao primer objekta regulacije čije dinamičke osobine opisuje ova jednačina može da posluži mašina koju pokreće elektromotor jednosmerne struje, a kod koje se javljaju momenti opterećenja usled inercije obrtnih masa, usled viskoznog trenja i moment opterećenja srazmeran udaljenju pokretnog dela mašine od početnog položaja. Svedeno na osovinu motora, sva tri momenta opterećenja se mogu izraziti u zavisnosti od ugla zaokretanja osovine motora. Kako se ugao može izraziti integralom ugaone brzine:

$$\alpha = \int \omega dt,$$

ukupan moment opterećenja se može prikazati relacijom:

$$M_p = J \frac{d\omega}{dt} + k_f \omega + k_c \int \omega dt, \quad (7.16)$$

Izjednačenjem desne strane jednačine (7.9) sa desnom stranom jednačine (7.16) možemo dobiti izraz za struju i . Dalje, zamenom izraza za i i e_k u jednačinu (7.7), posle sređivanja, dobijamo:

$$\frac{RJ}{C_e' C_m'} \frac{d\omega}{dt} + \left(1 + \frac{k_f}{C_e'}\right) \omega + \frac{k_c}{C_e'} \int \omega dt = u(t).$$

Uvođenjem konstanti:

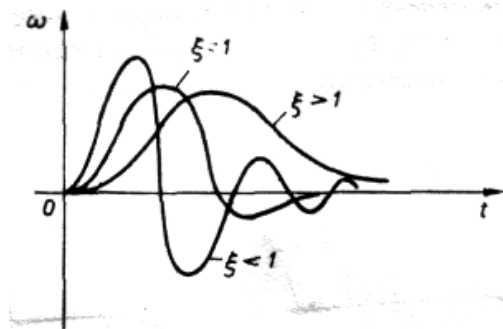
$$\begin{aligned} T_m^2 &= \frac{RJ}{C_e' C_m'} \cdot \frac{C_e'}{k_c}, \\ 2\xi T_m &= \frac{C_e' + k_f}{k_c}, \\ K &= \frac{C_e'}{k_c}, \end{aligned} \quad (7.17)$$

i primenom operacije diferenciranja, dobija se:

$$T_m^2 \ddot{\omega} + 2\xi T_m \dot{\omega} + \omega = K \dot{u}, \quad (7.18)$$

koja je istog oblika kao jednačina (7.15).

Kada se ulazni napon $u(t)$ menja u vidu odskočne funkcije, vremenski dijagram ugaone brzine $\omega(t)$ može imati jedan od oblika prikazanih na slici 7.5.



Slika 7.5

Vidimo da se u svim slučajevima motor konačno zaustavlja. To je zato što po pretpostavci, postoji moment opterećenja koji je srazmeran uglu koji opisuje osovinu. Kako ugao raste, raste moment opterećenja, pa ugaona brzina opada. Kada ovaj moment opterećenja dostigne vrednost polaznog momenta i motor mora da stane.