

KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET U SPLITU
SVEUČILIŠTA U SPLITU

ZAVOD ZA KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Ratimir Žanetić

VOĐENJE PROCESA U PROIZVODNJI

(Skripta za internu upotrebu)

Split, 2006.

PREDGOVOR

Skripta "Vođenje procesa u proizvodnji" namjenjena je kao ispitni materijal za predmete "Mjerenje i vođenje procesa" i "Automatsko reguliranje procesa" na preddiplomskom i diplomskom sveučilišnom studiju Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu. Skripta mogu poslužiti i kao radni materijal za procesne inženjere i projektante u industriji.

Obuhvaća dva dijela. Prvi dio se odnosi na vođenje procesa i sustavni pristup, dok se drugi dio odnosi na teoriju automatskog reguliranja i instrumentaciju za vođenje procesa.

Za savladavanje gradiva prikazanog u skripti, neophodna su znanja iz matematike i fizike, dobro poznavanje tehnoloških operacija i mjerne tehnike te određenih znanja iz kemijske kinetike i teorije reaktora.

Skripta predstavljaju temelje automatske regulacije koje pogonski i kemijski inženjer mora poznavati u obimu poznavanja teorije osnovnih operacija s kojima svakodnevno radi.

Objavljivanju skripte poseban doprinos dao je stručni suradnik Renato Stipišić, dipl.inž., koji je izradio crteže te prof.dr.sc. Edita Mitrović-Kessler i prof.dr.sc. Davor Rušić, koji su pregledali i recenzirali rukopis.

Prof.dr.sc. Ratimir Žanetić

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. TEMELJNI POJMOVI I POSTUPCI | 1 |
| 1.1. Laplaceova transformacija | 1 |
| 1.2. Prijenosna funkcija | 3 |
| 1.3. Blokovski dijagram | 4 |
| 2. UVOD U VOĐENJE PROCESA | 7 |
| 2.1. Sustav i vođenje | 7 |
| 2.2. Unutrašnji poredak sustava | 8 |
| 2.3. Vrste vođenja procesa | 10 |
| 2.3.1. Primjeri vođenih procesa | 16 |
| 3. REGULACIJSKI KRUG | 26 |
| 3.1. Strukturni prikaz regulacijskog kruga | 26 |
| 3.1.1. Prijenosna funkcija regulacijskog kruga | 27 |
| 3.1.2. Proces prvog reda u regulacijskom krugu | 29 |
| 3.1.3. Proces drugog reda u regulacijskom krugu | 30 |
| 3.2. Značajke regulacijskog kruga | 31 |
| 3.2.1. Stabilnost | 31 |
| 3.2.2. Routhov kriterij stabilnosti | 33 |
| 3.2.3. Nyquistov kriterij stabilnosti | 35 |
| 4. INSTRUMENTACIJA U REGULACIJSKOM KRUGU | 42 |
| 4.1. Regulatori | 42 |
| 4.1.1. Vladanje regulatora | 43 |
| 4.1.2. Izvedbe regulatora | 49 |
| 4.2. Regulacijski ventili | 60 |
| 4.2.1. Karakteristike ventila | 62 |
| 4.2.2. Prijenosna funkcija ventila | 64 |
| 4.2.3. Određivanje veličine ventila | 66 |
| 4.3. Ostale komponente u regulacijskom krugu | 67 |
| 4.3.1. Pneumatsko pojačalo | 67 |
| 4.3.2. Elektromagnetski pretvornik | 68 |
| 4.3.3. Postavnici ventila - pozicioneri | 68 |

1. TEMELJNI POJMOVI I POSTUPCI

1.1. Laplaceova transformacija

Rješavanje običnih linearnih diferencijalnih jednačbi, naročito ako su višeg reda može biti veoma složeno. Engleski fizičar O. Heaviside, svodeći rješavanje na jednostavniji način, uspješno je primjenio tzv. operatorski račun. Za operaciju derivacije primjenio je d/dt operator s , tako da se diferencijalna jednačba

$$a_n \frac{d^n x_i}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_i}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_i}{dt} + a_0 x_i = b_0 x_n \quad (1.1)$$

pretvara u oblik

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) x_i = b_0 x_n \quad (1.2)$$

Pri rješavanju ove jednačbe sa simbolom s se uz manja ograničenja formalno računa kao s faktorom te se daljnji računski postupak svodi na algebarski, odnosno diferencijalna jednačba svodi se na algebarsku.

Heavisideovu metodu su Bromwich i Wagner, pomoću linearne transformacije koju je dao Laplace, matematički dokazali i ona se danas pod imenom "Laplaceova transformacija" primjenjuje pri rješavanju diferencijalnih jednačbi s konstantnim koeficijentima.

Uz pomoć Laplaceove transformacije preslikavaju se veličine koje su funkcije vremena t , u nove veličine koje su funkcije kompleksne varijable, $s = \vartheta + j\omega$, gdje su ϑ i ω realne varijable, a $j = \sqrt{-1}$.

Na taj se način stvarnoj funkciji $f(t)$ pridružuje odgovarajuća funkcija $F(s)$, kao njena slika, gdje zadaci poprimaju jednostavniji oblik te se dolazi do lakših rješenja.

Jednadžba Laplaceove transformacije glasi:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1.3)$$

gdje $F(s)$ predstavlja funkciju u Laplaceovu području stvarne (realne) funkcije $f(t)$ ili kraće:

$$F(s) = L\{f(t)\} \quad (1.4)$$

Da bi integral (1.3) postojao postoje ograničenja na $f(t)$. Ta su ograničenja ispunjena kod linearne diferencijalne jednadžbe s konstantnim koeficijentima.

Za različite realne funkcije izračunati su integrali i sastavljene tablice L - transformiranih parova. Najčešće korišteni parovi u teoriji automatske regulacije prikazani su u tablici 1.1.

$f(t)$ za $t > 0$

$f(t) = 0$ za $t \leq 0$

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

| | |
|-------------------------|---|
| A | A / s |
| t | 1/s ² |
| t ⁿ | n!/s ⁿ⁺¹ |
| e ^{-at} | 1/(s + a) |
| (1/T)e ^{-t/T} | 1/(Ts + 1) |
| sin ωt | ω/(s ² + ω ²) |
| cos ωt | s/(s ² + ω ²) |
| e ^{-at} sin ωt | ω/(s ² + ω ²) + ω ² |
| e ^{-at} cos ωt | (s + a)/(s + a) ² + ω ² |
| f'(t) | s F(s) - f ₀ |
| f''(t) | s ² F(s) - s f ₀ - f ₀ ' |
| f(t-L) | e ^{-Ls} F(s) |
| 1 - e ^{-t/T} | 1/s (Ts + 1) |

Tablica 1.1. Najčešće korišteni parovi u teoriji automatske regulacije

1.2. Prijenosna funkcija

Regulacijski sustavi opisuju se općenito jednačbama oblika:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.5)$$

Ako se izvrši L-transformacija i jednačba sredi, dobije se:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) X(s)$$

gdje su sve početne vrijednosti varijable i njihove derivacije jednake 0.

Omjer

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i s^i}{\sum_{j=1}^n a_j s^j} \quad (1.6)$$

naziva se **prijenosna funkcija**, koja predstavlja transformaciju odzivne i pobudne funkcije uz početne uvjete jednake 0. Ona je veoma značajna u teoriji automatske regulacije jer daje sve osnovne podatke o sustavu. Članovi u brojniku predstavljaju ponašanje sustava obzirom na pobudnu funkciju, a članovi u nazivniku kašnjenje u sustavu.

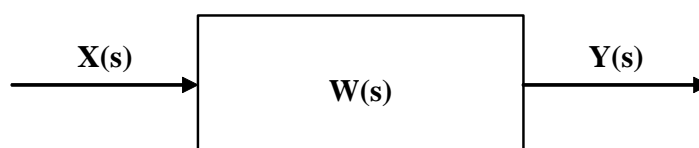
Polazeći od jednačbe (1.6) izlazna je promjena dana kao umnožak prijenosne funkcije i ulazne promjene

$$Y(s) = W(s)X(s) \quad (1.7)$$

pa je to osnovna relacija za analiziranje linearnih sustava. Na ulaz regulacijskog sustava mogu se narinuti različite ulazne promjene. Obično su to skokovita, linearna i jedinična impulsna (Diracova) funkcija, koje se nazivaju standardne pobudne (ulazne) funkcije.

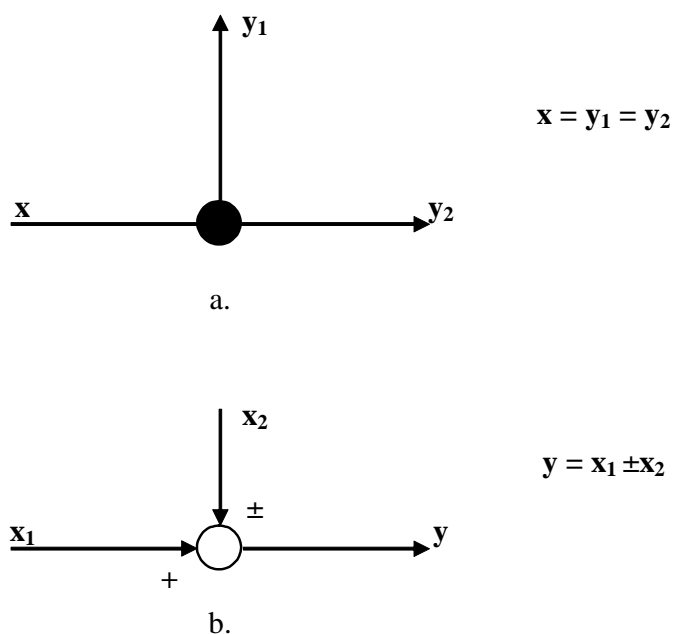
1.3. Blokovski dijagram

Blok dijagram ili strukturni prikaz je jednostavan slikovit prikaz transformirane linearne diferencijalne jednadžbe sustava. Svaki blok se sastoji od ulazne informacije, izlazne informacije i prijenosne funkcije sustava. Prikaz takvog blok dijagrama je na slici 1.1.



Slika 1.1. Blokovski prikaz sustava

Da bi se sustavi mogli slagati u složenije cjeline potrebno je postaviti simbol za grananje (čvor) i simbol za zbrajanje signala (kružić).



Slika 1.2. Slaganje sustava u složenije cjeline: a. grananje
b. zbrajanje

U slučaju grananja svaki pojedini izlazni signal jednak je ulaznom signalu. U slučaju zbrajanja izlazni signal iz zbrajala (sumatora ili komparatora) jednak je zbroju (ili razlici) ulaznih signala.

Dva ili više blokova mogu se vezati serijski ili paralelno. U slučaju serijskog spoja ukupna prijenosna funkcija je jednaka umnošku prijenosnih funkcija pojedinih blokova:

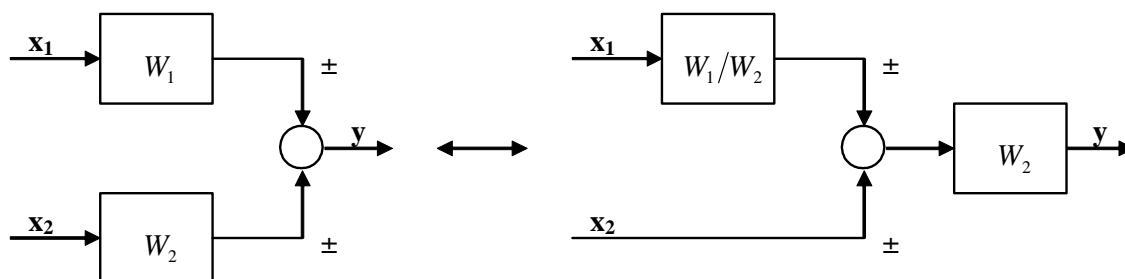
$$W_s = W_1 W_2 \dots W_n = \prod_{i=1}^n W_i \quad (1.8)$$

U slučaju paralelnog spoja ukupna prijenosna funkcija je jednaka zbroju prijenosnih funkcija pojedinih blokova:

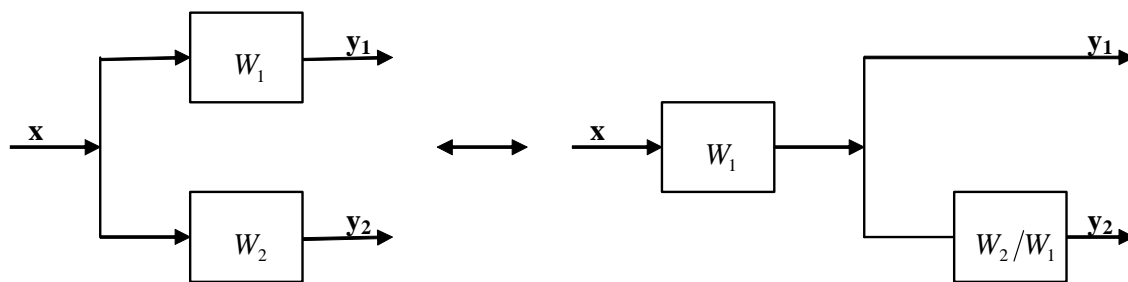
$$W_p = W_1 + W_2 + \dots + W_n = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1.9)$$

U blokovskom prikazu informacijski signal ide samo u jednom smjeru, tj. nema protudjelovanja idućeg bloka na predhodni.

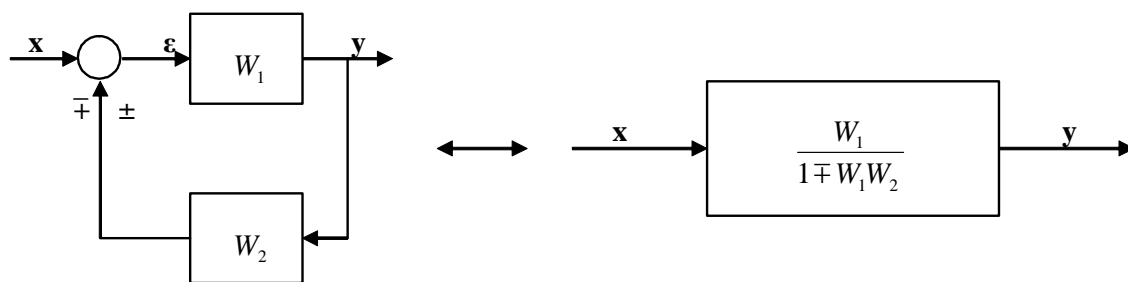
Na slici 1.3. prikazane su tri karakteristične identičnosti prikaza uz primjenu preuredbe blokovskih prikaza.



a.



b.



c.

Slika 1.3. Prikaz preuređenja blokovskih prikaza

2. UVOD U VOĐENJE PROCESA

2.1. Sustav i vođenje

Sustav je tvorevina koja u danoj okolini djeluje samostalno obavljajući neki svrhoviti zadatak. Pojmom **tvorevina** označava se bilo koja grupa elemenata što stoje u takvom uzajamnom odnosu, da ne postoji izdvojenih podgrupa. Sustav može biti prirodna, društvena, tehnička ili mješovita tvorevina, koja u danoj okolini djeluje samostalno s određenom svrhom. Prirodni sustavi su živa bića i njihove zajednice, društveni su zajednice ljudi, tehnički su različite ljudske tvorevine, a mješoviti sustavi su zajednice ljudi i tehničkih tvorevina.

Za različita djelovanja u prirodi, tehnici i društvu uvodi se naziv **proces**, a prostor u kojem se djelovanja odvijaju naziva se **procesni prostor**. U procesnom prostoru akumuliraju se tvari i energija što su potrebni za odvijanje određenog procesa. Iz okoline procesnog prostora u procesni prostor dobavljaju se tvari i energija potrebni za održavanje djelovanja, a okolini se iz procesnog prostora predaje proizvod djelovanja.

Količina akumulirane tvari i energije u procesnom prostoru čuva se **vođenjem**. Proces koji je povezan s djelovanjem vođenja čini jedinstvenu tvorevinu - sustav, kome su najvažnije značajke samostalnost i svrhovitost djelovanja u danoj okolini. Za samostalno djelovanje tvorevine potrebno je svojstvo vođenja. Samostalna tvorevina sadrži mehanizam za vođenje, koji joj omogućuje samostalno postojanje i djelovanje. Znanstveno se spoznajom vođenja za samostalno djelovanje tvorevine bavi **kibernetika**. Temelje znanstvene teorije kibernetike, koje su istovrijedne za tehničke i prirodne sustave postavio je Norbert Wiener (1948). On zastupa gledište da se svaki sustav sastoji od vođenog (proizvodnog) dijela i dijela za vođenje povezanih vezama pomoću kojih se prenose informacije. Signali koji dolaze od vođenog dijela k dijelu za vođenje informiraju pod kakvim uvjetima teče vođenje, postoje li nove okolnosti u vođenom dijelu, a dio za vođenje obrađuje te informacije u zavisnosti od postavljenog mu cilja na temelju određenih pravila. Kao

posljedicu obradbe donosi upravljačke odluke i predaje vođenom dijelu svoje upravljačke signale tj. informacije o načinu promjene stanja.

Kibernetika je sastavni dio znanosti o sustavima, koji se bavi vođenjem. To isto vrijedi i za **automatiku**, čiji je predmet istraživanje i izvedba tehničkih sustava za vođenje, dok je područje **automatizacije** uvođenje i primjena jedinica i uređaja za automatsko vođenje procesa. Pojam **automacija** se još jedino koristi u engleskom jezičnom području kao skraćeni izraz za automatizaciju. To je zapravo tehničko-ekonomska disciplina, koju čine sve tehničke, organizacijske i ekonomske discipline međusobno povezane radi provođenja i ostvarivanja najbolje moguće proizvodnje.

2.2. Unutrašnji poredak sustava

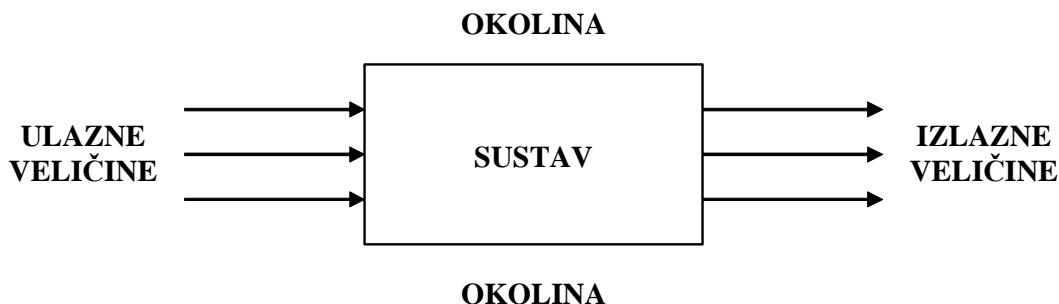
Osnovna značajka sustava je **samostalnost djelovanja**, koja je ostvarena unutrašnjim poretkom i međusobnim djelovanjem jedinica sustava.

Sustav čine: **proizvodni dio i dio za vođenje**.

Postoje dvije temeljne skupine sustava:

- a. Sustavi kojima svrhovito djelovanje nije uvjetovano mijenjanjem mjesta u prostoru. Njihovo proizvodno djelovanje naziva se **proizvodnim procesom** ili kraće **procesom**. Proces se vodi radi ostvarivanja svrhovite preradbe tvari ili pretvorbe energije.
- b. Sustavi kojima je svrhovito djelovanje određeno mijenjanjem mjesta u prostoru. Proizvodno djelovanje ove skupine sustava naziva se **vođenim objektom** ili **vođenim dijelom** ili kraće **objekt**. Objekt se vodi kako bi se ostvarilo svrhovito gibanje.

Sustav nije tvorevina koja je izdvojena od okoline, tako da uvijek postoji veza **okolina - sustav** i veza **sustav - okolina** (slika 2.1)



Slika 2.1. Odnos sustava i okoline

Djelovanje okoline na sustav predočeno je ulaznim strelicama, a pripadane veličine **ulaznim veličinama**, dok je djelovanje sustava na okolinu predočeno izlaznim strelicama, a pripadne veličine **izlaznim veličinama**.

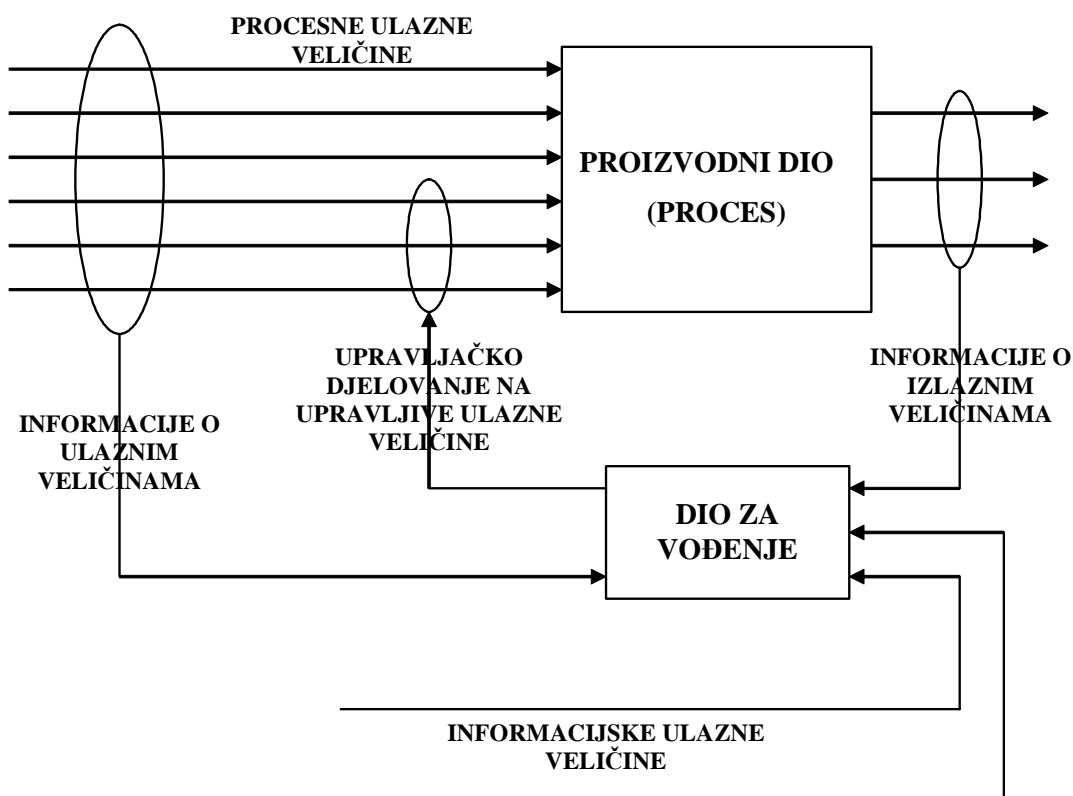
Ulazne veličine karakteriziraju tvar ili energiju što ih procesni prostor (sustav) izmjenjuje s okolinom, jer su mogući uzrok promjene stanja akumulacije. Informacija o svrsi uzima se kao posebna ulazna veličina i zato se zove **informacijska ulazna veličina** i ona je u pravilu uvijek upravljiva veličina, dok se ostale ulazne veličine mogu označiti kao **procesne ulazne veličine**.

Izlazne veličine karakteriziraju stanje akumulacije tvari i energije u procesnom prostoru, pa tako pokazuju stanje procesa.

Svojim djelovanjem sustav povezuje izlazne i ulazne veličine u skladu s informacijom o svrsi.

Sve ulazne veličine mogu biti **upravljive** i **neupravljive**. Na upravljive ulazne veličine može se utjecati, a na neupravljive ne može.

Za sve sustave svojstven je sličan unutrašnji poredak jedinica. Mogućnost njihovih veza i međudjelovanja predočuje se općenito kao na slici 2.2.



Slika 2.2. Opći prikaz građe sustava

2.3. Vrste vođenja procesa

Sustave za automatsko vođenje može se svrstati prema cilju vođenja, načinu vođenja, načinu prijenosa signala kroz sustav za vođenje ili prema općim svojstvima sustava.

a. Podjela sustava prema cilju vođenja

Cilj vođenja određuje kako će sustav za vođenje održavati vrijednost vođene (izlazne) veličine. Mogući su ovi osnovni slučajevi vođenja:

1. Održavanje unaprijed određenih zakona promjene vođene veličine, tj. prema unaprijed postavljenom pravilu.

2. Održavanje takvih zakona promjene vođene veličine pri čemu proces djeluje u skladu s postavljenim kriterijima i kod promjena unutrašnjih odnosa. Ti zakoni omogućuju prilagodbu djelovanja sustava promjenama unutarnjih odnosa u skladu s postavljenim kriterijima.
3. Održavanje takvih zakona promjene vođene veličine da proces djeluje u skladu s postavljenim kriterijima i pri promjenama odnosa u procesu uz istodobno uočavanje i savladavanje novih povoljnijih i savršenijih zahvata vođenja. Kod toga se na temelju iskustva o vladanju sustava određuju novi zahvati vođenja.

Najviše se primjenjuje vođenje na temelju prvog cilja. Sustavi vođeni u tom smislu označuju se kao **regulacijski sustavi**, postupak vođenja je **reguliranje**, a osnovna jedinica za vođenje je **regulator**.

Drugi se slučaj primjenjuje kad se žele postići i održati najpovoljniji proizvodni uvjeti pri promjenljivim radnim uvjetima u procesu. Sustavi tako vođeni su **prilagodljivi** ili **adaptivni sustavi**, postupak vođenja **prilagodljivo** ili **adaptivno vođenje**, a osnovna jedinica koja se dodaje regulatorskom sustavu je **jedinica za prilagodbu**.

Treći slučaj obuhvaća najsavršenije sustave, čija je glavna značajka da tijekom vremena poboljšavaju i usavršavaju svoje djelovanje. Osnova takvog djelovanja je "učenje" na temelju svojih upravljačkih djelovanja. Takvi sustavi nazvani su **samouki sustavi**, kod kojih je osnovnoj jedinici za vođenje dodano **računalo** koje joj korigira djelovanje.

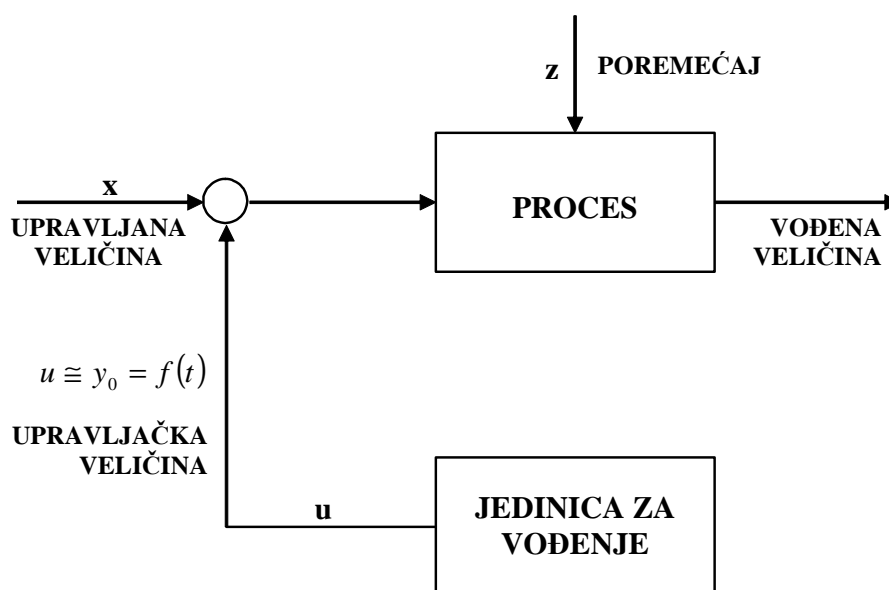
Primjena nekog od ovih slučajeva vođenja bitno zavisi o karakteristikama proizvodnog procesa, radi čega se istražuje i matematički opisuje dinamičko vladanje različitih proizvodnih procesa.

b. Podjela sustava prema načinu vođenja

Prema načinu vođenja sustavi se svrstavaju zavisno o načinu dobivanja informacija i stanju vođenog procesa. Tako postoje dvije načelne mogućnosti: vođenje prema poremećajnoj (ulaznoj) veličini i vođenje prema izlaznoj veličini.

Pri vođenju prema poremećajnoj veličini, koja je ulazna, nije zatvoren tok signala s izlaza procesa na ulaz preko sustava za vođenje, kao što je to u drugom slučaju vođenja prema izlaznoj veličini. Zato se sustav građen na prvi način naziva **otvoreni sustav**, a sustav građen na drugi način **zatvoreni sustav**.

Osnovni prikaz otvorenog sustava vođenog prema unaprijed zadanom zakonu prikazan je na slici 2.3.

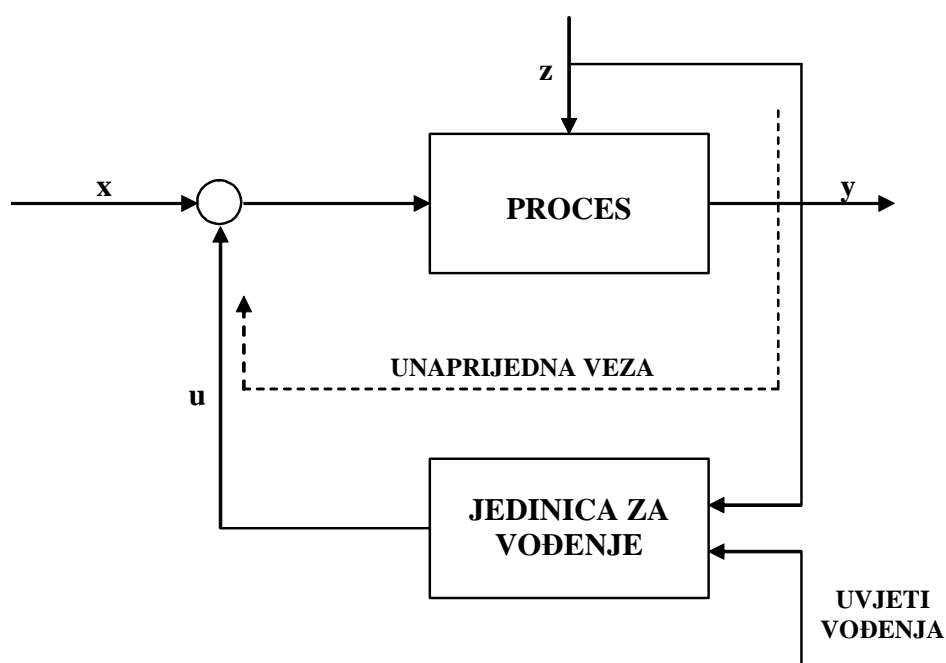


Slika 2.3. Prikaz sustava vođenog prema unaprijed zadanom programu

U nas se za ovakav sustav po uzoru na njemačku literaturu upotrebljava naziv **upravljanje** (njem. Steuerung). To je posebni slučaj vođenja prema poremećaju. Veličina i vremensko pojavljivanje poremećaja unaprijed je poznato. Zakon vođenja $y_0 = f(t)$ se postavlja prema

određenom cilju ili na temelju iskustva o promjenama stanja procesa tako da djeluje usporedo s promjenama stanja i održava određenu vođenu veličinu stalnom. Zakon vođenja $y_0 = f(t)$ se naziva **zakon djelovanja** ili **program**, a veličina y_0 , koja na ulazu jedinice za vođenje djeluje prema tom zakonu **vodeća veličina**.

Kod otvorenih sustava jedinica za vođenje može stvarati upravljačko djelovanje, osim po unaprijed zadanom zakonu, i prema trenutačnom stanju poremećajne veličine. Osnovni prikaz sustava vođenog prema poremećaju može se prikazati:

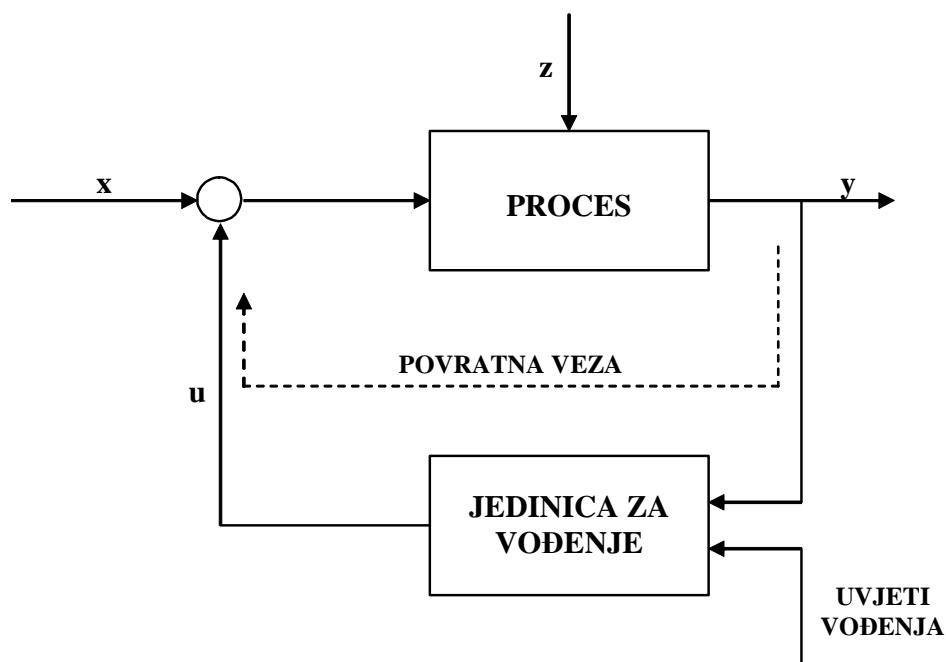


Slika 2.4. Osnovni prikaz sustava vođenog prema poremećaju

Ovakvo se vođenje označuje kao **unaprijedno vođenje**, jer se ostvaruje **unaprijednom vezom** tj. vezom kojom se djelovanje poremećaja otkriva i sprječava unaprijed.

Osnovni nedostatak otvorenih sustava je u tome da jedinica za vođenje nema uvid u svoje zahvate. Premda izlazna veličina može dobro slijediti odabranu vodeću veličinu, takvim vođenjem nije moguće isključiti nepovoljan utjecaj različitih nepredviđenih poremećaja ili izmjena odnosa u procesu. Zato se upravljanje i unaprijedno vođenje upotrebljavaju samo u posebnim slučajevima.

U zatvorenim sustavima stvara se upravljačko djelovanje prema izlaznoj veličini, tj. tako da se utjecaj poremećaja otkriva na izlazu i spriječava djelovanjem jedinice za vođenje na ulaz procesa uz pomoć **povratne veze**. Osnovni prikaz takvog zatvorenog kruga za vođenje dan je na slici 2.5.



Slika 2.5. Osnovni prikaz zatvorenog sustava

Ovdje jedinica za vođenje stvara upravljačke naloge na temelju odstupanja stvarne vrijednosti vođene veličine od zakona određenog s ciljem vođenja. Karakteristika vođenja u zatvorenim sustavima je postojanje zatvorenog kruga djelovanja. To je načelo vođenja, koje dopušta da se izlazna veličina procesa vodi po željenom zakonu nezavisno o obliku i jakosti poremećaja. Ono omogućuje vođenje procesa s različitim vladanjima, a i procesa u kojima su radni uvjeti promjenljivi, što je neostvarivo u slučaju otvorenih sustava.

Regulacijski sustavi su u načelu uvijek zatvoreni sustavi, a prilagodljivi i samouki sustavi također se izvode kao zatvoreni sustavi.

c. Podjela sustava prema prijenosu signala

Osnovne značajke za svrstavanje sustava za vođenje prema prijenosu signala jesu kontinuiranost i diskontinuiranost djelovanja pojedinih jedinica sustava.

Kontinuiran je svaki sustav u kojem vremenski kontinuiranoj ulaznoj veličini odgovara kontinuirana promjena izlazne veličine.

Diskontinuiran je takav sustav u kojem se jedna ili više veličina mijenja diskontinuirano. Npr., izlazna veličina se mijenja diskontinuirano pri kontinuiranoj promjeni ulazne veličine.

d. Podjela sustava prema općim svojstvima sustava

Zavisnosti izlaznih i ulaznih veličina su karakteristične za vladanje sustava. Njihov matematički opis prikladna je osnova za svrstavanje sustava. Prema obliku statičke zavisnosti izlaznih i ulaznih veličina razlikuju se dvije skupine sustava: **linearni** i **nelinearni**.

Linearni sustav ima linearnu statičku karakteristiku, dakle ima oblik pravca. Njegovo dinamičko vladanje opisuju linearne diferencijalne jednačbe.

Nelinearni sustav je takav sustav u kojem najmanje jedan od statičkih odnosa karakterističnih veličina nije linearan. Tako u ovu skupinu spadaju svi sustavi kojima statička karakteristika nije pravac. Nelinearni mogu biti i sustavi s promjenljivim parametrima, s raspodjelnim parametrima, sa zaostajanjem, te impulsni, ako se unutar njih bilo gdje remeti linearni odnos.

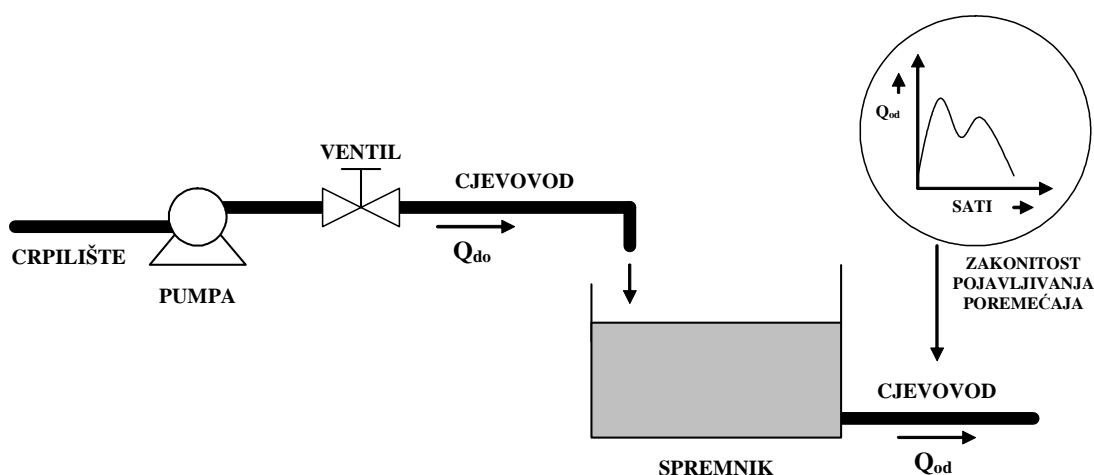
Nelinearnost može biti svojstvena vođenom procesu i sustavu za vođenje. U slučaju vođenog procesa radi se o neotklonivoj nelinearnosti, a kod sustava za vođenje o namjernoj nelinearnosti.

Pri analizi i sintezi sustava za automatsko vođenje treba imati na umu da su najpotpunije razrađeni teorija i primjena običnih linearnih sustava. Zato se i teži zadatak vođenja, gdje god je to moguće, svesti na takav oblik u kojem je moguće upotrijebiti postupke istraživanja linearnih sustava.

2.3.1. Primjeri vodenih procesa

a. Upravljanje

Kao primjer vođenja upravljanjem prikazano je vodoopskrbno postrojenje na slici:

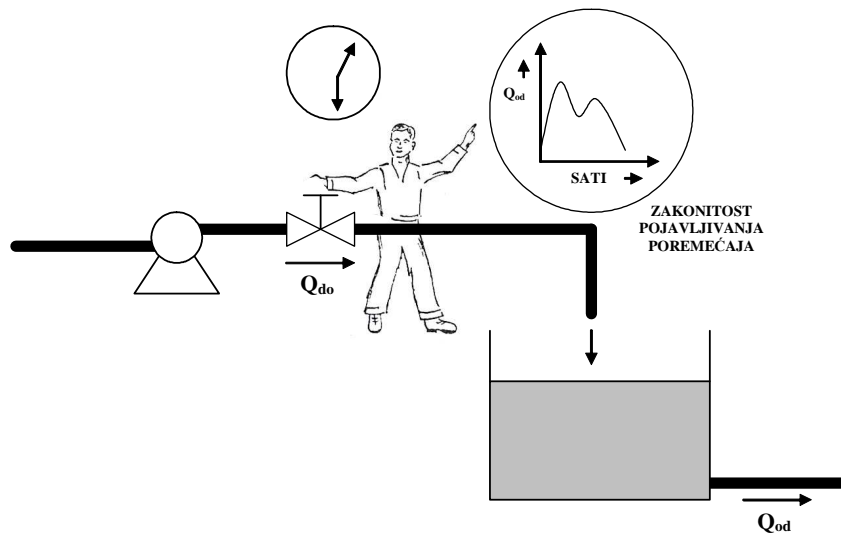


Slika 2.6. Vodoopskrbno postrojenje vođeno upravljanjem

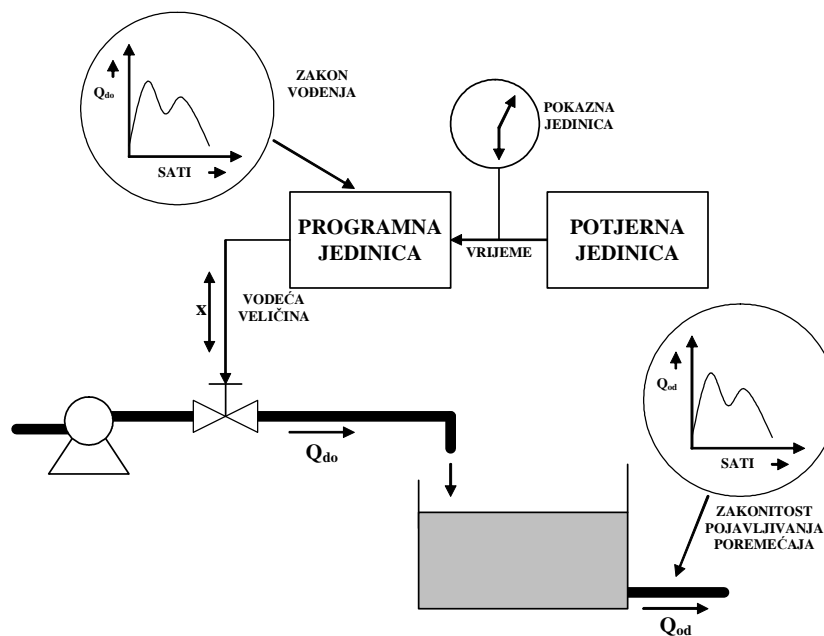
Proces treba voditi tako da se potrošačima osigura stalni tlak u cjevovodu u bilo koje doba dana. Kao poremećaji u procesu mogu biti: smetnje u otpremi vode u spremnik ili nejednoliki potrošak vode. Oba poremećaja izazivaju promjene razine u spremniku, promjene tlaka u razvodnom cjevovodu i narušavanje suvislosti procesa.

Pretpostavit ćemo da proces djeluje bez smetnji u dopremi vode i da je potrošak vode jednoliko promjenljiv po zavisnosti prikazanoj na slici 2.6. Ta zakonitost pojavljivanja poremećaja u tijeku dana predstavlja osnovu za odluku o načinu vođenja. U skladu s tom

zakonitosti djeluje se na dotok vode i održavanje stalne razine u spremniku. Prikazana su dva rješenja zadatka. Na slici 2.7.a. prikazano je rješenje zadatka vođenja ručnim upravljanjem.



a.



b.

Slika 2.7. Ručno i automatsko upravljanje

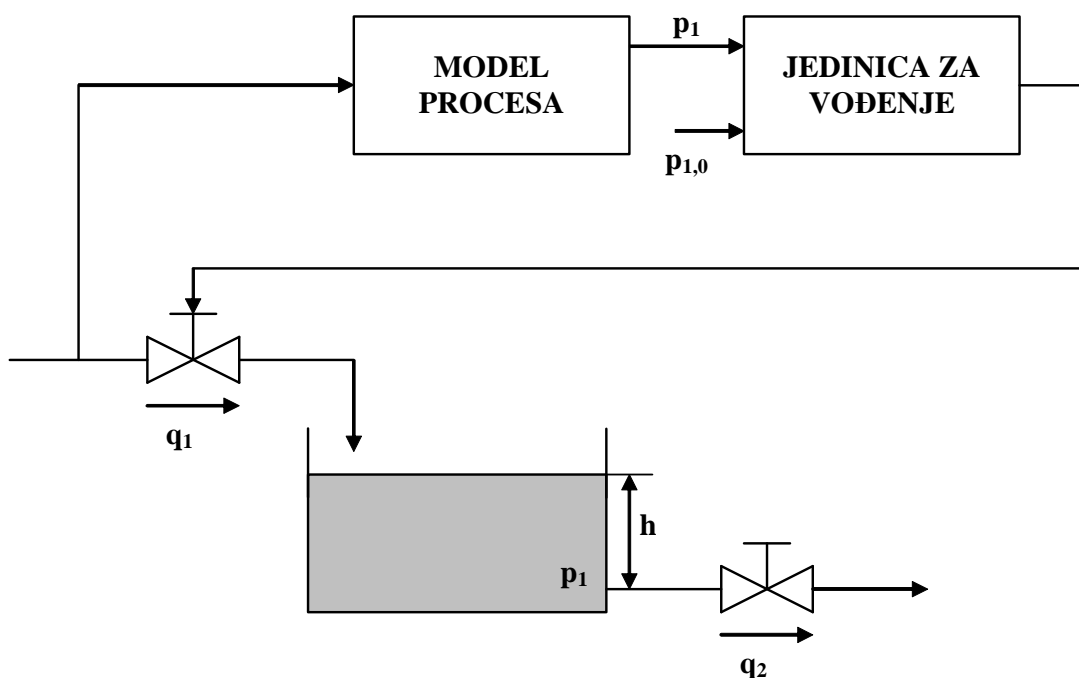
Kod ručnog upravljanja (slika a.) čovjek prati vrijeme i prikaz zakonitosti pojavljivanja poremećaja te namještanjem pritege ventila propušta potrebnu količinu vode.

Na slici b. zadatak je riješen automatskim upravljanjem. Čovjek je zamjenjen upravljačkom spravom, koja se sastoji od satnog mehanizma koji tjera programnu jedinicu, kojoj je program zadan na temelju zakonitosti pojavljivanja poremećaja. Programska jedinica na svom izlazu daje vodeću veličinu (pomak pritege ventila), koja djeluje tako da ventil propušta vodu ovisno o potrošku.

Kod ovih sustava (otvoreni sustavi za vođenje), ni čovjek, ni upravljačka sprava ne dobivaju podatke o odzivu procesa na svoje zahvate, što je glavno obilježje upravljanja.

b. Unaprijedno vođenje

Primjer sustava vođenog unaprijednom vezom prikazan je na slici 2.8.

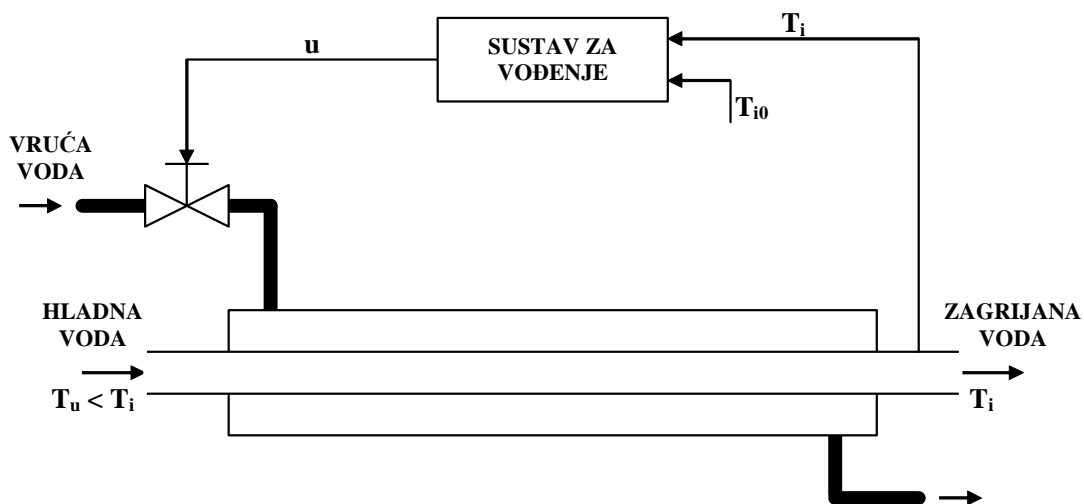


Slika 2.8. Unaprijedno vođenje

Osnovna značajka ovog vođenja je u tome da jedinica za vođenje djeluje na temelju informacija o poremećaju (ulaznoj veličini) koje dobiva unaprijednom vezom. Te informacije o ulaznoj veličini idu na unaprijedno računanje upravljane veličine. Zbog toga sustav unaprijednog vođenja u sebi mora sadržavati računalu. Ono prati ulazne poremećaje, računa materijalnu i energetska bilancu procesa te upravlja količinom dotoka materijala i energije. Čim dođe do nagle promjene ulazne veličine, sustav unaprijedne veze odmah izračuna kakva treba biti upravljačka veličina na ulazu u regulacijski ventil i protok q_1 kroz ventil, kako ne bi došlo do promjene razine h . Ta se operacija mora obaviti unaprijed i dovoljno prije nego što se promjena poremećaja može odraziti na proces tj. na promjenu razine.

c. Reguliranje

Primjer vođenja u zatvorenom krugu na osnovu djelovanja povratne veze prikazan je za toplinski izmjenjivač za zagrijavanje vode.



Slika 2.9. Izmjenjivač topline

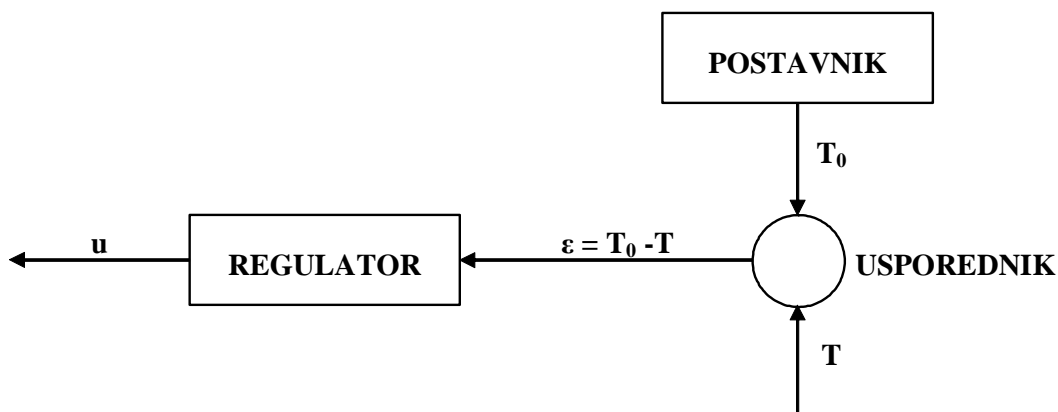
Izmjenjivač topline na slici 2.9. služi za zagrijavanje vode na temperaturu T_{i0} , koja mora biti stalne vrijednosti bez obzira na poremećaje koji nastupaju u tijeku rada. Izvor

poremećaja može biti promjenljiva količina i temperatura vode na ulazu u izmjenjivač, te promjenljiva količina i temperatura vode za zagrijavanje. Poremećaji su nepredvidivi i različite jačine.

Suvislost djelovanja ovakvog sustava može se ostvariti jedino vođenjem u zatvorenom krugu. Krug je izveden ovako: osjetilo temperature predaje jedinici za vođenje podatke o trenutačnoj vrijednosti izlazne temperature T_i . U jedinici za vođenje te se vrijednosti uspoređuju s podatkom koji odgovara željenoj vrijednosti temperature $T_{i,0}$ na izlazu, pa na temelju ustaljenog odstupanja $T_{i,0} - T_i$ stvara upravljačku veličinu koja djeluje na izvršnu spravu, tj. ventil u dotoku vode za zagrijavanje.

Djelovanje upravljačkog signala je takvo da djelovanjem na ulaznu veličinu nastoji poništiti poremećaj koji je izazvao odstupanje izlazne veličine. Zato se ovdje još govori i o negativnoj povratnoj vezi. U ovom slučaju to djelovanje je slijedeće: povećanje temperature vode na izlazu smanjuje količinu dotoka vode za zagrijavanje, a smanjenje temperature vode na izlazu povećava količinu vode za zagrijavanje. I u ovom primjeru moguće je, kao i kod upravljanja, **ručno** i **automatsko** reguliranje. Kod **ručnog** reguliranja čovjek čita promjene temperature na izlazu T_i i uspoređuje sa željenom vrijednosti temperature $T_{i,0}$. Na temelju odstupanja $T_{i,0} - T_i$ odlučuje o tome koliko je potrebno zatvoriti ili otvoriti ventil za dovod tople vode, kako bi se samnjilo nastalo odstupanje. Za razliku od ručnog upravljanja (primjer na slici 2.7.a.) ovdje je čovjek (voditelj) dio regulacijskog kruga, u kojem on ne upravlja procesom, već ga regulira, tvori povratnu vezu i sustav čini zatvorenim.

Kod **automatskog** reguliranja čovjek je zamijenjen regulatorom, tako da reguliranje teče automatski u skladu s opisanim načelom (slika 2.10.).



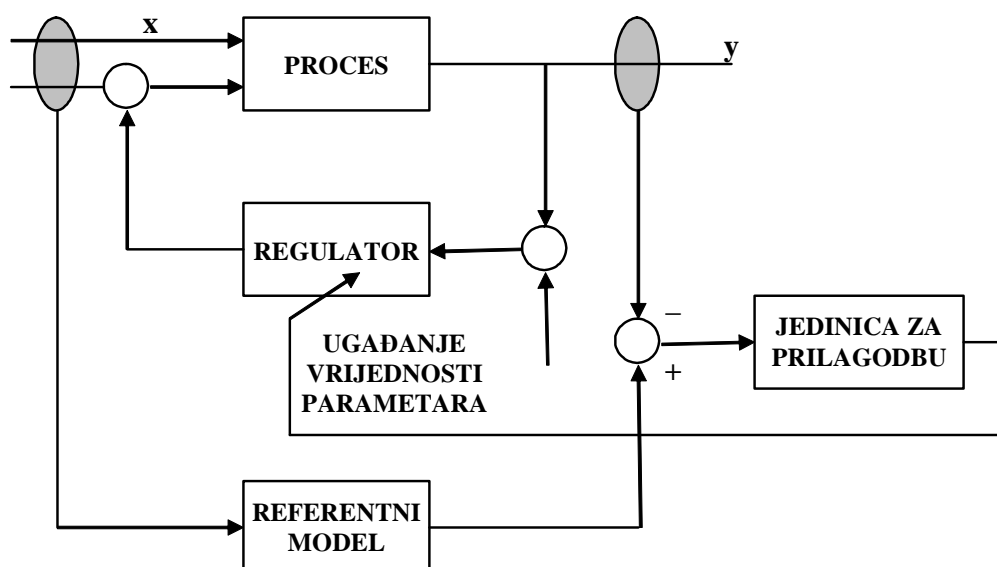
Slika 2.10. Prikaz jedinice za vođenje kod reguliranja

Da bi se regulirana veličina mogla usporediti s izmjerenom vrijednosti, potrebno ju je izraziti u istom obliku kao što je i izmjerena veličina: kao električnu ako je podatak s pretvornika električna veličina, a kao mehaničku ako je podatak s pretvornika mehanička veličina. Tako izražena vrijednost željene veličine naziva se **namještena vrijednost** i postavlja se na **postavnik**.

Zavisno od fizičke prirode izmjerene veličine postavnici mogu biti električni, mehanički, pneumatički ili hidraulički, pa kao signal daju električnu struju ili napon, pomak, tlak plina ili kapljevine. Oni su direktno vezani na **usporednik**, koji se najčešće izvodi kao električni mjerni most. Postavnik (servomotor) može biti električni motor, koji električnu energiju pretvara u mehanički zakretni moment ili pneumatski odnosno hidraulički, koji rade uz pomoć razlike tlaka plina ili kapljevine.

d. Prilagodljivo vođenje

Prilagodljivo vođenje omogućuje automatsko ugađanje parametara procesa ukoliko dođe do promjene uvjeta u radu. Jedinica za prilagodbu omogućuje sustavu da sačuva svrhovito vladanje pri nepredvidivim promjenama ulaznih veličina. Sustav s prilagodljivim vođenjem može se prikazati kao na slici 2.11.



Slika 2.11. Prilagodljivo vođenje procesa s pomoću referentnog modela

Kao što se vidi iz slike sustav prilagodljivog vođenja procesa se sastoji od osnovnog regulacijskog kruga kome je dodana **jedinica za prilagodbu**. Njezin zadatak je da na osnovi informacija o ulaznim i izlaznim veličinama ocjenjuje nove uvjete i prilagođuje djelovanje osnovnog regulacijskog kruga da bi se optimalizirao njegov odziv.

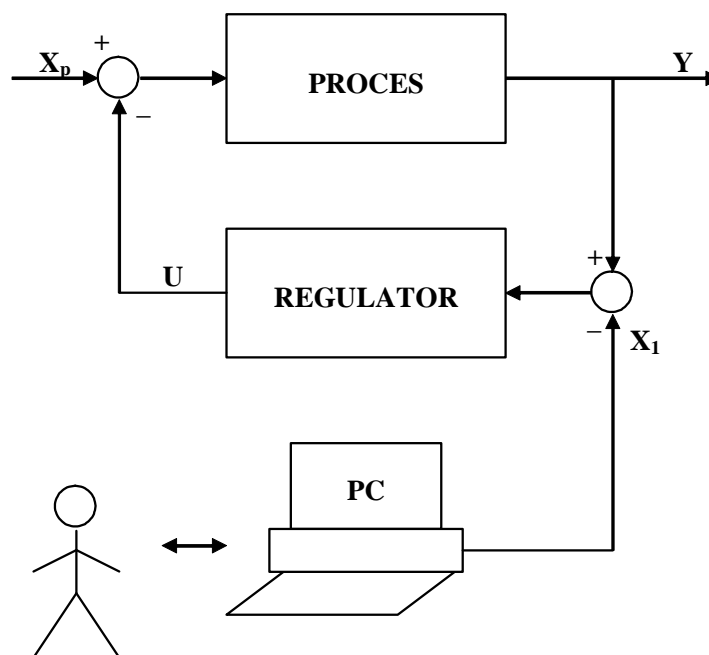
Kada dođe do poremećaja u regulacijskom krugu nastale promjene se uspoređuju sa stvarnim vrijednostima izlazne veličine i s vrijednostima što ih daje referentni model (matematički opis željenog stanja). Tako jedinica za prilagodbu ugađanjem vrijednosti parametara regulatora svodi na minimum razliku vrijednosti izlazne veličine referentnog modela i stvarne vrijednosti izlazne veličine. U tu svrhu obično se koristi računalo.

Prema tome prilagodljivi ili adaptivni sustav ima sposobnost da na temelju informacija o ulaznim i izlaznim veličinama, automatski prilagođuje svoje vladanje dok se kod pretpostavljenih poremećaja ne ostvari zadovoljavajuće djelovanje s obzirom na postavljenu svrhu.

e. Vođenje procesa računalom

Sredinom 1950-tih godina započelo je korištenje računala u vođenju procesa za optimalizaciju procesa, dok se u kasnim 1960-tim godinama primjenjuje direktno digitalno vođenje (DDC - Digital Direct Control), a početkom 1970-tih pojavljuje se distribuirani sustav vođenja procesa (DCS - Distributed Control System), kao prihvatljiva alternativa predhodnim načinima vođenja procesa.

U početku primjene računala za vođenje, koristilo se jedno veliko centralno računalo. Razvojem tehnologije poluvodičkih elemenata, uz primjenu PC-računala, uvodi se primjena većeg broja računala za vođenje proizvodnih procesa koji su povezani komunikacijskom mrežom. Tako se računalo može povezati procesom na dva načina: kaskadno i direktno.

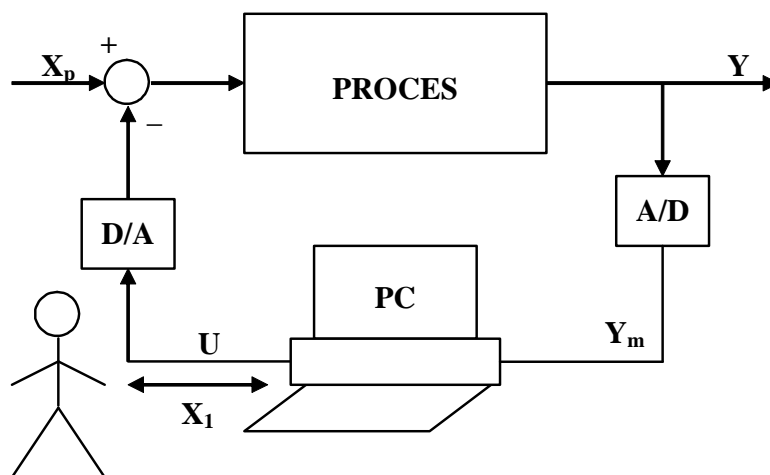


Slika 2.12. Kaskadni spoj računala i procesa

Na slici 2.12. prikazano je kaskadno povezivanje računala i procesa, pri čemu je proces neposredno upravljan s regulatorom u povratnoj vezi, a posredno s računalom. Pri tome

računalo predaje regulatoru ulaznu informacijsku veličinu X_1 , a voditelj koji upravlja procesom preko računala, mijenja ulazne veličine X_1 ili parametre regulatora.

U suvremenim industrijskim procesima primjenjuje se DDC, kod kojeg je isključen klasični regulacijski krug, a računalo je neposredno povezano s procesom, odnosno mjernim uređajem i izvršnom spravom (slika 2.13.)

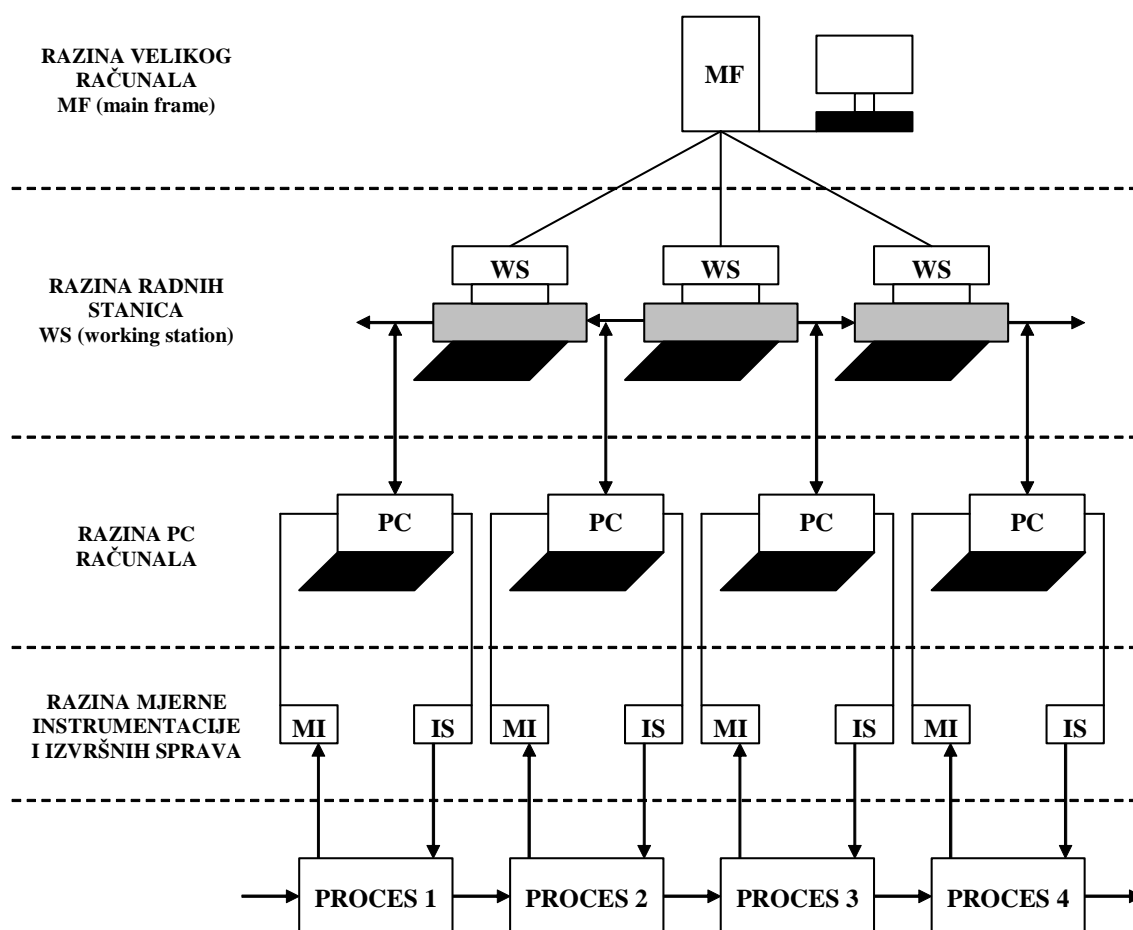


Slika 2.13. Prikaz DDC regulacijskog kruga

Komunikacija između računala i procesa omogućena je primjenom analogno-digitalnih pretvornika (A/D i D/A). Pri tome je algoritam upravljanja upisan u pamtilo računala i sve se upravljačke naredbe jednostavno mijenjaju i usavršavaju.

U industrijskim pogonima postoje dvije načelne mogućnosti primjene računala: centralizirano i decentralizirano vođenje. Kod centraliziranog vođenja jedno računalo vodi cijeli proizvodni sustav. Kod decentraliziranog vođenja proizvodni sustav je podijeljen u podsustave, pri čemu svaki podsustav ima svoj cilj djelovanja podređen cilju cijelog proizvodnog procesa. Ovaj se način naziva višerazinskim vođenjem (slika 2.14.). Procesne jedinice i računala su povezani u cjelinu koja ima organiziranu strukturu u više razina. Za vođenje se koristi veći broj računala raspodijeljenih u pogonu. Osnovnu razinu čine zasebne procesne jedinice koje su neposredno "on line" upravljane. Svaka procesna

jedinica povezana je s mjernim i izvršnim sustavom s posebnim računalom za vođenje. Mjernim sustavom se mjere procesne veličine stanja (temperatura, tlak, protok, pH i dr.), a izvršni sustav čine regulacijski ventili, sklopke, pumpe i dr. Na prvoj računalnoj razini se nalaze računala klase PC za neposredno upravljanje pojedinim procesnim jedinicama koje su povezane horizontalno. Informacije s razine neposredne proizvodnje prenose se na višu razinu, gdje se nalaze računala u klasi radnih stanica koja su također međusobno povezana horizontalno, a postoji i povezanost prema nižoj i višoj razini. Takva računala podržavaju distribuirane baze podataka o tekućoj proizvodnji kao i tehničku dokumentaciju o procesnim jedinicama. Na najvišoj razini se nalazi glavno računalo koje ima najveću procesnu moć obrade informacija.



Slika 2.14. Prikaz višerazinskog vođenja

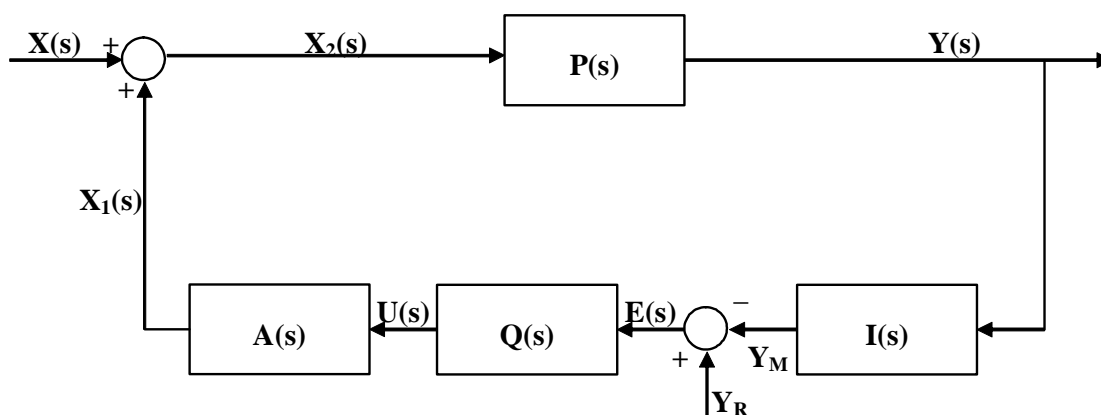
3. Regulacijski krug

Svrha regulacijskog kruga je održavanje vođene (regulirane) veličine na određenoj vrijednosti prema unaprijed postavljenom pravilu uz pomoć povratne veze.

Regulacijski krug čine: vođeni (regulirani) proces, mjerni pretvornik, usporednik, regulator i izvršna sprava.

3.1. Strukturni prikaz regulacijskog kruga

Pri analizi dinamičkog vladanje regulacijskog kruga temeljno je dinamičko vladanje jedinice regulacijskog kruga. Za istoznačno promatranje svih jedinica u regulacijskom krugu koristi se prijenosna funkcija. Pri tome je potrebno poznavati prijenosne funkcije za svaku jedinicu. Uz njihovu pomoć sastavlja se i koristi strukturni prikaz regulacijskog kruga prema slici 3.1.



Slika 3.1. Strukturni prikaz regulacijskog kruga

U strukturnom prikazu upotrebljavaju se slijedeće oznake i pojmovi:

$P(s)$ - prijenosna funkcija procesa, $P(s) = \frac{Y(s)}{X_2(s)}$

$I(s)$ - prijenosna funkcija mjernog pretvornika, $I(s) = \frac{Y_M(s)}{Y(s)}$

$Q(s)$ - prijenosna funkcija regulatora, $Q(s) = \frac{U(s)}{E(s)}$

$A(s)$ - prijenosna funkcija izvršne sprave, $A(s) = \frac{X_1(s)}{U(s)}$

$y(t)$ - vođena (regulirana) veličina, $Y(s) = L\{y(t)\}$

$y_n(t)$ - mjerena veličina, $Y_M(s) = L\{y_M(t)\}$

$y_R(t)$ - referentna veličina, $Y_R(s) = L\{y_R(t)\}$

$\varepsilon(s)$ - pogreška, $E(s) = L\{\varepsilon(t)\}$

$u(t)$ - upravljačka veličina, $U(s) = L\{u(t)\}$

$x_1(t)$ - upravljana veličina, $X_1(s) = L\{x_1(t)\}$

$x_2(t)$ - ulazna veličina, $X_2(s) = L\{x_2(t)\}$

$x(t)$ - ulazni poremećaj, $X(s) = L\{x(t)\}$

Za istraživanje vladanja kruga temeljna je prijenosna funkcija kruga koja može biti prijenosna funkcija $\frac{Y}{Y_R}$ ili $\frac{Y}{X}$.

3.1.1. Prijenosna funkcija regulacijskog kruga

Sustav se može opisati pomoću slijedećih jednadžbi:

$$Y(s) = PX_2(s)$$

$$X_2(s) = X(s) + X_1(s)$$

$$X_1(s) = AU(s)$$

$$U(s) = QE(s)$$

$$E(s) = Y_R(s) - Y_M(s)$$

$$Y_M(s) = IY(s)$$

$$Y(s) = P[X(s) + AQ(Y_R(s) - IY(s))]$$

$$Y(s) = PX(s) + PQA Y_R(s) - IQRPY(s)$$

$$(1 + IQAP)Y(s) = PX(s) + PQA Y_R(s)$$

$$Y(s) = \frac{P}{1 + IQAP} X(s) + \frac{PQA}{1 + IQAP} Y_R(s) \quad (3.1)$$

Kod određivanja prijenosne funkcije $\frac{Y}{Y_R}$ pretpostavlja se da je $X(s) = 0$ i onda je:

$$\frac{Y(s)}{Y_R(s)} = \frac{PQA}{1 + IQAP} \quad (3.2)$$

a kod određivanja prijenosne funkcije $\frac{Y}{X}$ pretpostavlja se da je $Y_R(s) = 0$, tako da prijenosna funkcija ima oblik:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{P}{1 + IQAP} \quad (3.3)$$

Dobivene prijenosne funkcije (3.1) i (3.2) nazivaju se prijenosne funkcije zatvorenog kruga. One imaju jednake nazivnike, $1 + G$, gdje je $G = IQAP$ i naziva se pojačanje petlje. Izjednačavanjem nazivnika s nulom dobije se jednačba:

$$1 + IQAP = 0$$

Pomoću nje se izvode zaključci o stabilnosti i odzivu kruga.

3.1.2. Proces prvog reda u regulacijskom krugu

Značajke regulacijskog kruga bit će prikazane na primjeru jednostavnog regulacijskog kruga u kojem proces ima vladanje sustava prvog reda, dok mjerni pretvornik i izvršna sprava imaju dinamičko vladanje idealno brzo, a regulator je čistog pojačanja i ima pojačanje k_R . Prema tome je:

$$\begin{aligned} I(s) &= 1 & Q(s) &= k_R \\ A(s) &= 1 & P(s) &= \frac{k}{\tau s + 1} \end{aligned}$$

Vođena (regulirana) veličina u zavisnosti o poremećajnoj i referentnoj veličini može se prikazati sa zavisnosti (3.1).

Promatrajući zavisnost $\frac{Y(s)}{X(s)}$, uz pretpostavku da je referentna veličina $Y_R(s) = 0$, te uz predhodne pretpostavke, dobije se prijenosna funkcija regulacijskog kruga:

$$P_R = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{P}{1 + IQAP} = \frac{\frac{k}{\tau s + 1}}{1 + \frac{kk_R}{\tau s + 1}} = \frac{k}{\tau s + 1 + kk_R} = \frac{\frac{k}{1 + kk_R}}{\frac{\tau s}{1 + kk_R} + 1} = \frac{k_N}{\tau_N s + 1} \quad (3.4)$$

Prema tome, regulator pojačanja k_R smanjio je statičku osjetljivost regulacijskog kruga na vrijednost k_N , kao i vremensku konstantu na vrijednost τ_N , što znači da se povećava brzina odziva. To pomaže održavanje stalne željene (referentne) veličine, odnosno da je odstupanje regulirane veličine praktički nula. Sustav je zadržao vladanje procesa prvog reda, ali s novim i manjim vrijednostima vremenske konstante i statičke osjetljivosti za $(1 + kk_R)$ puta, tj. za zbroj jedinice i umnoška statičkih osjetljivosti ostalih jedinica regulacijskog kruga.

3.1.3. Proces drugog reda u regulacijskom krugu

Istraživanje procesa drugog reda provodi se na isti način kao i za proces prvog reda u regulacijskom krugu. I u ovom slučaju prijenosne funkcije pretvornika, pojačala i izvršne sprave su konstante tj. $I(s)=1$, $Q(s)=k_R$ i $A(s)=1$, a prijenosna funkcija procesa je :

$$P(s) = \frac{k}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}.$$

Iz izraza (3.3) za proces drugog reda, koji je vođen pomoću proporcionalnog regulatora vrijedi:

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{\frac{k}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}}{1 + \frac{kk_3}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}} = \frac{k}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 + kk_R} = \frac{\frac{k}{1 + kk_R}}{\frac{\frac{1}{\omega_n^2} s^2}{1 + kk_R} + \frac{\frac{2\xi}{\omega_n} s}{1 + kk_R} + 1} = \\ &= \frac{k_N}{\frac{1}{\omega_{n,N}^2} s^2 + \frac{2\xi_N}{\omega_{n,N}} s + 1} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dakle, porast pojačanja uvjetuje porast neprigušene prirodne frekvencije kruga ω_n , a pad koeficijenta prigušenja kruga ξ . Ta promjena obiju veličina je u omjeru sa $\sqrt{1 + kk_R}$, tako

da je: $\omega_{n,N} = \omega_n \sqrt{1 + kk_R}$ i $\xi_N = \frac{\xi}{\sqrt{1 + kk_R}}$.

3.2. Značajke regulacijskog kruga

Analiza regulacijskog kruga može se izvesti na isti način kao što je to protumačeno na primjeru regulacije procesa prvog i drugog reda. Uz to opće promatranje vladanja još se istražuju i značajke regulacijskog kruga kao što su: stabilnost, osjetljivost, statička točnost, pouzdanost i dr.

3.2.1. Stabilnost

Načelno istraživanje vladanja regulacijskog kruga uvijek se povezuje s istraživanjem stabilnosti. Stabilnost rada prvi je temeljni zahtjev, koji mora zadovoljiti regulacijski krug. Ako taj uvjet nije ispunjen sustav je nesposoban za rad. Stabilnost se istražuje proučavanjem vladanja sustava pri malim utjecajima različitih poremećaja, koji izvedu sustav iz ravnotežnog stanja. Sustav koji je stabilan pri malim otklonima stabilan je u užem smislu. No, u mnogim praktičnim slučajevima sustavi koji su stabilni u užem smislu, stabilni su i u konačnim razumno velikim otklonima, tj. stabilni su u širem smislu. Poremećajima u regulacijskom krugu svojim djelovanjem suprotstavlja se regulator, koji u sustavu stvara nove radne uvjete i novo postojano stanje. Taj prijelaz sustava iz prethodno postojanog stanja u novo postojano stanje ne ostavlja se trenutačno, već se kao posljedica djelovanja poremećaja i regulatora u sustavu stvaraju prijelazne pojave. Zavisno o svojstvu regulacijskog sustava i veličine poremećaja moguća su tri načina vladanja sustava pri zbivanju prijelazne pojave: stabilno, nestabilno i oscilatorno vladanje.

Obično se pri analizi stabilnosti, koja je vezana uz rješavanje diferencijalnih jednadžbi sustava, uzima da je prijelaznu promjenu u sustavu izazvala δ -funkcija (to je trenutačan beskonačno visok i beskonačno kratak jedinični impuls). To se čini zato jer je njena Laplaceova transformacija funkcije 1, a njena odzivna funkcija odgovara prijenosnoj funkciji i proučavanje stabilnosti se svodi na proučavanje prijenosne funkcije, odnosno karakteristične jednadžbe sustava. Ta jednadžba ne smije imati pozitivne korjene da bi sustav bio stabilan.

Kao primjer za to može poslužiti općeniti oblik prijenosne funkcije za promatrani sustav:

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad n > m \quad (3.6)$$

gdje su s_1, s_2, \dots, s_n polovi, tj. korijeni polinoma karakteristične jednadžbe.

Pomoću njih se prijenosna funkcija rastavlja na parcijalne razlomke i prikazuje u obliku:

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{(s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n)} = \frac{k_1}{s - s_1} + \frac{k_2}{s - s_2} + \dots + \frac{k_n}{s - s_n} \quad (3.7)$$

iz čega se dobija odziv sustava na δ -funkciju u realnom području:

$$y(t) = k_1 e^{s_1 t} + k_2 e^{s_2 t} + \dots + k_n e^{s_n t} \quad (3.8)$$

Promatranjem funkcije (3.8) ocjenjuje se stabilnost sustava. Funkcija je eksponencijalna, tako da negativni predznak eksponenata, koje određuju polovi s_1, s_2, \dots, s_n znači da se vrijednosti članova funkcije smanjuju kad t teži u beskonačnost, pri čemu se odziv smiruje i sustav je stabilan. U slučaju pozitivnog predznaka eksponenta vrijednost funkcije raste kad t teži u beskonačnost i sustav je nestabilan.

Polovi prijenosne funkcije s_1, s_2, \dots, s_n su kompleksni brojevi, a to znači da se odziv smiruje kad su im realni dijelovi manji od nule (negativni), a teži u beskonačnost kad su im realni dijelovi veći od nule (pozitivni). Konstante k_1, k_2, \dots, k_n zavise o početnim uvjetima sustava i ne utječu na njegovu stabilnost. Istraživanje stabilnosti sustava tako je svedeno na ispitivanje položaja polova karakteristične jednadžbe u Gaussovoj ravnini.

Za olakšanje istraživanja razvijeni su različiti postupci, koji su nazvani **kriteriji stabilnosti**. Oni se načelno dijele na algebarske i analitičko-grafičke. Algebarski su: I.A. Višnjegranskog, A. Hurwitza i E.I. Routha, a analitičko-grafički: H. Nyquista, A.V.

Mihajlova i Bodea. Uz njih još postoji i posebno razrađena **grafička analiza**, kojom se izbjegava složena matematička analiza.

3.2.2. Routhov kriterij stabilnosti

U Routhovom kriteriju polazi se od pretpostavke da su svi koeficijenti karakteristične jednadžbe od a_n do a_0 pozitivni i da niti jedan nije nula. Stabilnost se ocjenjuje pomoću Routhove tablice u kojoj su raspoređeni koeficijenti karakteristične jednadžbe. Raspored koeficijenata izgleda ovako:

$$\begin{array}{c|ccc}
 R_n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \dots \\
 R_{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \dots \\
 R_{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 \dots \\
 & c_1 & c_2 & c_3 \dots
 \end{array} \quad (3.9)$$

gdje su a_i koeficijenti karakteristične jednadžbe

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

a koeficijenti b_1, b_2, \dots te c_1, c_2, \dots dobiju se unakrsnim množenjem koeficijenata iz prva dva reda prema slijedećem pravilu:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}} & b_2 &= \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}} \\
 c_1 &= \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1} & c_1 &= \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}
 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Ako u karakterističnoj jednadžbi nedostaje koji koeficijent umjesto njega se stavlja nula. U svakom slijedećem retku Routhova rasporeda ima sve manje članova. Ako se ispita jednadžba n-tog reda Routhov raspored sadrži $n + 1$ redak.

Prema Routhovom kriteriju nužan i dovoljan uvjet da sustav bude stabilan je da svi korijeni karakteristične jednadžbe imaju negativne realne dijelove i da su svi istog predznaka. U suprotnom slučaju, broj korijena s pozitivnim realnim dijelom odgovara broju promjena predznaka u prvom stupcu.

Ilustracija primjene ovog kriterija može se provjeriti na karakterističnoj jednadžbi:

$$s^5 + 2s^4 + s^3 + 10s^2 + 42s + 170 = 0$$

gdje treba odrediti stabilnost sustava.

Koeficijenti karakteristične jednadžbe su nenulti i pozitivni, tako da se može sastaviti Routhova tablica:

$$\begin{array}{cccc}
 5 & 1 & 1 & 42 \\
 4 & 2 & 10 & 170 \\
 3 & -4 & -43 & \\
 2 & 47 & 170 & \\
 1 & -1298 & & \\
 0 & 170 & &
 \end{array} \quad (3.11)$$

Računanje koeficijenta išlo je ovako:

$$b_1 = \frac{2 \times 1 - 1 \times 10}{2} = -4, \quad b_2 = \frac{2 \times 42 - 1 \times 170}{2} = -43, \quad b_3 = 0$$

$$c_1 = \frac{-4 \times 10 - 2 \times 43}{-4} = 31.5, \quad c_2 = \frac{-4 \times 170 - 2 \times 0}{-4} = 170$$

Jednadžba ima četiri korijena s pozitivnim realnim dijelom, što znači da je sustav stabilan.

3.2.3. Nyquistov kriterij stabilnosti

To je grafoanalitički kriterij pomoću kojeg se zaključuje na apsolutnu i relativnu stabilnost zatvorenih regulacijskih sustava na temelju amplitudno-fazne frekvencijske karakteristike prijenosne funkcije otvorenog regulacijskog kruga. Amplitudno-fazna frekvencijska karakteristika prijenosne funkcije otvorenog regulacijskog kruga može se dobiti i eksperimentalno, a crtanje je u obliku polarne krivulje u kompleksnoj ravnini.

Zatvoreni regulacijski sustav je stabilan ako niti jedan korijen karakteristične jednadžbe nema pozitivan realni dio odnosno ne leži na desnoj strani kompleksne ravnine.

Karakteristična jednadžba je:

$$F(s) = 1 + G(s)H(s) = 0 \quad (3.12)$$

a budući su $G(s)$ i $H(s)$ općenito razlomljene racionalne funkcije od s može se pisati:

$$F(s) = 1 + \frac{B_1}{N_1} \frac{B_2}{N_2} = \frac{N_1 N_2 + B_1 B_2}{N_1 N_2} = 0 \quad (3.13)$$

Može se zapaziti da su polovi funkcije otvorenog kruga identični polovima čitave karakteristične jednadžbe. Uvjet stabilnosti je da niti jedna od nula karakteristične jednadžbe ne leži na desnoj strani kompleksne ravnine. Nyquistov kriterij povezuje broj nula i polova prijenosne funkcije otvorenog kruga koje leže na desnoj strani kompleksne "s" ravnine sa polarnom krivuljom te prijenosne funkcije u "F(s)" ravnini, a matematički oslonac ima u Cauchyevu teoremu, koji opisuje odnos između stanja u ravnini kompleksne varijable s i stanja u ravnini razlomljene racionalne funkcije $F(s)$. On glasi: "Ako zatvorena kontura u "s" ravnini obuhvaća Z nula i P polova, onda njezina korespondentna krivulja u $F(s)$ ravnini obuhvaća ishodište $Z-P$ puta u istom smjeru obilaženja".

Ako se ovo primjeni na karakterističnu jednadžbu regulacijskih sustava polazi se od pretpostavke da je $Z = 0$. Da bi se uopće mogao razmatrati sustav obzirom na stabilnost, karakteristična jednadžba ne smije imati nula sa pozitivnim realnim dijelom pa se kriterij

$$N = Z - P$$

mijenja u

$$N = -P$$

gdje se pod P podrazumjeva broj polova karakteristične jednadžbe sa pozitivnim realnim dijelom. Kriterij stabilnosti bi u tom slučaju glasio: "Zatvoreni regulacijski sustav je stabilan ako polarni dijagram obilazi ishodište $F(s)$ ravnine onoliko puta u suprotnom smjeru koliko karakteristična jednadžba ima polova sa pozitivnim realnim dijelom".

Kod regulacijskih sustava su $G(s) = \frac{B_1}{N_1}$ i $H(s) = \frac{B_2}{N_2}$ obično razlomljene racionalne funkcije u faktoriziranom obliku gdje su pojedini faktori najviše drugog reda te im je lako naći korijene. Prema tome i prijenosna funkcija otvorenog kruga

$$W_{ot}(s) = G(s)H(s) = \frac{B_1}{N_1} \frac{B_2}{N_2} \quad (3.14)$$

je također faktorizirana.

Međutim karakteristična jednadžba

$$1 + G(s)H(s) = \frac{N_1 N_2 + B_1 B_2}{N_1 N_2} \quad (3.15)$$

već ima brojnik koji nije faktoriziran te ako se u brojniku pojavi jednadžba trećeg ili višeg stupnja ne može se brzo i jednostavno riješiti, pa ni zaključiti jesu li ta rješenja na desnoj

strani kompleksne ravnine. Iz tog razloga ovakav je kriterij neprikladan, te ga je Nyquist modificirao na slijedeći način: Polovi karakteristične jednadžbe (koji se dobiju iz $N_1 N_2 = 0$) odgovaraju polovima prijenosne funkcije otvorenog kruga tako da se iz relacije:

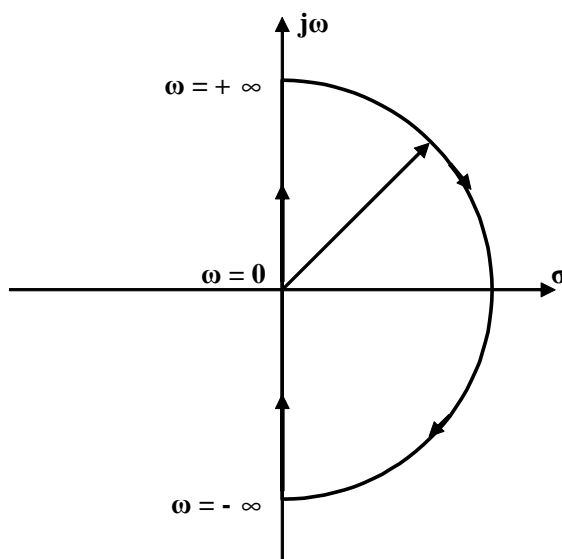
$$1 + G(s)H(s) = 0$$

odnosno

$$G(s)H(s) = -1$$

dolazi do nove kritične točke $(-1 + j0)$ i Nyquistov kriterij glasi: "Zatvoreni regulacijski sustav s negativnom povratnom vezom je stabilan ako polarna krivulja otvorenog kruga obilazi kritičnu točku $-1 + j0$ u suprotnom smjeru obilaženja onoliko puta koliko prijenosna funkcija otvorenog kruga tog sustava ima polova s pozitivnim realnim dijelom".

Smjer obilaženja može se uzeti dogovorno ali će se u našim razmatranjima uzimati za pozitivan smjer, smjer kazaljke na satu, budući će se kod ispitivanja desne poluravnine obilaziti u smjeru rastućih pozitivnih frekvencija od $\omega = 0$ do $\omega = +\infty$.

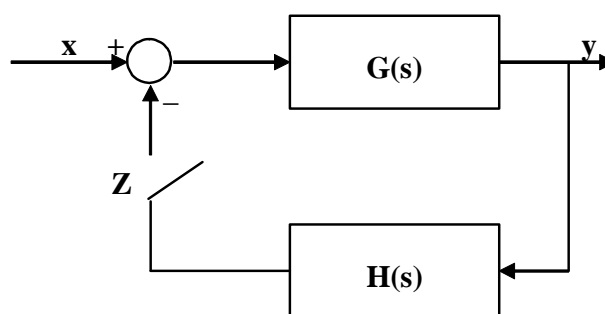


Slika 3.2. Nyquistov prikaz

Ako ne postoji niti jedan pol prijenosne funkcije otvorenog kruga s pozitivnim realnim dijelom, onda Nyquistov kriterij stabilnosti glasi: "Zatvoreni regulacijski sustav čija prijenosna funkcija otvorenog kruga nema polova s pozitivnim realnim dijelom je stabilan ako polarni dijagram u $F(s)$ ravnini ne obilazi kritičnu točku $-1 + j0$ ili simbolički prikazano

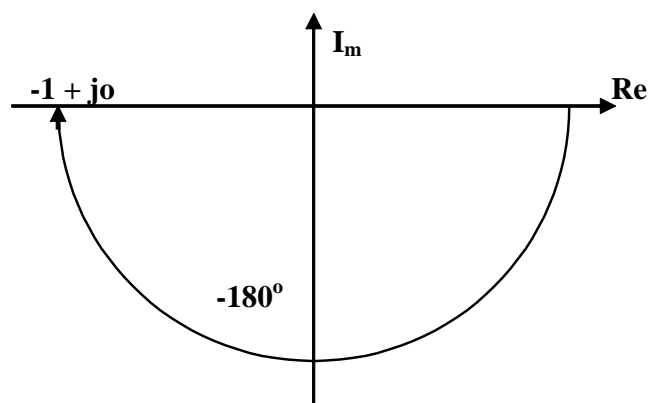
$$N = O$$

Na temelju ovog specifičnog slučaja može se dati i fizikalni prikaz Nyquistovog kriterija stabilnosti (slika 3.3.).



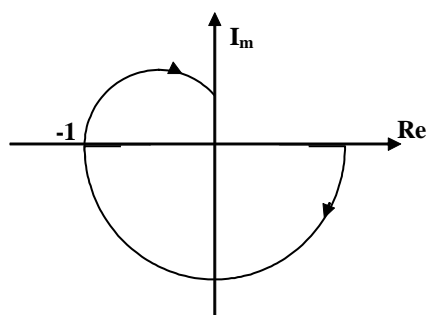
Slika 3.3. Fizikalni prikaz Nyquistovog kriterija stabilnosti

Neka na ulaz djeluje pobuda u obliku sinusne funkcije $X = A \sin \omega T$. Ako se prekine povratna veza u točki Z može se vidjeti da se signal na putu preko $G(s)$ i $H(s)$ amplitudno i fazno izmjeni. Ako je ukupno pojačanje blokova $G(s)$ i $H(s)$ jednako 1 tako da se amplituda ulaznog signala ne izmijeni i ako se faza zakretne za -180° onda će uz dodatno invertiranje od -180° koje unosi negativna povratna veza (kad se spoji na točku Z) povratni signal biti i po amplitudi i po fazi identičan ulaznom signalu i taj bi sustav sam sebe podržavao. Time je ostvaren granični slučaj pozitivne povratne veze i sustav se nalazi na granici nestabilnosti. Jediničnom pojačanju i faznom zakretu od -180° navedenom u ovom kritičnom slučaju odgovara točka $-1 + j0$ u " $G(s)H(s)$ " ravnini.

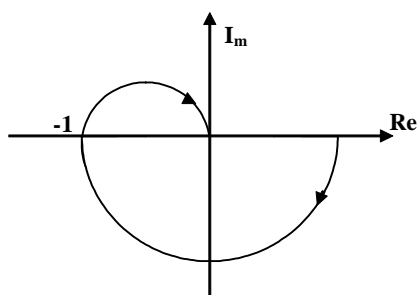


Slika 3.4. Polarna krivulja

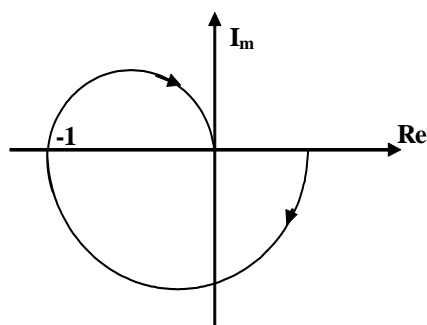
Postoje tri karakteristična slučaja sustava koji je relativno stabilan, slika 3.4.a, b, c.



a.



b.



c.

Slika 3.5. Karakteristični slučajevi sustava koji je relativno stabilan

Na slici 3.4.a. polarna krivulja prolazi točno kroz kritičnu točku $-1 + j0$ sustav je granično stabilan.

Na slici 3.4.b. polarna krivulja prolazi desno od kritične točke $-1 + j0$ (ne obilazi se, $N = 0$) sustav je stabilan jer uz fazu od -180° ima pojačanje otvorenog kruga manje od 1 i ne podržava oscilacije.

Na slici 3.4.c. polarna krivulja prolazi lijevo od kritične točke $-1 + j0$ (obilazi je, $N = Z \neq 0$), sustav je nestabilan jer uz fazu od -180° ima pojačanje otvorenog kruga veće od 1 i podržava oscilacije.

Na temelju ovakvih razmatranja može se odrediti postupak za ispitivanje stabilnosti sustava pomoću Nyquistovog kriterija:

a. pomoću Nyquistove krivulje ispituje se da li na desnoj strani "s" ravnine ima polova prijenosne funkcije otvorenog kruga. U praksi se zapravo zbraja koliko u prijenosnoj funkciji otvorenog kruga ima članova oblika $(s-a)$ u nazivniku,

b. nacrtava se polarnu krivulju prijenosne funkcije otvorenog kruga $G(j\omega)H(j\omega)$ za promjenu frekvencije od $\omega = 0$ do $\omega = +\infty$, a na temelju nje onda konstruira i zrcalna slika prema realnoj osi za negativne frekvencije,

c. odredi se broj punih obilazaka oko kritične točke $-1 + j0$ dok se prelazi duž proširene polarne krivulje u smjeru rastućih frekvencija.

d. ako vrijedi relacija

$$N = -P$$

sustav je, po Nyquistu, stabilan, a u suprotnom slučaju ako je

$$N \neq -P$$

sustav je nestabilan.

4. INSTRUMENTACIJA U REGULACIJSKOM KRUGU

Pod pojmom instrumentacije se podrazumjevaju svi uređaji i instrumenti koji se primjenjuju za motrenje, mjerenje ili reguliranje procesa. U početku su instrumenti u procesu bili samo mehaničkog, zatim pneumatskog i hidrauličkog tipa, dok danas prevladavaju elektronički instrumenti. Glavne komponente i uređaji koji se koriste u procesnoj industriji su:

- a. lokalni instrumenti i uređaji, kao što su: manometri, termometri, mjerila protoka, mjerila razine, regulatori, regulacijski ventili, pojačala itd.,
- b. oprema za nadzor i vođenje procesa: panelni instrumenti (pneumatski i elektronički), procesna računala, analizatori itd., te
- c. oprema za daljinski prijenos podataka: pneumatski vodovi, kabele (signalni, telekomunikacijski, optički), modemi itd.

4.1. Regulatori

Regulator predstavlja jedinicu za vođenje u regulacijskom krugu, koji prima signal iz mjernog pretvornika (y_M), uspoređuje ga željenom (referentnom) veličinom (y_R), te transformira i pojačava u konačni signal (u). Tako se na izlazu iz regulatora dobija signal, koji može otkloniti razliku (ϵ) od željene vrijednosti parametra koji se regulira.

U ovisnosti od upotrebene energije za pojačanje signala i prema vrsti izlaznog signala iz regulatora, regulatori se dijele na: direktne, pneumatske, hidrauličke, mehaničke, električne i kombinirane.

Najprikladnije je ako je energija za pogon regulatora zanemarljiva u odnosu na ukupnu energiju sustava. U tom slučaju se primjenjuju **direktni regulatori**, koji ne trebaju posebni izvor napajanja. U svim drugim slučajevima izvor energije ovisi o sustavu koji se regulira,

daljini prijenosa signala, potrebnoj jakosti izlaznog signala, pojačanju, koroziji, održavanju itd.

Svaki regulacijski krug nakon što je zamišljen, ispituje se i prema potrebi poboljšava njegovo vladanje. Tada se govori o ugađanju regulacijskog kruga.

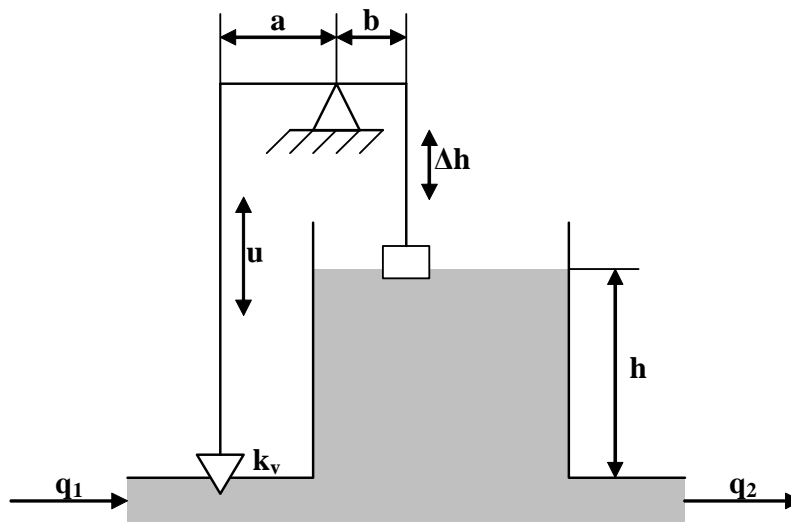
Proces i izvršna sprava se izvode ili odabiru načelno tako da zadovoljavaju određene zahtjeve koji su uglavnom nezavisni od značajki vođenja. Mjerni pretvornik i regulator čine dodatne jedinice potrebne za vođenje i povoljnije je usklađivati njihovo dinamičko vladanje nego vladanje procesa. Zato se i regulator izvodi s jednim ili više izmjenljivih parametara pomoću kojih se može ugađati prijenosna funkcija, a i time i vladanje regulacijskog kruga u cjelini.

Što se tiče prijenosne funkcije, regulatori se dijele na: proporcionalne, integracijske, derivacijske i kombinirane.

4.1.1. Vladanje regulatora

a. Regulator proporcionalnog vladanje, proporcionalni regulator ili P-regulator

P-regulator na svom izlazu daje signal koji je proporcionalan pogrešci ε na njegovom ulazu. Pokazat će se vladanje jednostavnog mehaničkog P - regulatora pomoću kojeg se održava stalna razina kapljevine u spremniku.



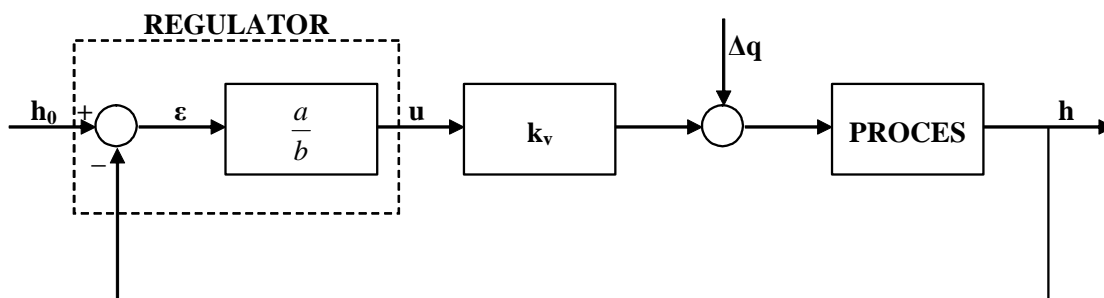
Slika 4.1. Djelovanje mehaničkog P-regulatora

Na slici 4.1. prikazan je jednostavan spremnik u kojem je potrebno razinu (h) održati na stalnoj vrijednosti h_0 . Poremećaji koji djeluju na proces posljedica su razlike $\Delta q = q_1 - q_2$, tj. razlike u količinama dotjecanja i odtjecanja. Nastale promjene razine (h) osjeća plovak, koji je namješten tako da svaki njegov pomak (Δh) predstavlja pogrešku $\varepsilon = h_0 - h$. Plovak je spojen pomoću poluge neposredno na ventil (zasun), pa su pomaci postavnika ventila (u) razmjerni pomacima plovka (Δh).

U ovom slučaju, regulator predstavlja poluga, pa njegovo djelovanje opisuje jednostavna prijenosna funkcija

$$\frac{u}{\Delta h} = \frac{a}{b} = k_R \quad (4.1)$$

Ona je jednaka omjeru pomaka postavnika ventila (u) i pomaka plovka (Δh). Vremenski je nezavisna i konstantne vrijednosti. Konstanta k_R naziva se **pojačanje** ili **statička osjetljivost**. Pojačanje je načelno uvijek uskladio, a u ovom slučaju može se usklađivati mijenjanjem položaja hvatišta poluge, tj. mijenjanjem omjera a/b . Strukturni prikaz opisanog kruga prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Strukturni prikaz reguliranja razine kapljevine u spremniku

Iz strukturnog prikaza vidi se utjecaj pojačanja na vladanje kruga. Umjesto pojačanja često se još koristi drugo obilježje: **proporcionalni opseg**, koji se definira kao pogreška (izražena u postocima područja mjerene veličine), koja je potrebna za pomak izvršne sprave (npr. ventila) iz potpuno zatvorenog u potpuno otvoreni položaj. U pogonu se umjesto širine proporcionalnog opsega koriste nazivi proporcionalni band ili širina banda.

Poseban slučaj proporcionalnog reguliranja jest **dvopoložajno** reguliranje. Naime, učini li se pojačanje k_R dovoljno velikim, gibat će se ventil (izvršna sprava) iz jednog ekstremnog položaja do drugog, čime se mjerena veličina otkloni samo malo do željene vrijednosti. Ovo vrlo osjetljivo djelovanje naziva se dvopoložajno, zato što je ventil ili potpuno otvoren (ON) ili potpuno zatvoren (OFF). Prema tome ventil radi kao prekidač. Radi toga se dvopoložajno reguliranje često i naziva: **ON-OFF** reguliranje. To je vrlo jednostavan regulator i najčešće se upotrebljava kod raznih aparata u domaćinstvu.

Djelovanje P-regulatora se može opisati ovako:

$$p = k_R \varepsilon + p_0 \quad (4.2)$$

gdje je:

- p - izlazni signal iz regulatora,
- k_R - statička osjetljivost (pojačanje),
- p_0 - konstanta, iznos izlaznog signala kod pogreške $\varepsilon = 0$.

k_R se namješta posebno, prema tome to je uskladiovo pojačanje, koje je određeno širinom proporcionalnog opsega.

Ako se želi izvesti prijenosna funkcija P-regulatora, onda se piše da je:

$$u = p - p_0$$

pri čemu jednadžba njegovog vladanja ima oblik:

$$u(t) = k_R \varepsilon(t)$$

a prijenosna funkcija:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_R$$

b. Proporcionalno-integralni regulator, regulator proporcionalnog i integralnog vladanja ili PI-regulator

Iz različitih razloga, a najznačajnija je statička pogreška P-regulatora, često je potrebno osnovnom P-djelovanju dodati neka dodatna dinamička djelovanja. To su integralno i derivacijsko djelovanje.

Djelovanje PI-regulatora opisuje jednadžba:

$$p = k_R \varepsilon + \frac{k_R}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon dt + p_0 \quad (4.3)$$

gdje je zadržano predhodno značenje oznaka, a τ_i je **integralno vrijeme**, kojim se posebno namješta brzina kretanja ventila. Često se još koristi i recipročna vrijednost od τ_i ($1 / \tau_i$) s istim smislom i naziva se **reset-no vrijeme**.

Zamjenom $p - p_0 = u$ može se izvesti prijenosna funkcija:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_R \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

c. Regulator proporcionalnog i derivacijskog vladanja, proporcionalno-derivacijski regulator ili PD-regulator

Ako se želi kvalitet regulacije popraviti djelovanjem koje bi djelovalo proporcionalno, ne pogrešci, već njenoj brzini, onda je:

$$p = k_R \varepsilon + k_R \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt} + p_0 \quad (4.4)$$

pri čemu su zadržana predhodna značenja oznaka, a τ_d je **derivacijsko vrijeme**, koje se posebno namješta.

Slično kao u predhodnim primjerima zamjena $p - p_0 = u$ omogućuje izvod prijenosne funkcije:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_R (1 + \tau_d s)$$

d. Regulator proporcionalnog, integralnog i derivacijskog vladanja, proporcionalno integralno-derivacijski regulator ili PID-regulator

Ovo reguliranje predstavlja kombinaciju predhodnih P, I i D-djelovanja, te se njegovo vladanje može opisati slijedećom jednažbom:

$$p = k_R \varepsilon + \frac{k_R}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon dt + k_R \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt} + p_0 \quad (4.5)$$

U ovom slučaju regulator PID djelovanja sadrži tri veličine za podešavanje k_R , τ_i i τ_d , koje se nazivaju parametrima regulatora.

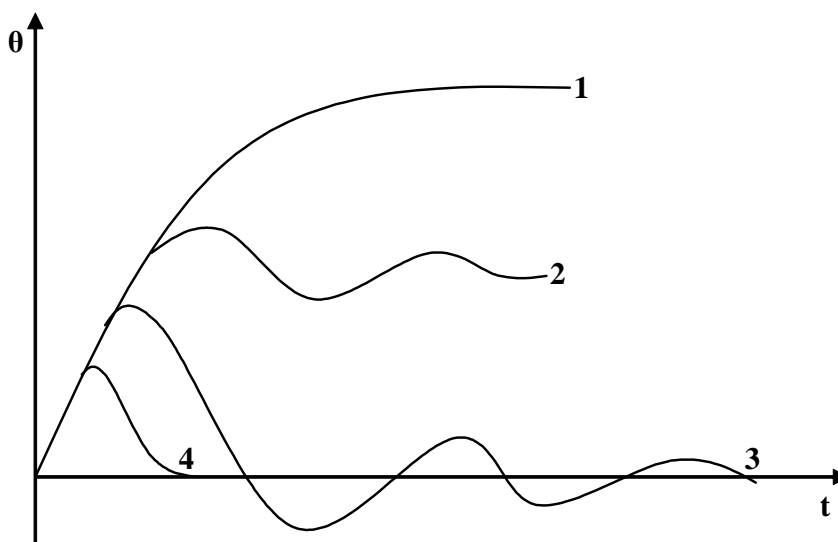
Transformacijom gornje jednadžbe dobije se slijedeća prijenosna funkcija:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_R \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

Kombinacijom ovih djelovanja postižu se sva dobra svojstva osnovnih vrsta regulatora. Tako PID-regulator pomoću D-djelovanja djeluje veoma brzo i unaprijed spriječava velika regulacijska odstupanja, P-djelovanje mu daje stalno i dovoljno jako pojačanje, a I-djelovanje osigurava točno i potpuno otklanjanje regulacijskog odstupanja.

d. Usporedni prikaz vladanja regulatora

Na jednom primjeru pokazat će se kako djeluju regulatori kombiniranog djelovanja (P, PI i PID), ako na sustav djeluje ista ulazna promjena (slika 4.3.).



Slika 4.3. Djelovanje različitih načina regulacije

Uslijed izvršene ulazne promjene vrijednost regulirane veličine raste u vremenu $t = 0$ (krivulja 1) i ukoliko nema reguliranja ona raste do vrijednosti novog ravnotežnog stanja.

Primjenom regulacije s ciljem da se regulirana veličina održi blizu željene veličine, sa P-regulatorom (krivulja 2), zaustavit će se porast regulirane veličine i ustaliti kod neke nove vrijednosti. Ta razlika se naziva regulacijsko odstupanje i ono je različito zavisno od vrijednosti pojačanja k_R .

Dodatkom integralnog djelovanja (krivulja 3), dakle primjenom PI-regulatora, eliminira se regulacijsko odstupanje i regulirana veličina se vraća na početnu vrijednost, uz nedostatak oscilacijskog odziva i sporijeg uravnoteženja sustava.

Kod PID-regulatora (krivulja 4) odziv sustava je bolji. Porast regulirane veličine zaustavlja se brže, a povratak na početnu vrijednost je također brži i sa malo ili uopće bez oscilacija.

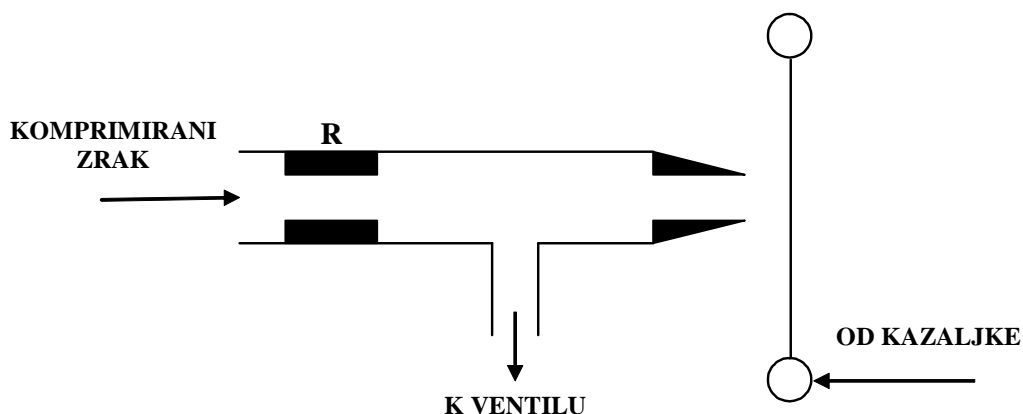
Izbor regulatora ovisi o primjeni regulacije. Ako se tolerira odstupanje, onda se izabire P-regulator. Međutim, ako odstupanje nije dozvoljeno, dodaje se integralno djelovanje, a u slučaju eliminacije oscilacija upotrebljava se PID-regulator. Dodatak svakog novog djelovanja znači veće početno ulaganje u opremu i teže podešavanje regulatora. O tome se kod izbora regulatora mora voditi računa.

4.1.2. Izvedbe regulatora

a. Pneumatski regulatori

Centralni element pneumatskog regulatora je uređaj kojim se pomak kazaljke pretvara u promjenu tlaka pomoćnog plina. Ta promjena tlaka pretvorit će se onda s pomoću "potjernog motora" u odgovarajući pomak regulacijskog ventila.

Za pretvaranje pomaka kazaljke u promjenu tlaka često služi naprava shematski prikazana na slici 4.4.



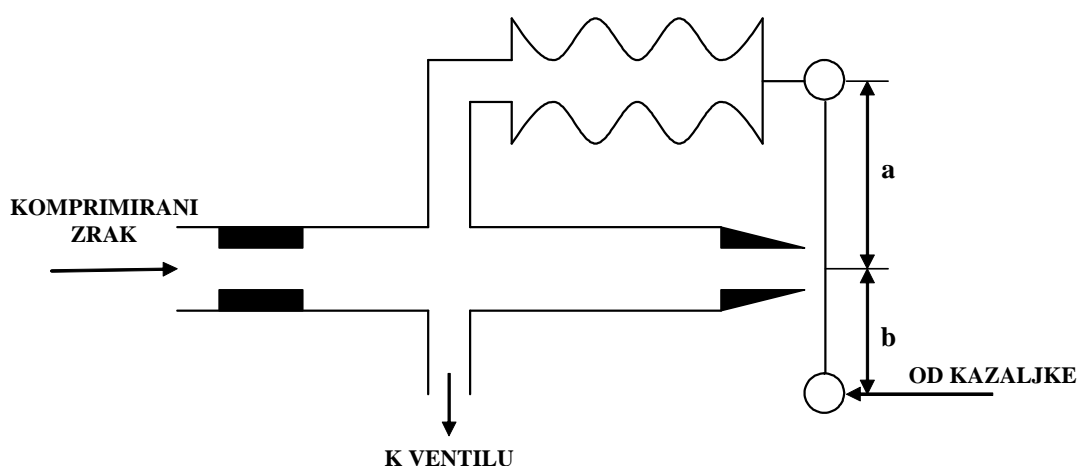
Slika 4.4. Prikaz pretvaranja pomaka kazaljke u promjenu tlaka

Komprimirani zrak dovodi se u cjevčicu koja na jednom mjestu ima suženje R. Cjevčica završava sapnicom, koja je također sužena, ali manje nego cijev na mjestu R (npr. promjer sapnice je 0.5 - 1 mm, a suženje R polovica do trećina toga). Pred sapnicom je smještena lagana metalna lamela. Ona je s jedne strane pokretno pričvršćena tako da se može prisloniti uz sapnicu i zatvoriti je ili se od nje više ili manje odmaknuti. Lamela je spojena laganom polugom s kazaljkom, tako da se sapnici primiće ili od nje odmiće u ovisnosti o pomicanju kazaljke tj. od promjene regulirane veličine.

Ovaj uređaj djeluje ovako: komprimirani zrak dolazi u cjevčicu s predtlakom od 100 kPa. Onda će se u prostoru iza spanice (između obiju suženja) pri sasvim odmaknutoj lameli uspostaviti tlak koji zavisi o omjeru otpora suženja, npr. 20 kPa. Uz zatvoreni otvor cijevi tj. kada je lamela sasvim pritisnuta na sapnicu u tom prostoru će se uspostaviti tlak od 100 kPa. Ako lamela zauzme položaj između pritisnutog na sapnicu i sasvim odmaknutog, tlak u navedenom prostoru zauzet će vrijednost između 100 kPa i 20 kPa, u zavisnosti od položaja lamele tj. od vrijednosti regulirane varijable. Spoji li se prostor iza sapnice (preko pojačala) s pneumatskim motorom regulacijskog ventila, vršit će se na položaj ventila djelovanje koje je u zavisnosti o vrijednosti regulirane varijable. Upotrijebi li se za

reguliranje opisani uređaj, ventil će se otvoriti odnosno zatvoriti i pri najmanjem pomaku kazaljke i postić će se dvopoložajno reguliranje.

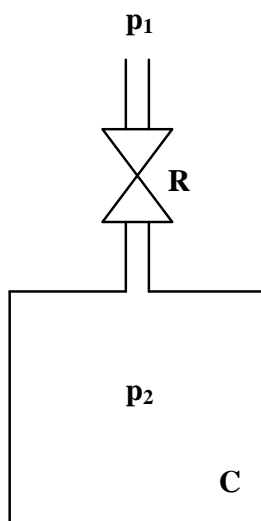
Ako se želi ovaj uređaj upotrijebiti za proporcionalnu regulaciju moramo mu smanjiti osjetljivost. To se postiže s mehanizmom prikazanim na slici 4.5.



Slika 4.5. Prikaz izvedbe pneumatskog P-regulatora

Ovdje je temeljnoj jedinici regulatora cijevčica-sapnica-lamela dodan jedan metalni mijeh, koji je spojen s prostorom iza sapnice. Pomakne li kazaljka lamelu npr. na lijevo porast će tlak iza sapnice, rastegnut će se metalni mijeh i vratit će lamelu nešto u desno do novog ravnotežnog položaja. Mijenjanjem omjera dužina a i b , npr. pomicanjem sapnice ili hvatišta poluge namješta se širina zone regulacije. Položaj lamele, a prema tome i tlak u pneumatskom motoru regulacijskog ventila, proporcionalan je položaju kazaljke tj. vrijednosti regulirane varijable. Dakle, postiže se P-regulacija.

Za ostvarenje integralnog regulacijskog djelovanja koristi se zakonitost koja vrijedi općenito za punjenje jednog kapaciteta kroz jedan otpor: trenutna brzina promjene potencijala upravo je razmjerna trenutnoj razlici potencijala kroz otpor, a obrnuto razmjerna umnošku kapaciteta i otpora. To npr. vrijedi za brzinu izravnjavanja tlakova plina unutar jedne posude i izvan nje, a kroz usku cijev ili ventil (slika 4.6.).



Slika 4.6. Prikaz izravnavanja tlakova unutar posude i izvan nje

U tom slučaju vrijedi diferencijalna jednačba:

$$\frac{dp_2}{d\tau} = \frac{p_1 - p_2}{CR} = \frac{p_1 - p_2}{T} = \frac{\Delta p}{T} \quad (4.6)$$

gdje su:

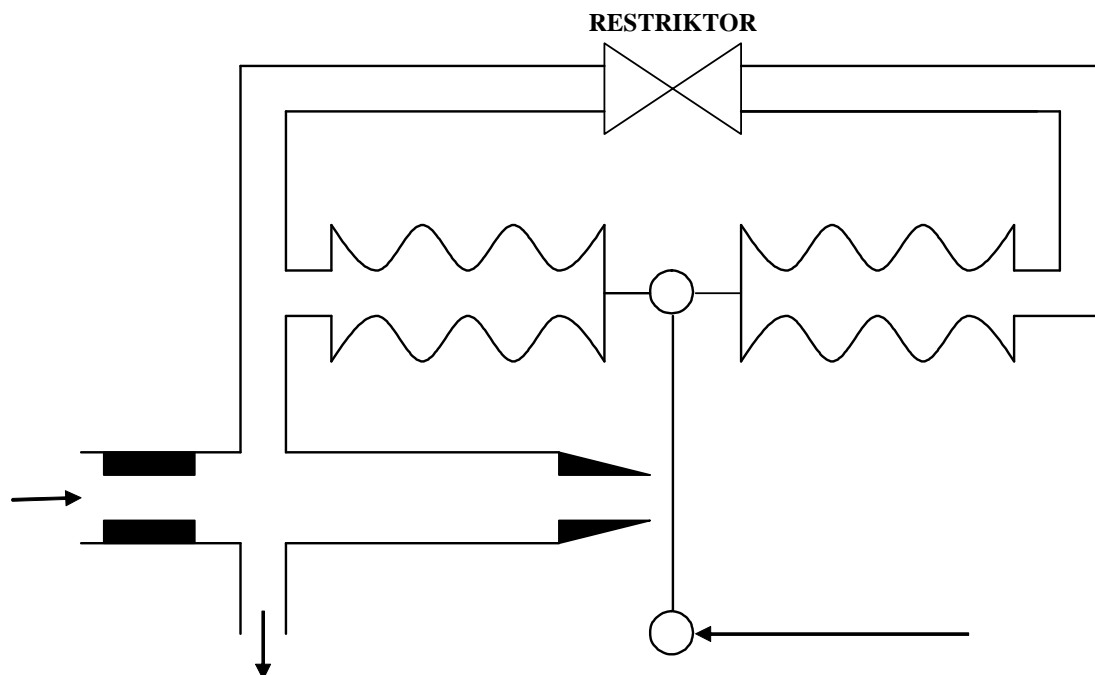
p_1 i p_2 - tlakovi s jedne i druge strane otpora

C - kapacitet

R - otpor

Umnožak CR ima dimenziju vremena i to je "vremenska konstanta" T koja karakterizira brzinu izjednačenja tlakova.

Ukopča li se u pneumatski regulacijski uređaj još jedan kapacitet (metalni mijeh) i otpor (ventil - "restriktor") prema slici 4.7. time se proporcionalnom djelovanju dodaje integralno.



Slika 4.7. Prikaz pneumatskog PI-regulatora

Pomakne li kazaljka lamelu npr. na lijevo narast će tlak iza sapnice za vrijednost Δp . U tom trenutku i razlika tlakova u jednom i drugom mijehu će iznositi Δp , ali će se ovi odmah početi izjednačavati brzinom prema jednadžbi (4.6) proporcionalnom Δp . Tlak u lijevom mijehu će opadati, a u desnom rasti i time će se lamela pomaknuti dalje na lijevo. Tlak će iza sapnice uslijed toga zauzimati višu vrijednost po zakonu integralnog djelovanja. Prenosi li se tlak na pneumatski motor regulacijskog ventila, bit će ostvarena PI-regulacija.

Na analogan način može se pokazati da će se proporcionalnom i integralnom djelovanju dodati derivacijsko djelovanje, ako se u povratnu vezu umetne još jedan ventil - "restriktor" između sapnice i lijevog mijeha. Time se ostvarila PID-regulacija.

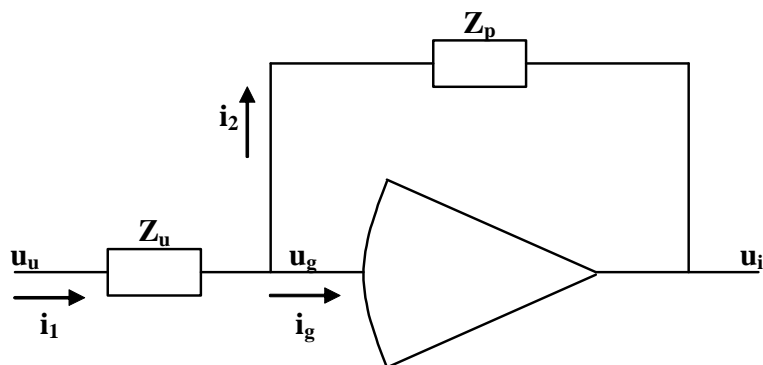
Dok se integralnim restriktorom smanjila osjetljivost uređaja sapnica/lamela proporcionalno brzini izjednačavanja tlakova, derivacijskim se restriktorom, obrnuto, povećava osjetljivost tog uređaja proporcionalno veličini tlaka iza sapnice.

b. Elektronički regulatori

Primjena pneumatskih regulatora imala je ranije veću primjenu u odnosu na druge regulatore. To se posebno odnosi na njihovu upotrebu u procesnoj industriji. Međutim, u zadnje vrijeme sve se više razvijaju i upotrebljavaju elektronički regulatori. Njihova prednost pred pneumatskim regulatorima je u tome što je postavljanje različitih parametara regulatora lakše i trajnije.

Osnovna jedinica elektroničkih kontinuiranih regulatora je računsko pojačalo. To je istosmjerno pojačalo velikog pojačanja i velikog ulaznog otpora. Različita dinamička vladanja regulatora ostvaruju se prikladnim izborom sloga otpornika i kondenzatora na ulazu i u povratnoj vezi takvog pojačala.

Smisao djelovanja ovog regulatora može se protumačiti pomoću slike 4.8.



Slika 4.8. Načelo izvedbe elektroničkog regulatora

Na ulazu pojačala pretpostavljena je impendancija Z_u , a u povratnoj vezi impendancija Z_p . Na slici su označene struje i naponi. Prema Kirchhoffovom zakonu može se postaviti jednačina:

$$i_1 = i_g + i_2 \quad (4.7)$$

a kako je pojačalo izvedeno s velikim ulaznim otporom ($> 10^6 \Omega$) može se zanemariti struja i_g , pa onda pretpostaviti $i_1 \approx i_2$ što onda daje:

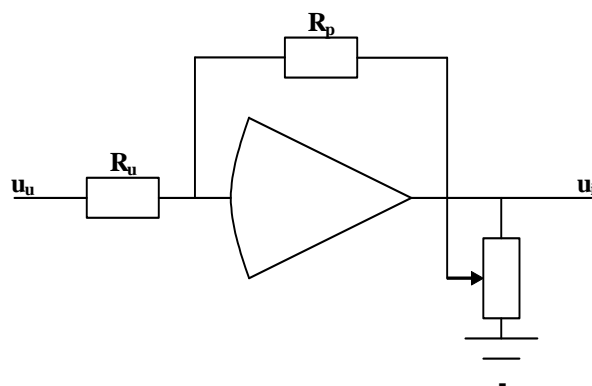
$$\frac{u_g - u_i}{Z_p} \approx \frac{u_u - u_g}{Z_u} \quad (4.8)$$

Uvrsti li se u ovu jednadžbu $\frac{u_i}{u_g} = A$, može se izvesti zavisnost izlazne veličine u_i od ulazne veličine u_u :

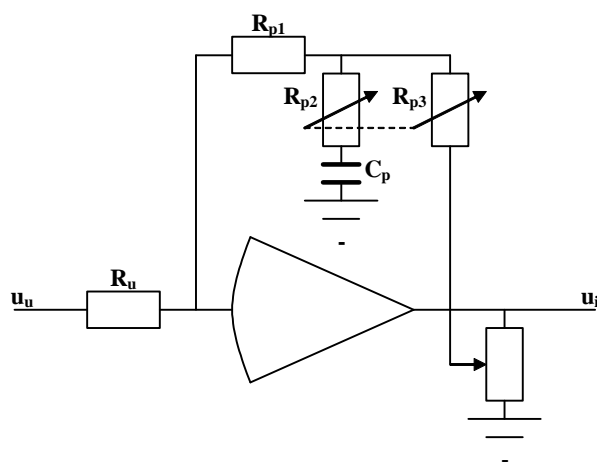
$$u_i \approx -\frac{Z_p}{Z_u} \frac{1}{1 - \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Z_p}{Z_u} \right)} u_u \quad (4.9)$$

Veliko pojačanje pojačala, A , omogućuje zanemarivanje člana $\frac{1}{A} \left(1 + \frac{Z_p}{Z_u} \right)$ u nazivniku, pa djelovanje regulatora opisuje relacija

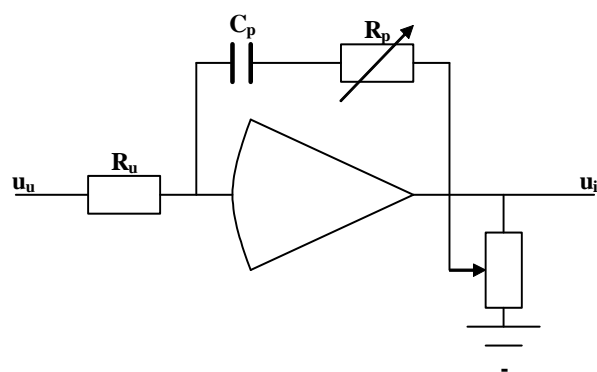
$$u_i \approx -\frac{Z_p}{Z_u} u_u \quad (4.10)$$



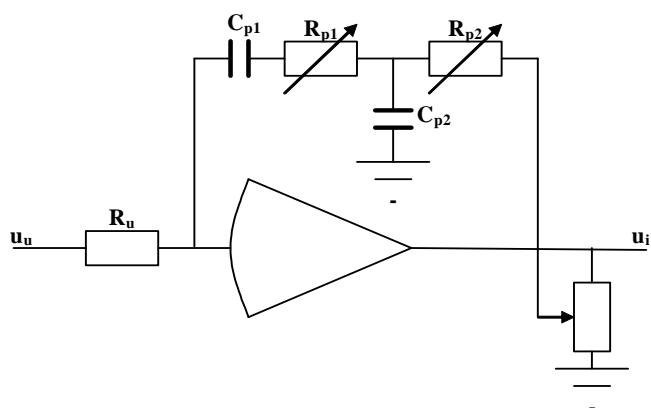
P-regulator



PD-regulator



PI-regulator



PID-regulator

Slika 4.9. Spojevi elektroničkih regulatora

Na slici 4.9. prikazani su spojevi P, PD, PI i PID-regulatora. Njihova različita djelovanja ostvarena su prikladnim izborom otpornika i kondenzatora, pomoću kojih su dobiveni različiti omjeri Z_p / Z_u , odnosno različite prijenosne funkcije.

Tako je npr. kod PI-regulatora vidljivo da je ulazna impedancija čisti otpor otpornika R_u , a da impedanciju u povratnoj vezi čine u seriju povezani kondenzator C_p i otpornik R_p . Dakle,

$$\frac{Z_p}{Z_u} = \frac{R_p \left(1 + \frac{1}{R_p C_p s} \right)}{R_u} \quad (4.11)$$

što daje

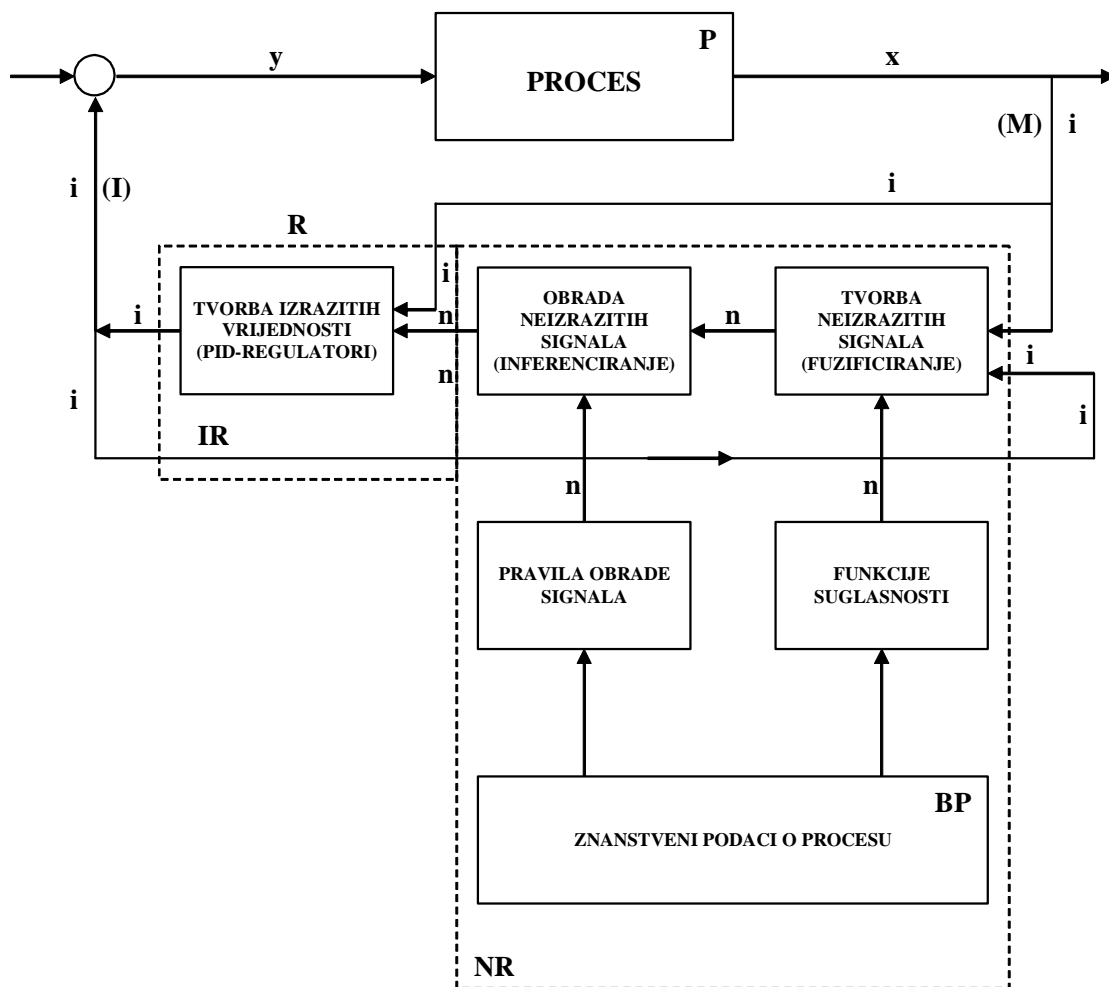
$$\frac{u_i}{u_n} = -\frac{R_p}{R_u} \left(1 + \frac{1}{R_p C_p s} \right) = -k \left(1 + \frac{1}{\tau_1 s} \right) \quad (4.12)$$

Na sličan način mogu se izvesti prijenosne funkcije za svaki pojedini slučaj. Kombiniranje različitih omjera Z_p / Z_u je neograničeno i daje mnogo šire mogućnosti pri ugađanju vladanja regulacijskog kruga, nego u slučaju pneumatskih regulatora.

c. Regulatori složenih djelovanja

Uz osnovne vrste regulatora potrebno je spomenuti regulatore s neizrazitim djelovanjem ili Fuzzy-regulatore. Oni su se razvili usporedo s razvojem elektroničke tehnike, a posebno digitalne i računalne tehnike. Razvojem procesnih računala i računalnih sklopova, koji se već sada nalaze u svim vrstama jedinica sustava vođenja i reguliranja, omogućeno je brzo, točno, sigurno i pouzdano promatranje i reguliranje mnogih značajki vođenih procesa, ali i ugađanje i nadzor nad svim bitnim značajkama opreme sustava vođenja.

Načelo djelovanja i osnovna građa neizrazitog ili Fuzzy-regulatora može se shematski prikazati na slici 4.10.



Slika 4.10. Vođenje s neizrazitim (Fuzzy) regulatorom

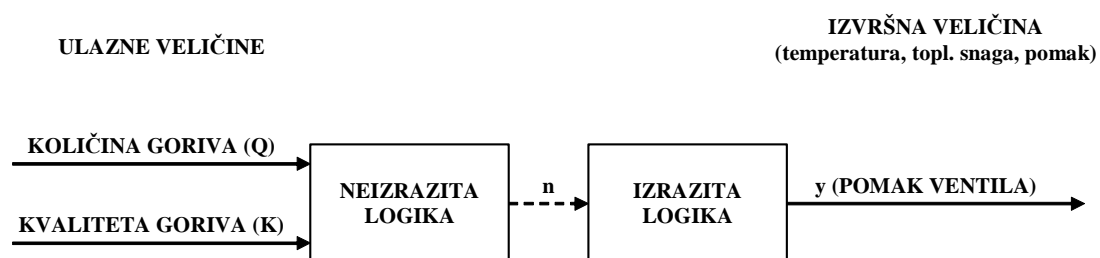
Ovo predstavlja prikaz regulacijskog kruga u najjednostavnijem obliku reguliranog procesa (P) i poblje naznačenom strukturom regulatora (R) te samo naznačenim ostalim dijelovima podsustava za vođenje, od mjernih (M) do izvršnih organa kruga (I).

Regulator kruga (R) sastoji se od dva osnovna dijela: neizrazitog dijela regulatora (NR) i izrazitog, klasičnog (obično digitalnog) PID-regulatora (IR). To su najčešće mikroračunalni, programabilni dijelovi i logički sklopovi. Pri tome su na glavnom ulazu i izlazu regulatora signali izraziti (i), dok su većina internih signala neizrazitog dijela regulatora neizraziti signali (n).

Neizraziti regulator (NR) se sastoji od spremnika i operativnog dijela s bazom podataka o procesu (BP) s kojima se na temelju funkcija suglasnosti (ili pripadnosti), izraziti izlazni signali procesa, koji su brojčano izraženi, pretvaraju u neizrazite signale vođenja (tj. signale kvalitativnog oblika). Ovaj se stupanj prijenosa i pretvorbe naziva i fuzificiranje signala vođenja. Na temelju podataka o procesu određuju se pravila tvorbe, odnosno pravila obrade signala neizrazitog vođenja, kojima se kodiraju, programiraju i oblikuju fuzificirani signali. Ovaj se postupak naziva i inferenciranjem neizrazitih signala vođenja. Inferencirani signali se zatim privode na izlazni dio neizrazitog regulatora koji obično sadrži i digitalni izlazni PID-regulator. Na njemu se neizrazite vrijednosti signala reguliranja pretvaraju u izrazite izlazne signale regulatora (R), odnosno signale s izrazitim, ali i s fuzificiranjem optimiranim, P-djelovanjima, I-djelovanjima i D-djelovanjima.

Primjena reguliranja s Fuzzy djelovanjem je karakteristična za suvremene spalionice otpadnih tvari, kojima varira ogrijevna vrijednost. Kod njih je temperatura vode iz toplane glavna izlazna veličina i ujedno glavna mjerena veličina u grijanim prostorima s takvom ogrijevnom vodom.

Primjer tvorbe takvih signala pri neizrazitom reguliranju temperature prikazan je na slici 4.11.



Slika 4.11. Neizrazito reguliranje temperature

Na ovoj slici prikazana je jednostavna načelna shema neizrazitog reguliranja temperature prostorije, na temelju mjerenja količine goriva (Q) i njegove ogrijevnje moći (K). Ulazne veličine se najprije obrađuju na neizrazitom dijelu regulatora i u neizrazitim oblicima, a

takav je njihov izlazni signal (u). Tako obrađeni neizraziti signali se na izlaznom, izrazitom dijelu regulatora pretvaraju u izrazite oblike i vrijednosti izvršnih veličina npr. u PID izlazne signale i u odgovarajuće pomake izvršnih dijelova reguliranih ventila (Y).

Ovi regulatori pripadaju najinteligentnijim jedinicama ili dijelovima regulacijskih sustava. Oni, ponavljajući postupke reguliranja, pamte i primjenjuju samo one postupke i djelovanja koji su u zadanim uvjetima najdjelotvorniji i najbrži.

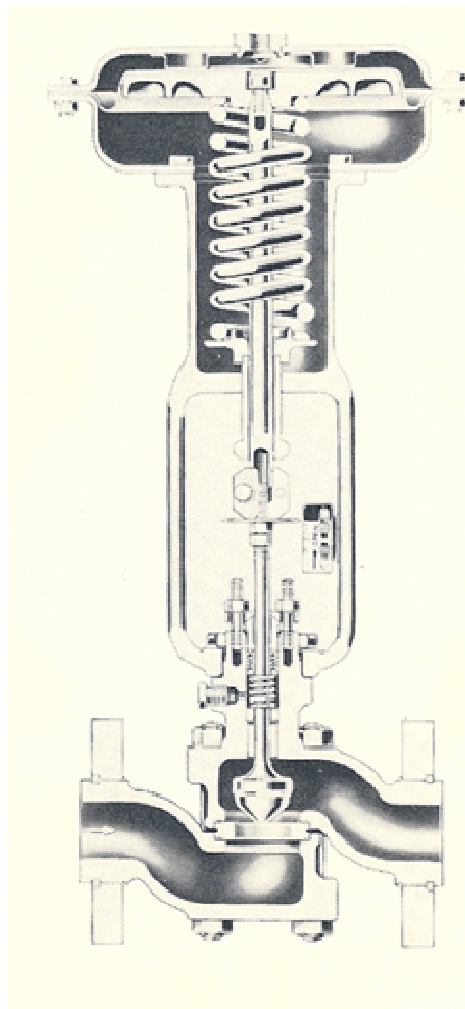
4.2. Regulacijski ventili

Kod regulacije najvažnijih pogonskih varijabla u kemijskoj i srodnim industrijama (temperature, tlaka, razine, protoka, koncentracije i dr.) konačni regulacijski element je **regulacijski ventil**, u kojemu se protok mijenja dizanjem i spuštanjem vretena (postavnika motora).

Konstruktivno i po funkciji regulacijski ventil se može podijeliti na dva dijela:

- a. motorni, koji pretvara tlak iz regulatora u mehanički pomak vretena ventila i
- b. izvršni dio, tj. ventil u užem smislu koji pretvara pomak vretena u promjene protoka radnog fluida.

Za pneumatsku regulaciju pokreće se vreteno tlakom pomoćnog plina regulatora (20 - 100 kPa), s pomoću "pneumatskog motora s dijafragmom" (potjernog motora). Kod tih ventila pneumatski signal u obliku tlaka djeluje na dijafragmu (promjera 20 - 30 cm). Dijafragma je izvedena od elastičnog materijala (guma), tako da se tlaku komprimiranog zraka suprostavlja sila opruge. Tlak zraka se preko dijafragme pretvara u pomicanje vretena ventila (postavnika). Kako će se protok kroz ventil mijenjati s položajem vretena ovisi o tome kako se pri dizanju i spuštanju ventila mijenja slobodni presjek ventila. Prikaz regulacijskog ventila dan je na slici 4.12.



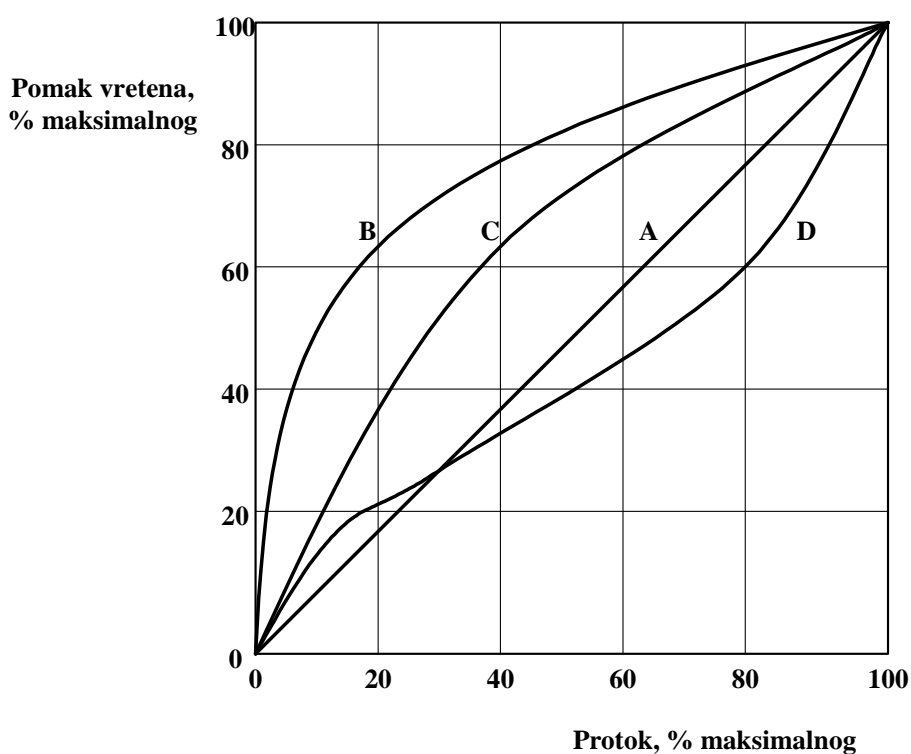
Slika 4.12. Regulacijski ventil

Ovakav regulacijski ventil, kojeg ne treba posebno objašnjavati, predstavlja element procesne opreme. On se mora projektirati zajedno s vodovima, crpkama i aparatima te uređajima regulacijskog kruga. Pri tome on mora zadovoljavati uvjete regulacije i po svojim karakteristikama mora odgovarati dinamici procesa, karakteristikama mjernog pretvornika te karakteristikama regulatora i pneumatskog motora. Zbog toga je proračun i izbor ventila složen zadatak i usko vezan uz projektiranje procesa, opreme i mjerno-regulacijskog sustava. U tu svrhu su i razrađeni opći kriteriji i postupci za izbor ventila.

4.2.1. Karakteristike ventila

Kako će se protok kroz ventil mijenjati s položajem postavnika ventila ovisi o tome kako se pri dizanju i spuštanju ventila mijenja slobodni presjek ventila. Krivulja koja pokazuje kako se mijenja protok s položajem postavnika ventila naziva se **karakteristika ventila**.

Karakteristika, koja je određena uz konstantan pad tlaka kroz ventil, ovisi samo o obliku ventila i naziva se **inherentna, svojstvena karakteristika** ili **karakteristika slobodnog presjeka**. Slika 4.13. prikazuje inherentne karakteristike nekih regulacijskih ventila.



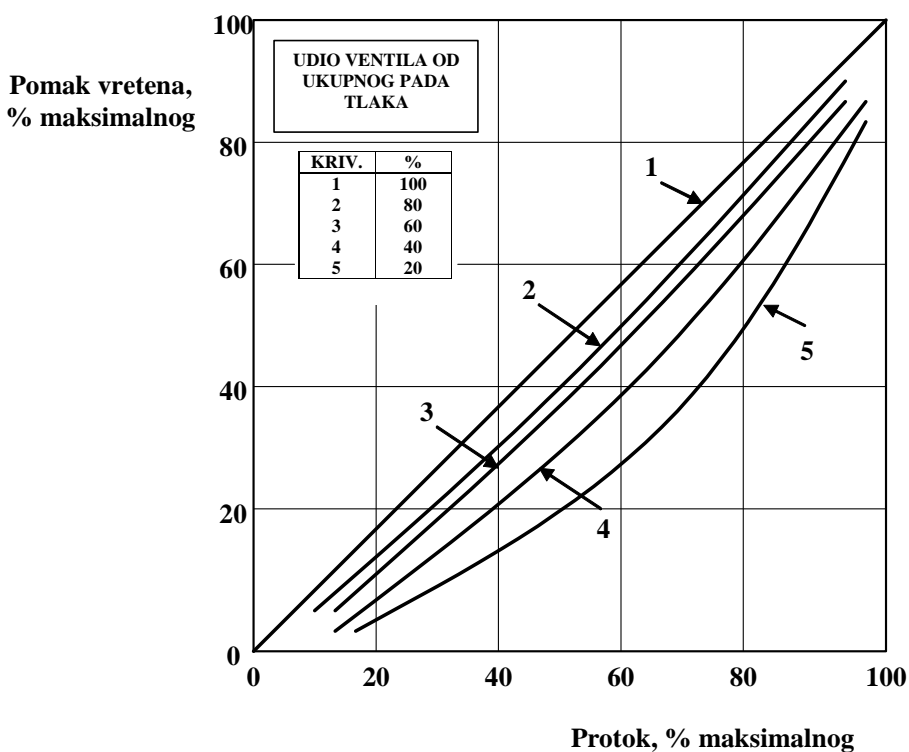
Slika 4.13. Inherentne karakteristike

Krivulja A je karakteristika ventila kojemu se slobodni presjek mijenja linearno s pomakom postavnika i naziva se linearna karakteristika. Krivulja B prikazuje karakteristiku ventila, kojem se za jednaki pomak postavnika slobodni presjek mijenja za isti postotak od postojećeg. To je tzv. **istopostotna** ili **logaritamska karakteristika**. Ostale krivulje (C i D) pokazuju inherentne karakteristike ventila ostalih različitih izvedbi.

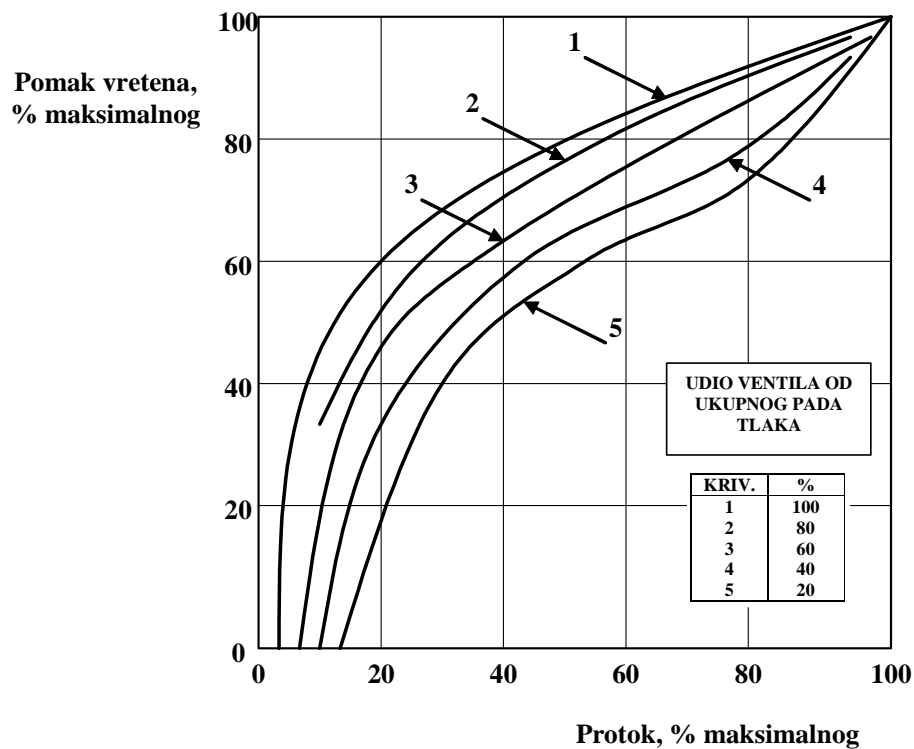
Međutim, u pogonskim uvjetima, protok se ne mijenja s položajem postavnika prema inherentnim karakteristikama, jer pad tlaka općenito nije neovisan o položaju ventila. Zato se uz inherentne karakteristike još upotrebljavaju **stvarne (efektivne) karakteristike** ili **karakteristike protoka**. Kod njih je uz protok i pomak još kao parametar uveden udio pada tlaka sasvim otvorenog ventila od ukupno raspoloživog pada tlaka.

Slika 4.14. prikazuje stvarne karakteristike za ventil s linearnom karakteristikom, a slika 4.15. stvarne karakteristike s logaritamskom inherentnom karakteristikom.

Vidi se da otklon stvarne karakteristike od oba slučaja postaje znatniji tek kad udjel ventila u ukupnom tlaku padne ispod 60%. Analogne krivulje mogu se nacrtati i za ostale inherentne karakteristike.



Slika 4.14. Stvarna karakteristika za ventil s lineranom karakteristikom



Slika 4.15. Stvarna karakteristika za ventil s logaritamskom inherentnom karakteristikom

4.2.2. Prijenosna funkcija ventila

Gibanje postavnika ventila može se opisati s diferencijalnom jednadžbom II reda. Pretpostavlja se da na ventil djeluje kao ulazna upravljačka veličina tlak $p(t)$, te da su:

- $A \text{ (m}^2\text{)}$ - radna površina membrane,
- $m \text{ (kg)}$ - masa pomičnih dijelova ventila,
- $k \text{ (N/m)}$ - konstanta elastičnosti opruge,
- $c \text{ (Ns/m)}$ - koeficijent trenja

Jednadžba vladanja ventila slijedi iz dinamičke ravnoteže sila. Uzme li se za pomak postavnika ventila oznaka x , tada ulaznoj sili $p(t)$ drže ravnotežu sila u opruzi kx , sila trenja $c \frac{dx}{dt}$ i tromost pokretnih dijelova $m \frac{d^2x}{dt^2}$. U tom slučaju je:

$$Ap(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx \quad / : m \quad (4.13)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{A}{m} p(t) \quad (4.14)$$

Označe li se:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n}, \quad K = \frac{A}{m}$$

jednadžba vladanja ventila glasi:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = Kp(t) \quad (4.15)$$

Primjenom Laplaceove transformacije uz $L\{x(t)\} = X(s)$ i $L\{p(t)\} = P(s)$ dobije se jednadžba:

$$W(s) = \frac{X(s)}{P(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.16)$$

Budući da pokretanje postavnika ventila ne nastaje trenutačno s promjenom tlaka iz regulatora, pneumatski ventil uvijek ima neko zaostajanje. Eksperimentalno je ustanovljeno da kod ventila s linearnom karakteristikom vrijedi prijenosna funkcija I reda u ovom obliku:

$$\frac{X(s)}{P(s)} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (4.17)$$

gdje je:

K_v - pojačanje ventila, tj. konstanta proporcionalnosti između protoka ravnotežnog stanja i tlaka na ventilu (razlika tlaka ispred i iza ventila),

τ_v - vremenska konstanta ventila.

Kod većine sustava za vođenje, vremenska konstanta ventila je vrlo mala u usporedbi s vremenskom konstantama drugih jedinica u sustavu za vođenje, tako da se prijenosna funkcija ventila često može približno prikazati konstantom:

$$\frac{X(s)}{P(s)} = K_v \quad (4.18)$$

Pod tim uvjetima, ventil zanemarljivo malo doprinosi dinamičkom vladanju cijelog sustava.

Veličina vremenske konstante ventila τ_v najčešće je oko 10 sekundi. Kako industrijski procesi, koji se vladaju kao sustavi I reda ili kao serija sustava I reda imaju vremensku konstantu reda veličine minute ili sata, to je onda zaostajanje ventila u ovakvim slučajevima zanemarljivo.

4.2.3. Određivanje veličine ventila

Jedan od važnih preduvjeta za pravilan rad ventila u regulacijskom krugu je pravilan izbor njegove veličine. Bitna veličina koja karakterizira rad ventila je pojačanje ventila K_v . Ono se računa pomoću složenih postupaka, a za jednostavnije proračune koriste se jednadžbe koje u sebi sadrže količinu protjecanja (Q) i padove tlakova (Δp) u ventilu. Na temelju tako izračunatih vrijednosti K_v izrađeni su dijagrami iz kojih se mogu odrediti dimenzije ventila, protok i pad tlaka na ventilu. Ta jednadžba je:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta p}} \quad (4.19)$$

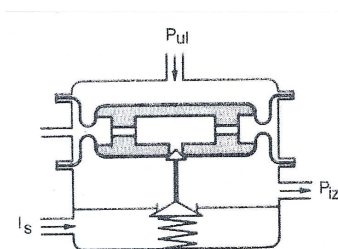
Ovakvo određivanje veličine ventila razlog su da se u sustavima automatskog vođenja primjenjuju različite vrste ventila koji djeluju na dotok materijala ili energije u procesu. Tako ventil kod raznovrsnih kemijsko-tehnoloških procesa mijenja protok fluida na ulazu u proces u zavisnosti o vođenoj veličini npr.: tlaku, temperaturi, razini, koncentraciji, pH itd.

4.3. Ostale komponente u regulacijskom krugu

Ostale komponente koje se pojavljuju u regulacijskom krugu i tako mu poboljšavaju karakteristike su: pneumatsko pojačalo, elektromagnetski pretvornik te postavnici ventila.

4.3.1. Pneumatsko pojačalo

Pneumatsko pojačalo ili relej često se koristi u regulacijskom krugu (slika 4.16.).

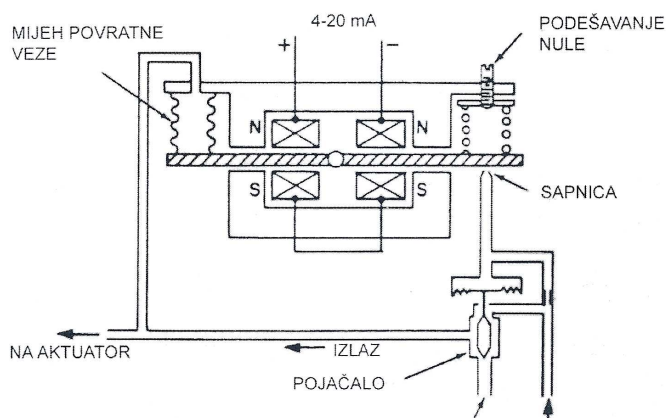


Slika 4.16. Shema pneumatskog pojačala

Osnovna njegova zadaća je pojačanje pneumatskog signala iz regulatora u kapacitet signala većeg obujma istog ili većeg tlaka, ili pak jednog i drugog.

4.3.2. Elektromagnetski pretvornik

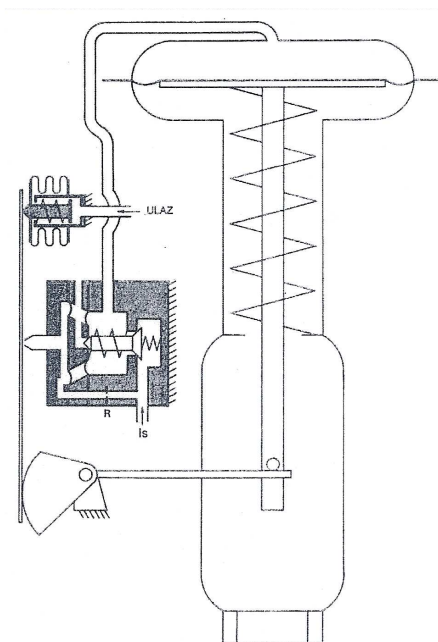
Danas je načešći način vođenja procesa orijentiran na procesna računala, na elektroničke ili električne uređaje, a izvršni organi (regulacijski ventil i sl.) obično na pneumatski pogon kao najekonomičniji. Zbog toga je neophodno između elektroničke jedinice za vođenje i pneumatskog izvršnog organa ugraditi elektromagnetski pretvornik, čija je osnovna zadaća pretvaranje standardnog električnog signala u standardni pneumatski signal i obrnuto. Prikaz rada je prikazan na slici 4.17.



Slika 4.17. Elektropneumatski pretvornik

4.3.3. Postavnici ventila - pozicioneri

Pozicioneri služe za osiguranje točnog pomaka (pozicije) vretena regulacijskog ventila koji traži upravljački signal iz regulatora. Da bi se to ostvarilo potrebno je na izvršnu spravu instalirati mehaničku povratnu vezu, a uređaj koji obavlja to postavljanje vretena u točan položaj naziva se pozicioner. Na slici 4.18. prikazana je shema pneumatskog motora s oprugom i s povratnom vezom pozicije vretena, a takav se komplet naziva pozicioner. Element povratne veze pretvara pozicije vretena u silu, struju ili napon.



Slika 4.18. Prikaz postavnika ventila - pozicionera

Pozicioneri se obično upotrebljavaju kod sporih sustava kao što su: regulacija razine i miješanje fluida, dok se za brze sustave kao što su regulacija tlaka kapljevine i plina te regulacije protoka upotrebljavaju pneumatska pojačala.