

## OSNOVNI ELEMENTI SISTEMA UPRAVLJANJA

Kao što smo naveli u uvodnom delu ove knjige, pri projektovanju sistema upravljanja treba najpre definisati upravljačke zahteve, odnosno ciljeve upravljanja, definisanjem izlaznih veličina kojima treba upravljati i zahteva u pogledu njih. Zatim treba definisati moguća merenja u sistemu i moguće manipulativne ulazne promenljive i poremećaje koji deluju na proces. Sledeći korak se sastoji u izboru konfiguracije upravljanja, odnosno informacione strukture koja povezuje merenja i manipulativne promenljive u sistemu. Na kraju treba izvršiti izbor i specifikaciju svih elemenata koje treba ugraditi u sistem upravljanja da bi se ostvarili postavljeni zahtevi upravljanja.

Osnovni elementi koji čine sistem upravljanja su proces koji predstavlja objekat upravljanja, merni element, izvršni element i regulator. Regulator predstavlja element sistema koji se projektuje sa ciljem da ostvari željene dinamičke karakteristike, i tipovi, način izbora i projektovanje regulatora zavise od vrste odabrane konfiguracije upravljanja. Zbog toga će regulatori, kao izuzetno važni elementi sistema upravljanja biti obrađeni u delovima koji se odnose na konkretne konfiguracije upravljanja. Posebna pažnja će biti posvećena izboru i projektovanju regulatora konfiguracije upravljanja sa negativnom povratnom spregom, u četvrtom delu ove knjige. U petom delu će ukratko biti opisani načini projektovanja regulatora za složenije konfiguracije upravljanja.

Procesi koji predstavljaju objekte upravljanja u procesnoj industriji imaju određene specifične karakteristike koje zavise od njihove konstrukcije i fizičko-hemijskih procesa koji se u njima odigravaju. Za upravljanje njihovim radom se mogu upotrebiti različite konfiguracije sistema upravljanja, ali karakteristike samog procesa nisu njima uslovljene. O dinamici nekih karakterističnih procesa koji se javljaju u postrojenjima procesne industrije i dobijanju njihovih teorijskih determinističkih modela je bilo dosta reči u drugom delu ove knjige.

Uloga mernih elemenata se razlikuje u različitim konfiguracijama sistema upravljanja. Oni najčešće služe za merenje izlaznih promenljivih kojima treba upravljati (kod sistema sa negativnom povratnom spregom) ali mogu služiti i za merenje ulaznih poremećaja (kod sistema sa upravnom spregom) ili za merenje sekundarnih izlaznih promenljivih (kod sistema posrednog upravljanja). Ali, u sva tri slučaja se za merenje određene fizičke veličine koriste isti uređaji, tako da ćemo u ovom delu knjige dati osnovne karakteristike mernih elemenata koji se koriste u sistemima automatskog upravljanja i postupak za njihov pravilan izbor. Daćemo pregled osnovnih principa i instrumenata za merenje najvažnijih procesnih promenljivih: pritiska, nivoa, protoka, temperature i sastava.

Izvršni element predstavlja element sistema upravljanja pomoću koga se, na osnovu informacije iz regulatora dobijene obradom izmerenih veličina u procesu, vrši delovanje na proces promenom manipulativnih promenljivih, u cilju upravljanja njegovim radom. Tipovi, način rada, izbor i specifikacija izvršnog elementa praktično ne zavise od odabrane konfiguracije upravljanja i biće ukratko obrađeni u poglavlju 3.3. Kako se kao izvršni element u procesnoj industriji najčešće koristi regulacioni ventil, ovo

### 3.2. MERNI ELEMENTI

Neophodan uslov za bilo koju vrstu upravljanja procesom je ostvarivanje merenja određenih promenljivih tog procesa. Zbog toga je vrlo značajno odabrati merne elemente koji će dati tačna, precizna i pouzdana merenja. Kod regulacionih sistema sa povratnom spregom, vrši se merenje izlaznih promenljivih kojima se želi upravljati dok se kod upravljanja sa upravnom spregom mere ulazni poremećaji. Merni elementi predstavljaju glavni izvor informacija u sistemu upravljanja i zbog toga se često nazivaju *informacioni elementi*.

Kao što smo naglasili, da bi mogli da se koriste u sistemima automatskog upravljanja, merni elementi treba da konvertuju fizičku veličinu koja se meri u neki od standardnih signala. Elementi koji se koriste u te svrhe se nazivaju *merni pretvarači (davači)*, ili, češće, *merni elementi - transmiteri*. Merni elementi - transmiteri se sastoje zapravo iz dva dela: *osetnog elementa (senzora)* i *pretvaračkog dela (transmitera)*. Zavisno od vrste transmitera, izlaz iz mernog elementa će biti standardni pneumatski, strujni, naponski ili digitalni signal.

#### 3.2.1. Statičke i dinamičke karakteristike mernih elemenata

Svaki merni element ima svoju statičku i dinamičku karakteristiku. Kvalitetan merni instrument treba da zadovoljava sledeće uslove:

1. statička karakteristika treba da bude što manje podložna uticaju ambijentalnih uslova, da u toku životnog veka instrumenta sačuva svoj oblik unutar zadatih granica i da bude definisana unutar opsega koji diktira režim rada objekta;
2. dinamička karakteristika treba da ima što manje dinamičke parametre (mrtvo vreme, vremenske konstante), relativno u odnosu na dinamičke parametre objekta upravljanja na kome se vrši merenje.

##### 3.2.1.1. Statičke karakteristike mernih elemenata

Statička karakteristika mernog elementa se najjednostavnije može predstaviti preko *pojačanja* koje se definiše na sledeći način:

$$K_m = \frac{\text{opseg standardnog signala}}{\text{opseg merene veličine}} \quad (3.2-1)$$

$K_m$  nije bezdimenziona veličina: dimenzije brojioca zavise od vrste signala (*bar*, *V*, *mA*), a dimenzije imenioca od prirode merene veličine (*K*, *kPa*, *m<sup>3</sup>/s*, *m*).

Ako merni element ima nelinearnu statičku karakteristiku, pojačanje  $K_m$  nije konstantno. Tipičan primer nelinearnih mernih elemenata predstavljaju prigušni elementi za merenje protoka kod kojih je protok srazmeran kvadratnom korenu signala koji je proporcionalan padu pritiska na prigušnici. Kad god je moguće, koriste se instrumenti sa linearnom statičkom karakteristikom, jer u suprotnom treba kompenzovati nelinearnost. Tako se kod merenja protoka prigušnicama najčešće uvodi dodatni element kojim se vrši korenovanje signala (korenator), iz koga se dobija signal proporcionalan protoku.

Pored pojačanja, često se koriste i sledeći pokazatelji statičke karakteristike mernog elementa:

- merni opseg
- merno područje
- osetljivost
- tačnost
- preciznost.

*Merni opseg* predstavlja razliku između najviše i najniže vrednosti fizičke veličine koja se može izmeriti pri datoj kalibraciji mernog elementa. Pri tome, najnižoj vrednosti odgovara izlaz iz transmitera od 0.2 bar (ako je transmitter pneumatski), odnosno 4 mA (ako je transmitter električni), dok gornjoj vrednosti

odgovara izlazni signal od 1 bar, odnosno 20 mA. Pri izboru opsega mernog instrumenta treba poštovati kompromis između suprotnih zahteva dobre rezolucije, koja se dobija u uskom opsegu, i obuhvatanja što većeg obima promene merene veličine, pri korišćenju širokog opsega.

*Merno područje* predstavlja maksimalni merni opseg u okviru koga se dati transponder može upotrebiti, odnosno kalibrisati.

*Osetljivost* mernog elementa se definiše kao odnos promene izlaznog signala i promene merene veličine koja je izaziva. Kod linearnih elemenata, osetljivost je konstanta. Najčešće se želi visoka osetljivost instrumenta, što se može postići smanjenjem mernog opsega.

*Tačnost* mernog elementa definiše blizinu merenja stvarnoj vrednosti izmerene veličine i najčešće se izražava preko maksimalne greške merenja. Greška se može definisati kao apsolutna ili kao relativna, u odnosu na tačnu vrednost ili u odnosu na punu skalu instrumenta.

*Preciznost* definiše najmanju promenu merene veličine koja se može izmeriti i ponovljivost rezultata merenja. Ovaj pojam se često brka sa pojmom tačnosti instrumenta, ali treba uočiti da instrument može davati precizne i ponovljive rezultate merenja, ali da ipak bude netačan.

### 3.2.1.2. Dinamičke karakteristike mernih elemenata

Za izbor dinamičkih karakteristika mernog elementa su relevantne dinamičke karakteristike procesa. Veliki broj mernih elemenata se može prikazati kao približnom prenosnom funkcijom sistema prvog reda sa čistim kašnjenjem:

$$G_m(s) = \frac{K_m e^{-D_m s}}{\tau_m s + 1} \quad (3.2-2)$$

Ako se proces prikaže prenosnom funkcijom istog oblika:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-D_p s}}{\tau_p s + 1} \quad (3.2-3)$$

može se smatrati da su dinamičke karakteristike mernog elementa zadovoljavajuće ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$D_m < 0.2 D_p \text{ i } \tau_m < 0.2 \tau_p \quad (3.2-4)$$

Treba naglasiti da dinamička karakteristika mernog elementa može da zavisi od uslova rada. Na primer, vremenska konstanta termometra zavisi od fluida čija se temperatura meri i od brzine strujanja fluida (preko koeficijenta prelaza toplote koji utiče na vremensku konstantu).

Merni elementi koji imaju pokretne delove i sopstvenu masu, odnosno inerciju, imaju dinamičke karakteristike sistema drugog reda (na primer U-manometar). Ovi merni elementi često imaju oscilatoran odziv, zavisno od koeficijenta prigušenja. Ukoliko se konstrukcijom mernog elementa može podesiti njegov koeficijent prigušenja, najčešće se koriste sledeće preporuke: ako se instrument koristi samo za indikaciju, pogodno je da bude  $\xi \approx 0.7$ , dok je u slučajevima kada se signal sa mernog elementa koristi za upravljanje najpovoljnije da ovaj element bude kritično prigušen ( $\xi=1$ ).

### 3.2.2. Osetni i pretvarački delovi mernih elemenata

Merni elementi koji se koriste u sistemima automatskog upravljanja se najčešće sastoje iz osetnog i pretvaračkog dela. Osetni elementi (senzori) zavise od fizičke veličine koja se meri i uslova rada, dok pretvarački zavise od tipa izlaza iz senzora i vrste izlaznog signala koji daju.

#### 3.2.2.1. Najčešće korišćeni senzori u procesnoj industriji

Procesne veličine koje u postrojenjima procesne industrije najčešće treba odrediti na osnovu merenja su:

temperatura, pritisak, protok, nivo i sastav i koncentracija. Detaljan pregled principa merenja pojedinih fizičkih veličina i odgovarajućih senzora koji se najčešće koriste u postrojenjima procesne industrije biće dat u poglavljima 3.2.3. do 3.2.7. Sada ćemo samo nabrojati najčešće korišćene senzore za merenje pojedinih procesnih veličina.

*Senzori za merenje protoka:* U industrijskim uslovima se najčešće koriste prugušni elementi (prigušna ploča, venturi merilo i sl.), kod kojih se do informacije o protoku dolazi na osnovu merenja razlike pritiska ispred i iza prigušnog elementa. Druga često korišćena grupa merača protoka su turbinski merači, kod kojih se protok određuje na osnovu broja obrta turbine. Merači protoka imaju vrlo brzu dinamiku, i najčešće se uzima u obzir samo njihova statička karakteristika.

*Senzori za merenje pritiska i diferencijalnog pritiska:* Najčešće se koriste instrumenti čiji je rad baziran na elastičnoj deformaciji materijala (Burdonova cev, elastični mehovi i dijafragme). Ovi instrumenti obično imaju dinamičku karakteristiku sistema drugog reda. Dosta se koriste i piezoelektrični instrumenti.

*Senzori za merenje temperature:* Najčešće korišćeni termometri u industriji su termoelementi (termoparovi), manometarski termometri, otporni termometri i termistori.

*Senzori za merenje nivoa:* Najčešće se koriste uređaji sa plovkom, uređaji koji rade na principu potiskivanja i na principu razlike hidrostatičkog pritiska. Takođe su razvijeni merači nivoa koji rade na principu merenja električne provodnosti, električne permitivnosti ili na principu zvučne rezonance.

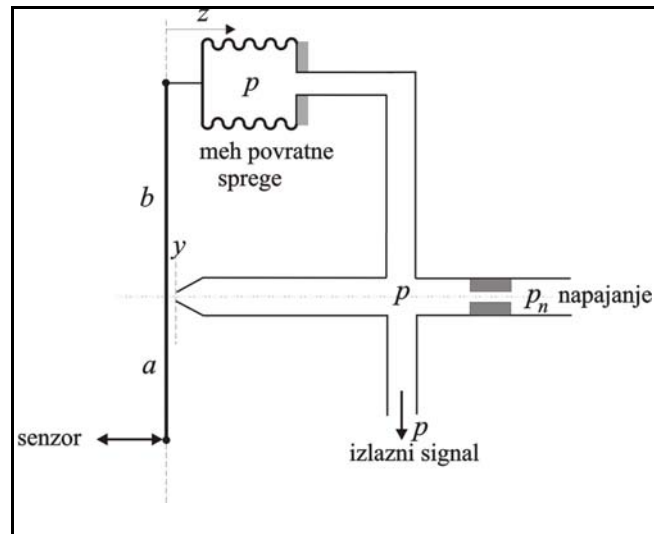
*Analizatori sastava:* Zasnivaju se najčešće na potenciometrijskim, konduktometrijskim, pH-metrijskim, kolorometrijskim i sličnim merenjima. Pored toga se koriste gasni hromatografi i različiti tipovi spektroskopskih analizatora. Kod ovih instrumenata se pored ostalog mora voditi računa i o selektivnosti. Dinamičke karakteristike ovih instrumenata obično imaju značajno mrtvo vreme. Pored toga, analizatori sastava imaju malu pouzdanost u uslovima eksploatacije (lako se dekalibrišu ili otkazuju) i prilično su skupi. Analiza sastava u biohemijskim sistemima predstavlja poseban problem i svrhu njegovog rešavanja razvijeni su različiti biospecifični senzori.

### 3.2.2.2. Pretvarački deo mernog elementa-transmitera

Pretvarački deo mernog elementa zavisi od tipa instrumenta, odnosno signala koji treba dobiti na izlazu (pneumatski, električni analogni ili digitalni) i od vrste signala koji se dobija na izlazu iz osetnog dela mernog elementa (senzora). Bez želje da problemu projektovanja mernih pretvarača priđemo generalno, daćemo primere samo nekih rešenja pneumatskih i električnih analognih transmitera koji se javljaju u mernim elementima koji se ugrađuju u postrojenja procesne industrije.

U velikom broju slučajeva, fizička veličina koja se meri se, pomoću odgovarajućeg senzora pretvara u malo mehaničko pomeranje (npr. kod dilatacionih termometara, merača pritiska sa elastičnim elementima, merača nivoa sa plovkom i vodjicom i td.). U tim slučajevima se koriste standardni pneumatski ili električni transmiteri za pretvaranje mehaničkog pomeranja u standardni pneumatski ili električni signal.

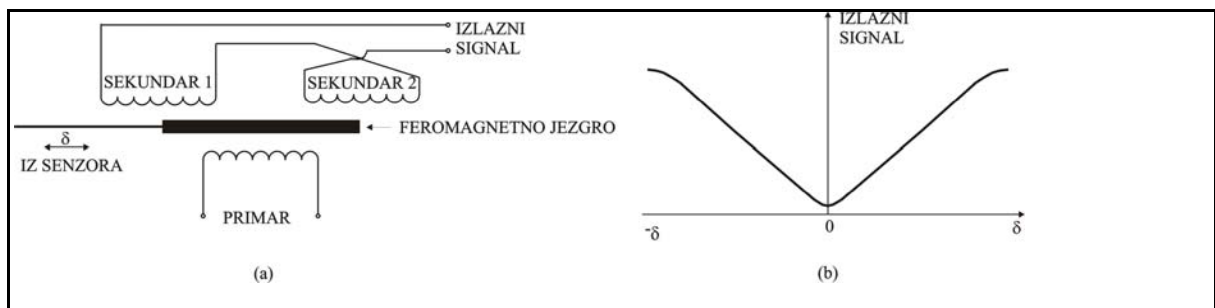
Pneumatski transponder malih mehaničkih pomeranja. Pneumatski transponder se zasniva na osnovnom principu pločica-mlaznica koji smo opisali u drugom delu knjige, u poglavlju 2.3.2.5. Najjednostavnija konstrukcija pneumatskog transmitera je prikazana na slici 3.2-1.



Slika 3.2-1. Pneumatski transmiter mehaničkog pomeranja

Slobodni kraj pločice pneumatskog transmitera je krutom vezom povezan sa senzorom, tako da se mehaničko pomeranje koje se dobija na izlazu iz senzora prenosi na kretanje pločice. Na taj način se menja veličina zazora između pločice i mlaznice, što kao rezultat daje promenu povratnog pritiska u mlaznici. Dobijeni signal je proporcionalan ulaznom mehaničkom pomeranju. Meh povratne sprege u ovom sistemu služi za smanjenje osetljivosti i povećanje stabilnosti sistema pločica-mlaznica. Princip rada pneumatskog transmitera je identičan sa principom rada proporcionalnog pneumatskog regulatora koji će biti detaljno opisan u poglavlju 4.2.4.1.

Diferencijalni transformator kao transmiter mehaničkog pomeranja. Jedan od najčešće korišćenih uređaja za pretvaranje mehaničkog pomeranja u električni signal je diferencijalni transformator, koji je šematski prikazan na slici 3.2-2(a). On se sastoji od jednog primarnog i dva sekundarna namotaja koji su spregnuti tako da se indukovani naponi u njima oduzimaju. Feromagnetno jezgro diferencijalnog transformatora je krutom vezom povezano sa senzorom, tako da mehaničko pomeranje koje nastaje kao rezultat promene merene veličine izaziva mala pomeranja jezgra. Promena položaja jezgra diferencijalnog transformatora izaziva promenu indukovanih napona u sekundarima 1 i 2, a time i ukupnog indukovanog napona koji predstavlja izlazni signal iz transmitera. Na ovaj način se vrlo jednostavno mala mehanička pomeranja prevode u električni signal.



Slika 3.2-2. Diferencijalni transformator kao transmiter malih mehaničkih pomeranja: (a) princip rada; (b) karakteristika

Na slici 3.2-2(b) je prikazan tipičan oblik zavisnosti izlaznog signala iz diferencijalnog transformatora od položaja feromagnetnog jezgra  $\delta$  (u odnosu na nulti položaj pri kome su indukovani naponi u oba sekundarna namotaja jednaki). Diferencijalni transformator kao izlaz daje pozitivan ili negativan signal i

ima linearnu karakteristiku za male vrednosti pomeranja  $\delta$ .

Pored diferencijalnog transformatora, često se koriste i transmiteri sa električnim izlazom koji rade na principu merenja promene električnog kapaciteta ili električnog otpora.

U nastavku ćemo dati pregled najvažnijih metoda i instrumenata za merenje osnovnih fizičkih veličina koje su od interesa u postrojenjima procesne industrije. Pri tome će veća pažnja biti posvećena principima na kojima se zasnivaju ova merenja nego konstrukciji samih mernih uređaja.

### 3.2.3. Instrumenti za merenje protoka

Merenje protoka je izuzetno značajno u postrojenjima procesne industrije, jer se preko regulacije protoka vrši upravljanje materijalnim bilansom postrojenja. U principu se mere tri vrste protoka:

- zapreminski protok:

$$F = \frac{dV}{dt} [m^3/s] \quad (3.2-5)$$

- maseni protok:

$$F_m = \frac{dm}{dt} [kg/s] \quad (3.2-6)$$

- komadni protok:

$$F_n = \frac{N}{\Delta t} [1/s] \quad (3.2-7)$$

Osetni elementi za merenje protoka se zasnivaju na nekoliko osnovnih principa. To su:

- merenje potisnute zapremine ( $F$ )
- konverzija kinetičke energije u energiju pritiska ili u potisak ( $F$ )
- merenje količine kretanja i momenta količine kretanja ( $F$ ,  $F_m$ )
- merenje srednje brzine ili integrala lokalnih brzina ( $F$ )
- korišćenje toplotnog bilansa ( $F_m$ )
- korišćenje materijalnog bilansa ( $F_m$ )
- brojanje komada ( $F_n$ )

U ovom pregledu ćemo se zadržati na principima i mernim elementima - transponderima za merenje zapreminskog protoka fluida, kao najvažnijeg sa aspekta procesne industrije.

#### 3.2.3.1. Merači potisnute zapremine fluida

Kod uređaja za merenje protoka iz ove grupe, protok fluida se meri na osnovu prenete zapremine fluida kroz rotacioni, nutacioni ili oscilatorni sistem. Pri tome se deo energije pritiska fluida koristi za pokretanje merača. Izlazni signal koji je proporcionalan protoku predstavlja broj obrtaja ili hodova pokrenutih elemenata mernog instrumenta u jedinici vremena, odnosno, dobija se u obliku frekvencije. Opseg merenja je ograničen za određenu veličinu instrumenta. Ovi merači nisu pogodni za merenje malih ili velikih protoka. Pri malim protocima gubici fluida kroz zazor pokretnog sistema izazivaju velike greške, dok pri velikim protocima dolazi do isuviše velikog broja obrtaja pokretnog sistema u jedinici vremena. Greške pri merenju zavise od vrednosti protoka, viskoznosti fluida, načina zaptivanja pokretnog sistema i preciznosti izrade instrumenta.

Najčešće korišćeni tipovi instrumenata za merenje protoka na osnovu potisnute zapremine su sledeći:

(a) *Rotacioni merači protoka:*

- gasni satovi (za merenje protoka gasova)
- merači sa rotacionim osmicama (za merenje protoka gasova)
- merači sa rotacionim eliptičnim zupčanicima (za merenje protoka tečnosti)

- merači sa rotacionim trouglastim klipom (za merenje protoka tečnosti i gasova)
- merači sa klizećim krilcima (za merenje protoka viskoznih tečnosti)

(b) *Nutacioni merači protoka*, koji se zasnivaju na složenom kretanju nutacijom pregradne ploče u specijalnom zglobnom ležištu. Koriste se za merenje protoka čistih tečnosti malog i srednjeg viskoziteta (benzina, mleka, piva, ulja i slično).

(c) *Oscilatorni merači*:

- merači sa oscilatornim cilindričnim klipom (za merenje malih protoka tečnosti, primenljivi za merenje protoka korozivnih tečnosti);
- merači sa oscilatornim membranama ili mehovima (za merenje protoka gasova).

Kao primer uređaja iz ove grupe, na slici 3.2-3. je šematski prikazan merač protoka sa rotacionim eliptičnim zupčanicima, koji se koristi za merenje protoka tečnosti. Dva cilindrična impelera, karakterističnog preseka oblika elipse, rotiraju u cilindričnom kućištu, pri čemu se pri svakom obrtu prenosi količina fluida definisana geometrijom merača. Merač sa rotacionim osmicama koji služi za merenje protoka gasova, radi na istom principu.

Ovi merači se izrađuju za nominalne prečike cevovoda od 38 do 600 mm i nominalne protoke od 2 do 4000 m<sup>3</sup>/h. Mogu se koristiti na temperaturama do 200 °C i pritiscima do 80 bar.

Merači protoka koji rade na principu potisnute zapremine imaju veliku tačnost: kod merenja protoka srednje viskoznih tečnosti greška merenja iznosi do  $\pm 0.2\%$ , dok kod merenja protoka gasova greška iznosi do  $\pm 2\%$ .

Merači protoka iz ove grupe se koriste za merenje zapreminskog protoka i njegovu integraciju, odnosno za određivanje protekle zapremine. Pošto se kao izlaz dobija frekvencija, u svrhu prenosa i daljeg korišćenja, izlazni signal se preko odgovarajućeg pretvarača prevodi u strujni ili naponski električni signal.

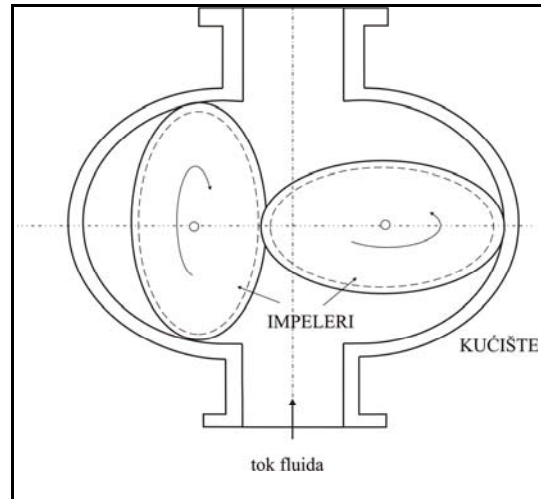
Merači protoka koji rade na principu merenja potisnute zapremine fluida se ne mogu koristiti za merenje protoka fluida koji sadrže suspendovane čestice. U industriji se uglavnom koriste za merenje i doziranje manjih zapremina i protoka fluida.

### 3.2.3.2. Merači protoka koji rade na principu prenosa kinetičke energije fluida (turbinski merači)

Kod turbinskih merača se merenje zapreminskog protoka fluida zasniva na prenosu količine kretanja fluida lopaticama turbine merača. Koriste se dva osnovna tipa ovih uređaja:

(a) Tangencijalni - mlazni merači protoka kod kojih mlaz tečnosti deluje na izdubljene lopatice obrtnog kola, a broj obrtaja se mehanički prenosi na brojač koji integriše proteklu količinu. Najčešće se koriste za merenje utrošene zapremine vode. Greška merenja iznosi oko  $\pm 2\%$  i povećava se pri malim protocima.

(b) Aksijalni - propelerski merači protoka koji se sastoje od propelera koji je aksijalno postavljen u cevnom elementu istog prečnika kao i cevovod u koji je ugrađen. Fluid (tečnost ili gas) protiče kroz lopatice propelera i obrće ga. Propeler je načinjen od feromagnetnog materijala i njegovo obrtanje se prenosi, preko induktivnog davača postavljenog izvan cevi, na pretvarač koji frekvencijuu obrtanja propelera pretvara u standardni naponski ili strujni signal. Propelerski turbinski merači protoka se koriste



Slika 3.2-3. Merač protoka sa rotacionim eliptičnim zupčanicima

prvenstveno za merenje protoka tečnosti malih i srednjih viskozitetu, ali se mogu koristiti i za merenje protoka gasova. Nominalni prečnici cevovoda mogu biti 6-750 mm, a protoci koji se mere od 0.004 do 140000 dm<sup>3</sup>/min. Za industrijske instrumente je opseg merenja najčešće od 12:1 do 30:1, mada se rade i instrumenti sa opsegom 150:1. Izrađuju se i turbinski merači za vrlo korozivne fluide. Mogu se koristiti pri pritiscima do 200 bar i temperaturama od -255 do 300 °C.

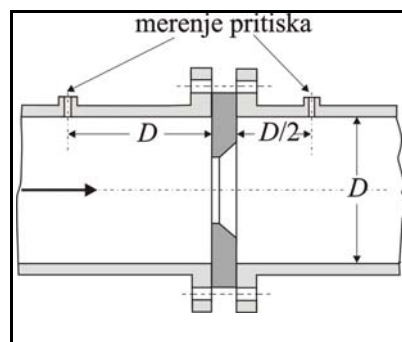
Greške merenja ovih uređaja su manje od  $\pm 0.25\%$ , reproduktivnost bolja od  $\pm 0.02\%$  a linearnost u opsegu 1:12 bolja od  $\pm 0.5\%$ . Zbog svoje velike tačnosti i pouzdanosti, turbinski merači se koriste kao sekundarni standardi za merenje protoka.

### 3.2.3.3. Merači protoka zasnovani na merenju pada pritiska (prigušnice)

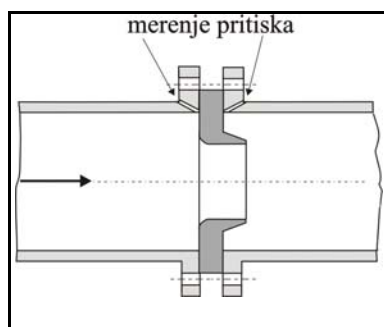
Jedan od najčešće korišćenih principa merenja protoka u industriji se zasniva na korišćenju prigušnica. To su merači protoka kod kojih se preko zbog suženja u cevovodu kinetička energija fluida delimično pretvara u energiju pritiska. Promenljiva razlika pritisaka ispred i iza suženja predstavlja nelinearnu funkciju srednje brzine, odnosno zapreminskog protoka fluida. Prigušni elementi se koriste za merenje protoka jednofaznih tečnosti, gasova i para pri turbulentnom režimu strujanja i u širokim granicama temperature i pritiska.

Osnovni tipovi prigušnica. Postoje tri osnovna tipa prigušnica: prigušna ploča, mlaznica (sisak) i Venturi-cev. Sva tri tipa prigušnica su standardizovana. Na slici 3.2-4. je prikazana konstrukcija standardne prigušne ploče, na slici 3.2-5. mlaznice i na slici 3.2-6. Venturi-cevi.

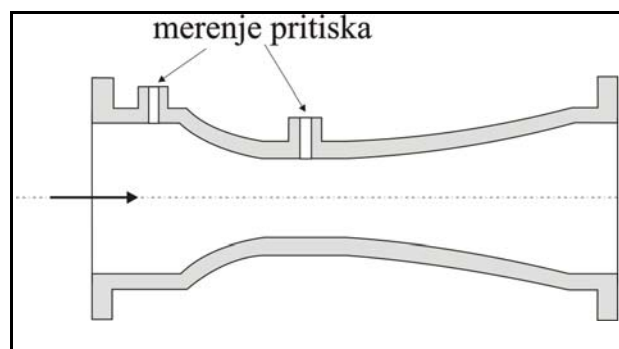
Merni sistem za merenje protoka pomoću prigušnica se sastoji od primarnog elementa - prigušnice, ugrađene u cevovod, koja izaziva suženje mlaza fluida, transmitera diferencijalnog pritiska kojim se meri razlika pritisaka ispred i iza prigušnice i vodova kojima je ovaj diferencijalni manometar povezan sa mestima na kojima treba meriti pritisak. Ovi vodovi su najčešće opremljeni ventilima, a kada je to potrebno i zaštitnim sudovima.



Slika 3.2-4. Konstrukcija standardne prigušne ploče



Slika 3.2-5. Konstrukcija mlaznice

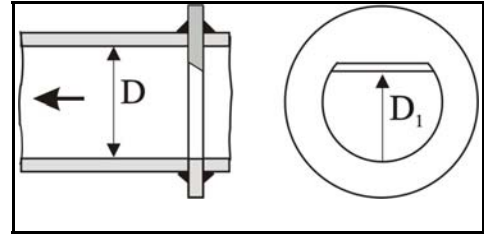


Slika 3.2-6. Konstrukcija Venturi cevi

Standardna prigušna ploča se izrađuje u obliku tanke ploče (debljine 2-6 mm i ne više od 0.1 prečnika cevovoda) sa kružnim otvorom, od mesinga ili čelika. Kod mlaznice je otvor ploče profilisan i produžen u obliku mlaznice, dok se kod Venturi-cevi suženje mlaza postiže profilisanjem cevi. Kod svih tipova prigušnica, osnovni parametar prigušnice predstavlja odnos prečnika otvora i unutrašnjeg prečnika cevovoda, koji se označava sa  $m$ .



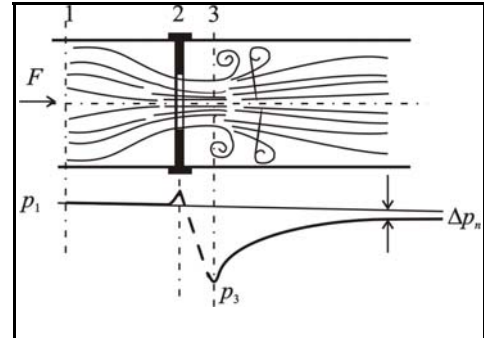
Standardne prigušnice se po pravilu ugrađuju na horizontalne delove cevovoda. Prigušne ploče i mlaznice se ugrađuju između prirubnica, dok se Venturi-cev ugrađuje umesto dela cevi. Tok fluida ispred prigušnice treba da bude umiren, tako da treba predvideti dovoljnu dužinu prave cevi ispred prigušnice.



Slika 3.2-7. Segmentna prigušnica

Pored ova tri osnovna tipa prigušnica, postoje i druge konstrukcije. Za merenje protoka tečnosti sa suspendovanim česticama, često se koriste segmentne prigušnice, čiji je šematski prikaz dat na slici 3.2-7.

Princip merenja protoka pomoću prigušnica. Princip merenja zapreminskog protoka fluida pomoću prigušnice biće prikazan na primeru prigušne ploče koja je najjednostavnija. Na slici 3.2-8. je šematski prikazano strujanje fluida kroz deo cevi u koji je ugrađena prigušna ploča i padovi pritiska na tom delu cevi. Presek označen sa 3 predstavlja mesto na kome je mlaz fluida najuži i naziva se *vena kontrakta*.



Slika 3.2-8. Strujanje fluida kroz cev u koju je ugrađena prigušna ploča i odgovarajući padovi pritiska

Primenom Bernulijeve (Bernoulli) jednačine na preseke 1 i 3:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_3}{\rho} + \frac{v_3^2}{2} + \xi_{1-3} \frac{v_3^2}{2} \quad (3.2-8)$$

može se doći do izraza za zapreminski protok kroz prigušnicu:

$$F = \alpha_0 A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3.2-9)$$

Koeficijent  $\alpha_0$  se naziva *teorijski protočni broj prigušnice*, i definiše se na

sledeći način:

$$\alpha_0 = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi_{1-3}}} \quad (3.2-10)$$

U ovim jednačinama je:

-  $m = A_2/A_1$  - standardizovani odnos preseka otvora

prigušnice i preseka cevovoda;

-  $m = A_3/A_2$  - koeficijent kontrakcije mlaza;

-  $A_1, A_2, A_3$  - površine poprečnog preseka cevovoda, otvora prigušnice i mlaza u veni kontrakti;

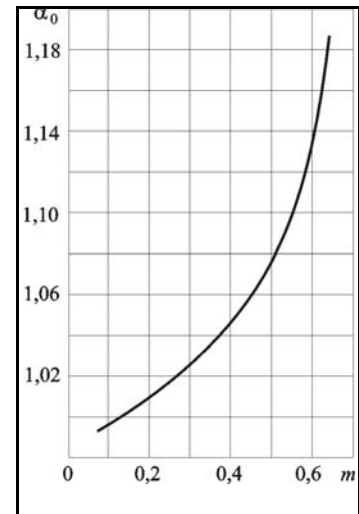
-  $v_1, v_3$  - srednja brzina fluida u cevovodu, odnosno u veni kontrakti;

-  $p_1, p_3$  - pritisci u presecima 1 i 3;

-  $\rho$  - gustina fluida;

-  $\xi_{1-3}$  - koeficijent mesnog otpora prigušnice;

-  $F$  - zapreminski protok fluida.

Slika 3.2-9. Zavisnost teorijskog protočnog broja od  $m$ 

Teorijski protočni broj zavisi od tipa i konstrukcije prigušnice, kao i od odnosa  $m$  i  $Re$ -broja. Zavisnost teorijskog protočnog broja od  $m$ , za standardne prigušne ploče, mlaznice i Venturi-merila, prikazana je na slici 3.2-9.

Pri merenju protoka pomoću prigušnica, ova vrednost mora da se koriguje množenjem sa popravnim koeficijentima, od kojih su najvažniji:

-  $k_m$  - popravni koeficijent za viskoznost, koji se koristi kada je  $Re$ -broj manji od granične vrednosti pri kojoj koeficijent mesnog otpora prigušnice više ne zavisi od brzine strujanja fluida;

-  $k_p$  - popravni koeficijent za gustinu, koji se koristi za stišljive fluide (za gasove i pare);

-  $k_p$  - popravni koeficijent za pritisak, koji se koristi ako se merenje pritiska ne vrši tačno u presecima 1 i 3. Ovaj koeficijent se mora odrediti eksperimentalno, za nestandardno postavljene cevi;

-  $k_\delta$  - popravni koeficijent za hrapavost, koji se uvodi za prigušnice postavljene na hrapave cevi;

-  $k_\theta$  - popravni koeficijent za temperaturu, koji uzima u obzir temperaturno širenje otvora prigušnice pri merenju protoka na povišenim i sniženim temperaturama.

Ukupni izraz za protok kroz prigušnicu se može prikazati kao:

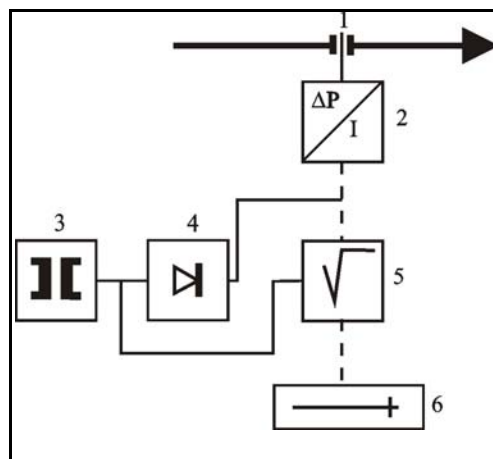
$$F = C \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (3.2-11)$$

gde veličina  $C$ , koja obuhvata sve popravne koeficijente:

$$C = \alpha_0 k_\mu k_p k_\rho k_\delta k_\theta A_{2(20)} \sqrt{2} \quad (3.2-12)$$

predstavlja konstantu prigušnice i za standardne prigušnice se može odrediti računski, a za nestandardne eksperimentalno.

Pošto je veza između protoka i pada pritiska na prigušnici koji se meri nelinearna (izmereni signal je proporcionalan kvadratu protoka), da bi se dobila linearna veza između izlaznog signala i merene veličine (protoka), mora se izvršiti linearizacija. To se može postići korišćenjem transmitera diferencijalnog pritiska koji ima nelinearnu karakteristiku (oblika kvadratnog korena) ili dodavanjem posebnog računskog elementa - korenatora, kojim se vrši linearizacija izlaznog signala iz transmitera diferencijalnog pritiska. Na slici 3.2-10. je prikazana blok šema koja prikazuje merenje protoka tečnosti pomoću prigušne ploče, u sistemu sa standardnim električnim signalom. Elementi ovog sistema za merenje su: 1 - prigušna ploča, 2 - pretvarač diferencijalnog pritiska, 3 - napojni transformator, 4 - izvor jednosmernog napajanja (ispravljač), 5 - korenator, 6 - pokazivač.



Slika 3.2-10. Blok šema merenja protoka tečnosti pomoću prigušne ploče, u sistemu sa standardnim električnim signalom

Položaj priključaka za merenje razlike pritisaka ispred i iza prigušnice je standardizovan. Prvi standard, koji se najčešće koristi, predviđa da je udaljenost ovih priključaka jednaka prečniku cevovoda ( $D$ ) ispred i polovini prečnika cevovoda ( $D/2$ ) iza prigušnice. Drugi standard predviđa udaljenosti  $3D$  ispred i  $7D$  iza prigušnice. U prvom slučaju se meri maksimalna razlika pritisaka, a u drugom se meri nepovratni pad pritiska  $\Delta p_n$  koji nastaje zbog mehanizma otpora prigušnice, i koji iznosi:

$$\Delta p_n = (1 - m) \Delta p \quad \text{za prigušnu ploču}$$

$$\Delta p_n = (1 - 1.4m) \Delta p \quad \text{za mlaznicu}$$

(3.2-13)

$$\Delta p_n = (0.22 - 0.2m) \Delta p \quad \text{za Venturi - merilo}$$

#### 3.2.3.4. Merači protoka zasnovani na merenju sile otpora (anularna merila)

Princip rada anularnih merila se zasniva na merenju sile koja deluje na telo koje se nalazi u centru cevovoda, nastale usled otpora kretanju fluida. Postoje dve osnovne varijante anularnih merila: merila sa konstantnom silom i promenljivim poprečnim presekom cevovoda - *rotametri*, i merila sa promenljivom silom i konstantnim presekom cevovoda - *merila sa metom*.

Rotametri. Na telo koje se nalazi u struji fluida deluje sila:

$$F_w = \frac{C_w \rho_f v^2 A_0}{2} \quad (3.2-14)$$

gde je:  $v$  - srednja brzina fluida,  $\rho_f$  - gustina fluida,  $A_0$  - površina poprečnog preseka potopljenog tela i  $C_w$  koeficijent otpora.

Kod rotametara se kao telo koristi objekat, najčešće u obliku čigre ili sfere, koji slobodno lebdi u vertikalnoj koničnoj cevi kroz koju fluid struji naviše. Sila definisana jednačinom (3.2-14) se uravnotežava sa težinom potopljenog tela umanjenom za silu potiska. Da bi ovakva ravnoteža mogla da se uspostavlja pri promenljivom protoku, cev u kojoj se potopljeno telo kreće mora biti konična. U tom slučaju se dobija sledeća korelacija koja daje vezu između protoka fluida  $F$  i vertikalnog pomeranja potopljenog tela  $Y$ :

$$F = K_k Y \sqrt{\frac{2 g V_t (\rho_t - \rho_f)}{C_w A_0 \rho_f}} = C Y \quad (3.2-15)$$

gde je  $K_k$  nagib konusa, a  $V_t$  i  $\rho_t$  zapremina i gustina materijala potopljenog tela.

Na slici 3.2-11. su prikazana tri osnovna tipa rotametara: (a) rotametar sa čigrom, (b) rotametar sa kuglom i (c) rotametar sa plovkom na vođici.

*Rotametar sa čigrom* se koristi za merenje protoka malo viskoznih i providnih tečnosti i gasova. Konična cev je najčešće staklena ili plastična, a položaj čigre, i preko njega protok, se najčešće očitava vizuelno. Odnos maksimalnog i minimalnog protoka koji se može meriti je najčešće 10:1, tačnost merenja je oko  $\pm 2\%$ , a radni pritisci do 6 bara.

*Rotametar sa kuglom* je pogodan za merenje malih protoka, kao i za merenje protoka korozivnih tečnosti i gasova. Ostale karakteristike su slične kao kod rotametara sa čigrom.

U poslednje vreme se rotametri sa čigrom i sa kuglom koriste ne samo kao merači, već i kao transmiteri protoka. To je moguće ako se u čigru, odnosno kuglu rotametra ugradi stalni magnet, čiji se položaj prati spoljnim senzorima i pretvara u odgovarajući standardni signal.

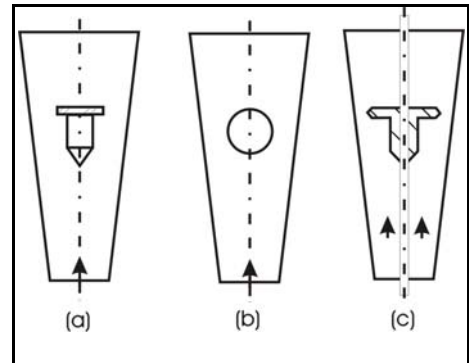
*Rotametar sa plovkom na vođici* se koristi za merenje protoka viskoznih i neprovidnih tečnosti (nafta, ulja i slično), kao i za veće protoke. Umesto staklene, koristi se metalna cev, a plovak je vezan za metalni šipku - vođicu, čiji slobodni kraj predstavlja jezgro diferencijalnog transformatora. Na ovaj način se pomeranje plovka, nastalo kao rezultat promene protoka, direktno prevodi u električni signal, koji se može koristiti za prenos i regulaciju.

Merila sa metom. Ovi uređaji se koriste za merenje protoka pri izrazito teškim uslovima rada: za viskozne fluide, visoke temperature i pritiske, otrovne i korozivne tečnosti. U ovom slučaju se u centru horizontalne cevi, na put struje fluida postavlja tanak disk - meta, čiji je položaj  $x$  proporcionalan protoku:

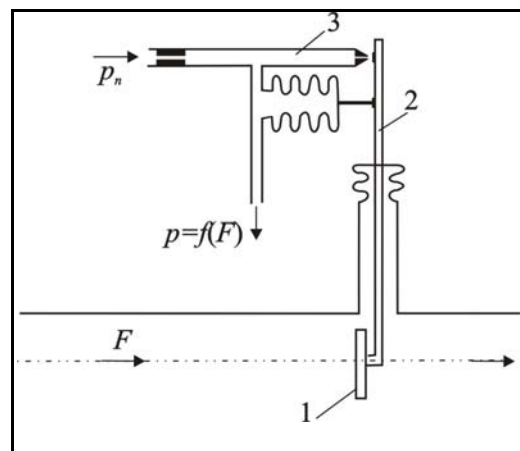
$$F = K x \quad (3.2-16)$$

Položaj mete se određuje metodom diferencijalnog transformatora, metodom merne trake ili korišćenjem pneumatskog pretvarača. Na slici 3.2-12. je prikazana konstrukcija merila sa metom sa pneumatskim pretvaračem. Oznake na slici odgovaraju sledećim delovima: 1 - meta, 2 - poluga na elastičnom zglobu, 3 - pneumatski pretvarač.

Merila sa metom se koriste za merenje protoka tečnosti i gasova u širokom opsegu protoka (od  $0.05 \text{ dm}^3/\text{s}$  do vrlo visokih vrednosti), viskoznosti (od vazduha do asfaltne mase), temperature (do  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i pritiska (od vakuuma do 100 bara). Zavisno od konstrukcije, opsega i uslova rada, tačnost merenja može biti od  $\pm 0.5\%$  do  $\pm 5\%$ .



Slika 3.2-11. Osnovni tipovi rotametara: (a) sa čigrom; (b) sa kuglom; (c) sa plovkom na vođici



Slika 3.2-12. Merač protoka sa metom sa pneumatskim pretvaračem

### 3.2.3.5. Noviji uređaji za merenje protoka

Pored navedenih, u novije vreme se koriste i različiti uređaji kod kojih se merenje protoka zasniva na nekim specifičnim fenomenima. Navešćemo najvažnije.

Elektromagnetni (indukcioni) merači protoka. Ovi uređaji koriste princip da se pri kretanju električnog provodnika kroz magnetno polje generiše napon. Njima se može meriti protok elektrolita ili drugih elektroprovodnih tečnosti, na osnovu merenja indukovane elektromotorne sile između dve elektrode na cevovodu, kada se cevovod nalazi u magnetnom polju. Polarizacija elektroda se izbegava korišćenjem naizmenničnog magnetnog polja. Elektromagnetni merači protoka se mogu koristiti za merenje srednjih brzina od  $10^{-4}$ , do vrlo velikih vrednosti. Viskoznost, temperatura, gustina i sadržaj suspendovanog materijala nemaju uticaja na merenje. Mogu se koristiti za široke opsege pritisaka.

Osnovni uslovi za korišćenje elektromagnetnih merača protoka su da je specifična električna otpornost fluida manja od  $3.5 \times 10^{-4} \Omega m$ , da je cevovod po celom preseku ispunjen tečnošću i da je raspored brzina u cevovodu simetričan. Greška merenja je manja od  $\pm 0.5\%$ , otpor strujanju je zanemarljiv, a odziv na promenu protoka vrlo brz (reda veličine 1 ms).

Merači protoka zasnovani na otkidanju vrtloga. Ovi uređaji koriste pojavu otkidanja vrtloga koji se javljaju kada fluid struji oko tela nehidrauličkog oblika. Tok fluida ne može da sledi oblik objekta i granični sloj fluida se odvaja od njega, formirajući turbulentne vrtloge sa strana objekta. U toku kretanja, veličina ovih vrtloga se povećava, da bi na kraju došlo do njihovog otkidanja od objekta, naizmennično sa jedne i sa druge strane objekta. Brzina njihovog formiranja i otkidanja je direktno proporcionalna zapreminskom protoku fluida.

Merači protoka zasnovani na otkidanju vrtloga se razlikuju među sobom na osnovu metode koja se koristi za detektovanje vrtloga. Najčešće se koriste sledeće četiri metode:

1. Metoda koja koristi termistor koji je tako postavljen da se periodično hladi promenom protoka fluida pri prolasku vrtloga, pri čemu se meri promena električnog otpora termistora zbog promene temperature.
2. Za potopljeno telo iza koga se formiraju vrtlozi se vezuje sfera ili disk izrađen od lakog metala koji se pomera napred nazad kada se vrtlozi otkidaju alternativno sa jedne i druge strane objekta. Oscilacije ovakve sfere, odnosno diska, se broje pomoću magnetnog namotaja.
3. Ova metoda koristi traku koja se prostire iza potopljenog tela na kome dolazi do otkidanja vrtloga. Alternativno otkidanje vrtloga sa jedne i druge strane tela izaziva pomeranje trake sa jedne strane na drugu. Vršni se detekcija ovog kretanja trake ili indukovano mehaničkog napona u njoj.
4. Četvrta metoda za detekciju vrtloga koristi ultrazvučne transmitere i prijemnike. Vrtlozi se detektuju pomoću zvučnog signala koji se emituje sa potopljenog tela, ili se meri refleksija ili refrakcija ultrazvučnih talasa na vrtlozima iza tela.

U svim ovim slučajevima, dobija se broj vrtloga na osnovu koga se dobija signal koji je proporcionalan protoku. Ova veza je linearna. Ovi tipovi merača protoka se proizvode za opsege 10:1 i 20:1. Koriste se za merenje protoka fluida u turbulentnom režimu. Kada je *Re*-broj veći od 30000, tačnost ovih uređaja ne zavisi od gustine, viskoznosti, temperature i pritiska.

Ultrazvučni merači protoka. Svi ultrazvučni merači protoka se zasnivaju na merenju kašnjenja primljenih ultrazvučnih talasa koje se menja pri promeni protoka tečnosti. Zavisno od čistoće tečnosti čiji se protok meri, koriste se dve osnovne tehnike merenja:

1. Kod prve tehnike, u cevovod se postavljaju dva suprotna prijemnika, tako da je jedan uzvodno, a drugi nizvodno od mesta emitovanja talasa. Pomoću ovih prijemnika se meri razlika brzine zvuka u pravcu i nasuprot pravca strujanja fluida. Za merenja ovog tipa, potrebno je da je tečnost čiji se protok meri relativno čista.
2. Druga tehnika se primenjuje na merenje protoka tečnosti koje sadrže nečistoće (čestice ili mehuriće) od kojih mogu da se odbiju zvučni talasi. Ove nečistoće bi trebalo da se kreću istom brzinom kao osnovni tok tečnosti. Koristi se Doplerov (Doppler) efekat, tako što se meri promena frekvencije talasa koji se odbijaju od nečistoća u tečnosti. Ova promena frekvencije talasa je proporcionalna brzini tečnosti.

Obe tehnike merenja protoka koje koriste ultrazvuk odgovaraju srednjoj brzini tečnosti duž putanje zvučnog talasa. Pošto se profil brzina menja sa promenom Rejnoldsovog broja, ovo utiče i na koeficijent koji povezuje izlazni signal iz instrumenta sa protokom. Ovo je naročito izraženo pri promeni brzina fluida između laminarnog i turbulentnog režima strujanja i u toj oblasti su greške merenja najveće.

Pored navedenih, u novijoj literaturi se pominju i metode određivanja protoka fluida zasnovane na merenju kroskorelacije stohastičkih šumova, korišćenju obeleženih supstanci, formiranju aksijalnog vrtloga, fluidičkim elementima, merenju odvedene toplote i td.

### 3.2.4. Instrumenti za merenje pritiska i razlike pritisaka

Merenje pritiska je od izuzetnog značaja u postrojenjima procesne industrije, jer se na osnovu njega mogu dobiti informacije o stanju materije, materijalnom ili energetskom bilansu, uslovima hemijske reakcije i sigurnosti aparata ili pogona. Merenjem pritiska posredno se može meriti temperatura, a merenjem razlike pritisaka protok, nivo, gustina, viskoznost, sastav i slično.

Najčešće korišćeni osetni elementi za merenje apsolutnog i diferencijalnog pritiska (razlike pritisaka) se zasnivaju na sledećim principima:

1. potiskivanje manometarskih tečnosti
2. deformacija elastičnih elemenata
3. piezoelektrični efekat
4. magnetno striktivni efekat.

#### 3.2.4.1. Manometri sa tečnošću

Ovi instrumenti se zasnivaju na uravnotežavanju pritiska koji se meri pritiskom stuba tečnosti poznate gustine. Kao manometarska tečnost se najčešće koristi živa ili voda. Tri osnovna tipa instrumenata su:

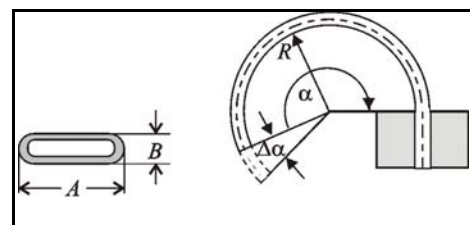
- (a) manometar sa stubom tečnosti
- (b) prstenasti manometar
- (c) manometar sa zvonom.

Manometri sa tečnošću se postepeno napuštaju u industrijskoj praksi, zbog uskog opsega, velikih dimenzija, sporog odziva i teškog održavanja. Zbog toga neće biti posebno obrađeni u ovom tekstu. Manometar sa stubom žive se, međutim, često koristi za kalibrisanje drugih instrumenata za merenje pritiska.

#### 3.2.4.2. Manometri na principu deformacije elastičnih elemenata

Ovi uređaji se sve više koriste za industrijska merenja pritisaka i diferencijalnih pritisaka. Oni mogu imati mehanički ili električni izlazni signal. Postoje tri osnovna tipa ovih manometara:

- (a) Burdonov (Bourdon) manometar
- (b) manometar sa elastičnom membranom
- (c) manometar sa elastičnim mehonom.



Slika 3.2-13. Princip rada Burdonovog manometra

(a) *Burdonov manometar*, koji je prikazan na slici 3.2-13., se sastoji od cevi eliptičnog ili spljoštenog poprečnog preseka koja je savijena u luk, spiralu ili helikoidalnu spiralu. Izrađuje se najčešće od elastičnih i hemijski otpornih metala, a može biti i od plastike ili kvarca. Pri promeni razlike pritisaka između unutrašnjosti i spoljašnjosti Burdonove cevi, dolazi do njene deformacije i pomeranja njenog slobodnog kraja. Opseg merenja Burdonovih manometara je od  $10^{-2}$  do  $10^5$  bar. Najčešće se koriste Burdonovi manometri sa mehaničkim prenosom promene ugla savijanja cevi pomoću zupčaste poluge i zupčanika. Tačnost merenja ovakvog instrumenta je  $\pm 2-5\%$ , a histerezis

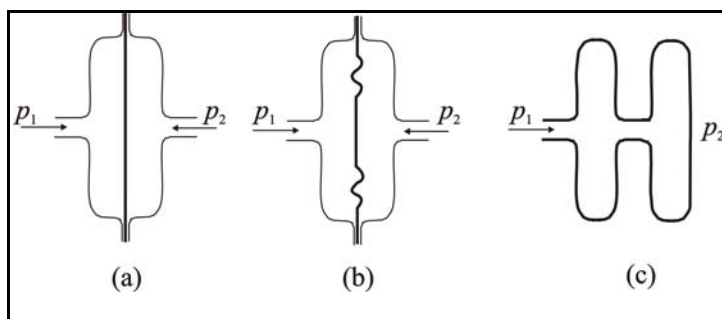
oko 0.5%. Međutim, kvarcne Burdonove cevi sa opto-električnim prenosom signala imaju znatno veću tačnost - do  $\pm 0.2\%$ , a histerezis je zanemarljiv.

Burdonov manometar se koristi gotovo isključivo kao pretvarač pri merenju temperature manometarskim termometrima.

U slučaju mehaničkog izlaznog signala, Burdonov manometar ima relativno loše dinamičke karakteristike, tako da se preporučuje samo za merenje pritisaka koji se sporo menjaju.

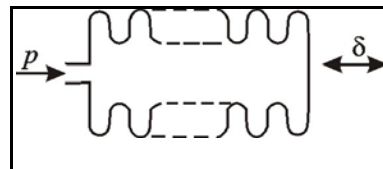
(b) Princip merenja pritiska, odnosno razlike pritisaka, pomoću *elastičnih membrana (dijafragmi)* se zasniva na merenju ugiba sredine membrane zbog razlike pritisaka sa jedne i druge strane membrane. Membrana je ukleštena po celom obodu. Može biti ravna ili talasasta, jednostruka ili višestruka (slika 3.2-14.). Izrađuje se tako da ima veliku površinu.

Membrane su u principu nelinearni elementi. Približna linearnost se postiže samo ako je ugib manji od pet debljina membrane. Pogodne su za merenje niskih pritisaka koji se brzo menjaju. U kombinaciji sa električnim metodama merenja pomeraja, mogu se koristiti za merenje vrlo malih razlika pritisaka, reda veličine  $10^{-8}$  bar.



Slika 3.2-14. Elastična membrana: (a) jednostruka ravna; (b) jednostruka talasasta; (c) višestruka;

(b) *Elastični mehovi* kao senzori pritiska, predstavljaju u suštini višestruke membrane čiji se svaki nabor posebno deformiše (slika 3.2-15.), pri čemu dolazi do pomeranja slobodnog kraja meha koje je proporcionalno razlici pritisaka unutar i izvan meha. Ukupno pomeranje slobodnog kraja meha ( $\delta$ ) može biti znatno i pri malim razlikama pritiska, a u granicama u kojima se koriste, mehovi su linearni elementi. Koriste se za merenje razlika pritisaka od  $10^{-3}$  do 60 bara. Izrađuju se od tombak-mesinga ili čelika.



Slika 3.2-15. Elastični meh

U poglavlju 2.3.2.5. smo izveli prenosnu funkciju elastičnog meha kod koga se može zanemariti inercija pokretnih delova, i došli do sledećeg izraza:

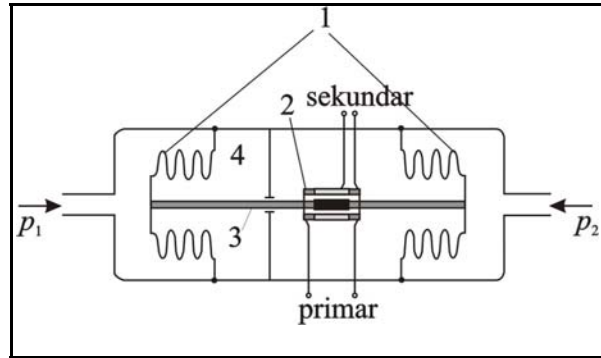
$$\frac{\delta(s)}{P(s)} = \frac{A/K}{\tau s + 1} \quad (3.2-17)$$

gde je  $A$  - efektivna površina poprečnog preseka meha,  $K$  - konstanta deformacije meha i  $\tau=RC$  - vremenska konstanta meha koja zavisi od kapacitivnosti  $C$  koja je za dati meh i fluid konstantna i promenljive otpornosti ventila  $R$ , koja se može podešavati u širokim granicama.

Zbog svoje linearnosti, osetljivosti i mogućnosti podešavanja vremenske konstante, elastični mehovi se mnogo koriste u pneumatskim pretvaračima i regulatorima.

Senzori pritiska i diferencijalnog pritiska koji rade na principu elastične deformacije elemenata, kao izlaz daju mala mehanička pomeranja. Radi lakšeg prenosa, obrade i korišćenja, ovo mehaničko pomeranje treba prevesti u pneumatski ili električni signal.

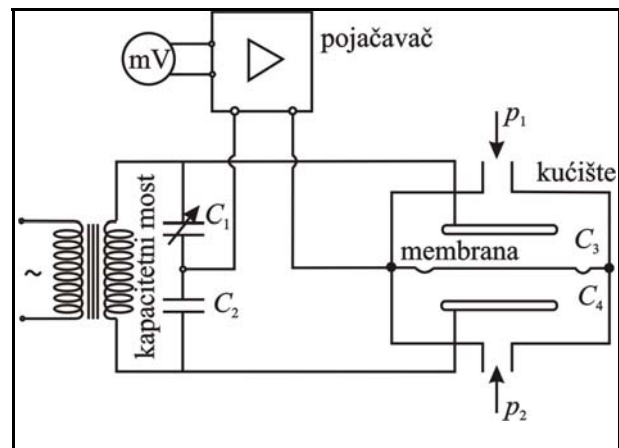
Prevođenje mehaničkog pomeranja u pneumatski signal se ostvaruje korišćenjem pneumatskog transmitera čiji smo princip rada opisali u poglavlju 3.2.2.2. Za prevođenje deformacije elastičnih elemenata u električni signal se, pored diferencijalnog transformatora čiji smo princip rada opisali, koriste još metode merenja promenljivog kapaciteta i merne trake.



Slika 3.2-16. Bartonova ćelija

Jedan od često korišćenih instrumenata za merenje malih i srednjih razlika pritiska pri velikom apsolutnom pritisku je *Bartonova* (Burton) ćelija koja je šematski prikazana na slici 3.2-16. Bartonova ćelija se sastoji od dva elastična meha, vezana u opoziciju (1), smeštena u komorama višeg i nižeg pritiska, između kojih se nalazi komora ispunjena uljem (4). Diferencijalni transformator (2) se nalazi u ulju, sa jezgrom na pokretnoj poluzi (3) koja povezuje mehove i koja se pomera pri promeni razlike pritiska u mehovima. Bartonova ćelija može da ima i konstrukciju sa elastičnim dijafragmama, umesto mehova. Transmitemi diferencijalnog pritiska koji rade na principu Bartonove ćelije se izrađuju za opsege diferencijalnog pritiska od  $2.5 \times 10^{-2}$  bar naviše, i za apsolutne pritiske do 200 bar. Koriste se za merenje protoka prigušnicama i za merenje nivoa u sudovima pod pritiskom.

Pretvaranje pomeranja u električni analogni signal preko promene *električne kapacitivnosti* se najčešće koristi kada je osetni element elastična membrana. Kod ovih instrumenata se vrši merenje kapaciteta kondenzatora kod koga je jedna ploča elastična membrana, dok je druga ploča fiksirana. Zavisnost između promene kapacitivnosti i promene rastojanja između ploča pri ugibu je linearna. Diferencijalni manometar koji radi na ovom principu je prikazan na slici 3.2-17. Osetljivost ovakvog manometra je vrlo velika - mogu se meriti razlike pritiska reda veličine  $10^{-8}$  bara. Ovi manometri imaju vrlo dobre dinamičke karakteristike. Nedostatak im je velika osetljivost na uslove rada.



Slika 3.2-17. Shema diferencijalnog manometra koji radi na principu promene električnog kapaciteta

Kod merenja deformacija pomoću *mernih traka* pretvarač je električni provodnik izložen deformaciji, čija se električna otpornost menja pri delovanju sile, zbog promene dužine i površine poprečnog preseka. Za merenje pritiska i diferencijalnog pritiska koristi se više tipova ovakvih elemenata koji menjaju električnu otpornost sa deformacijom. Statička karakteristika žičanog otpora izloženog istezanju se može prikazati izrazom:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = S \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2-18)$$

gde su  $L_0$  i  $R_0$  početna dužina i početna otpornost žice,  $\Delta L$  istezanje žice,  $\Delta R$  promena otpornosti, i  $S$  faktor osetljivosti.

Promena otpornosti trake se meri pomoću mernog mosta, na primer Vitstonovog (Wheatstone), tako da se kao izlaz dobija analogni električni signal. Pošto promena otpora zavisi i od temperature, u ovom stupnju se može izvršiti kompenzacija za promenu temperature.

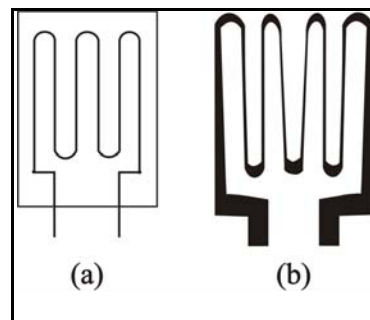
Postoje različiti tipovi mernih traka, koji se razlikuju po materijalu, veličini, obliku i načinu izrade. Na slici 3.2-18. su prikazana dva karakteristična oblika mernih traki koje se najčešće koriste:

(a) Žičane merne trake, koje se izrađuju od veoma tanke otporne žice (prečnika 10-30  $\mu\text{m}$ ), koja se specijalno savija i lepi na tanke folije izolatora. Ovakva traka se lepi na površinu koja se deformiše, u pravcu najveće deformacije.

(b) Merne trake u obliku tanke metalne folije (debljine 2-10  $\mu\text{m}$ ), koje se dobijaju nagrizanjem folije koja je zalepnjena na nosač od izolatora. Ovakvo dobijena merna traka se može postaviti na odgovarajuću površinu (kao pod (a)), ili se radi integrisana merna traka na elementu čija se deformacija meri (npr. dijafragmi), čime se postiže maksimalna osetljivost.

Pored metalnih, koriste se i poluprovodničke merne trake, koje imaju znatno veću osetljivost. Najčešće se izrađuju od silicijuma ili germanijuma.

Merne trake od metalne žice ili folije imaju faktor osetljivosti oko 2, dok poluprovodničke mogu imati i faktor osetljivosti do 200.



Slika 3.2-18. Merne trake

Tačnost merenja pomoću mernih traka može ići i do 0.1%, a odstupanja od linearnosti su oko 1%. Dinamičke karakteristike mernih traka zavise od konstrukcije trake i nosača, veličine trake i slično. Komercijalne trake mogu da prate varijacije deformacije sa frekvencijama do nekoliko stotina Hz.

### 3.2.4.3. Piezoelektrični elementi

Piezoelektrični efekat je vezan za pojavu naelektrisanja na površini nekih kristala, kada se elastično deformišu duž specifičnih površina. Na ovaj način se promena pritiska prevodi u električni signal. Ovaj signal je najčešće vrlo slab i mora se pojačati. Mogu se koristiti za merenje pritisaka od vrlo malih, do vrlo velikih vrednosti. Međutim, ovi instrumenti se ne mogu koristiti za merenje stalnih pritisaka, jer se površina kristala relativno brzo razelektriše, već samo za merenje promene pritiska. Najvažniji kristali koji imaju piezoelektrične osobine su: kvarc, turmalin i barijum-titanat.

### 3.2.4.4. Magnetostruktivni instrumenti

Magnetostruktivni efekat predstavlja efekat promene magnetne permeabilnosti feromagnetnih materijala kada su izloženi naprezanju na pritisak, istezanje ili torziju. Ovaj efekat je nelinearan i zavisi od temperature i prethodne obrade materijala. Instrumenti koji koriste ovaj princip su vrlo jednostavni i bez pokretnih delova. Pritisak deluje na jezgro od feromagnetna (najčešće legure od 63% Ni i 37% Fe), čija se permeabilnost meri preko merenja indukcije u namotajima kroz koje prolazi naizmenična struja. Ovakav uređaj može da meri pritiske u vrlo širokom opsegu. Može da meri konstantne pritiske ili promene pritiska sa učestanostima i do 10 kHz.

### 3.2.4.5. Uređaji za merenje niskih pritisaka (vakuuma)

U pogonima procesne industrije u nekim slučajevima treba meriti pritiske ispod atmosferskog. Zavisno od veličine vakuuma, koriste se različiti tipovi instrumenata:

- Za merenje apsolutnih pritisaka viših od oko 1 kPa mogu se koristiti standardni instrumenti za merenje pritiska (Burdonove cevi, elastične membrane, piezo elementi i slično).

- Za pritiske između  $10^3$  i  $10^{-1}$  Pa najčešće se koristi Piranijev (Pirani) vakuumetar sa zagrejanom žicom. Princip rada ovog uređaja se zasniva na merenju toplote koja se sa površine zagrejanog tela odvodi na razređeni gas čiji se pritisak meri. Odvedena toplota se određuje na osnovu merenja temperature žice, najčešće merenjem njenog električnog otpora. - Pritisci ispod 0.1 Pa se najčešće mere pomoću jonizacionih uređaja. Peningov (Penning) vakuumetar sa hladnom katodom se može koristiti za merenje pritisaka u opsegu od 1 Pa do  $10^{-5}$  Pa, dok se Baklijev (Buckley) vakumetar sa vrućom katodom može primeniti i na niže pritiske (do  $10^{-8}$  Pa). Korišćenjem masene spektrometrije, mogu se detektovati i pritisci od  $10^{-10}$  Pa.



Treba primetiti da je odziv uređaja za merenje vakuuma obično znatno sporiji od odziva pri merenju normalnih i visokih pritisaka.

### 3.2.5. Instrumenti za merenje nivoa

Složenost merenja nivoa u sudovima, pa time i metod merenja, zavisi od materijala čiji se nivo meri i uslova merenja. Po stepenu složenosti, sistemi u kojima se meri nivo se mogu podeliti u nekoliko grupa:

1. merenje nivoa čistih tečnosti u otvorenim sudovima;
2. merenje nivoa čistih tečnosti u sudovima pod pritiskom ili vakuumom;
3. merenje nivoa tečnosti na jako povišenim ili sniženim temperaturama;
4. merenje nivoa granice faza;
5. merenje nivoa čvrstih nasutih materijala;
6. merenje nivoa višefaznih sistema (suspencija, emulzija, pene);
7. merenje nivoa fluidizovanog materijala.

Osetni elementi za merenje nivoa mogu biti sa mehaničkim, pneumatskim ili električnim izlazom. Sve metode merenja nivoa uslovno delimo na direktne, metode zasnovane na merenju pritiska ili diferencijalnog pritiska i metode zasnovane na pretvaračima sa električnim izlaznim signalom.

#### 3.2.5.1. Direktne metode merenja nivoa

Direktne metode merenja nivoa se svode na vizuelne i optičke metode i metode sa plovkom. Na slici 3.2-19. su šematski prikazane direktne metode merenja.

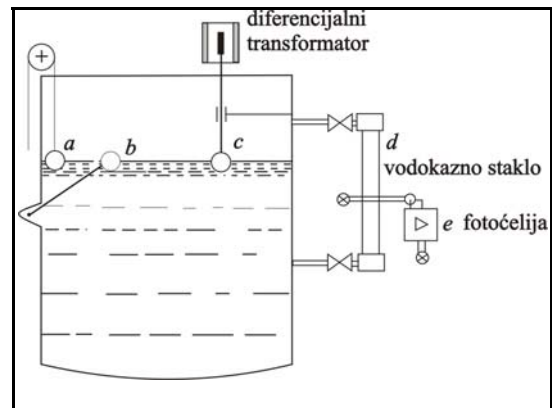
Prvu grupu direktnih metoda čine:

- vodokazna stakla (slika 3.2-19d) koja služe za vizuelno praćenje nivoa;
- metode sa fotočeljom (slika 3.2-19e) koje se koriste se za električnu indikaciju visokog i niskog nivoa, i eventualno za dvopoložajnu regulaciju nivoa.

Vodokazna stakla i metode sa fotočeljom se mogu koristiti za sisteme iz grupe 1 i grupe 2 do pritiska od 20 bar.

Drugu grupu čine metode sa plovkom, koje mogu imati različite konstrukcije:

- plovak na užetu (slika 3.2-19a), koji se koristi za sisteme iz grupe 1;
- plovak na polugi i torzionalnoj cevi (slika 3.2-19b), koji se može koristiti za merenje nivoa u sistemima iz grupe 1, 2 i 4. i uz odgovarajući transponder, može da daje mehanički, pneumatski ili električni signal na izlazu;
- plovak sa vođicama (slika 3.2-19c), koji je primenljiv na sisteme iz grupa 1, 2 i 4. i u kombinaciji sa diferencijalnim transformatorom, kao na slici, daje električni izlazni signal.

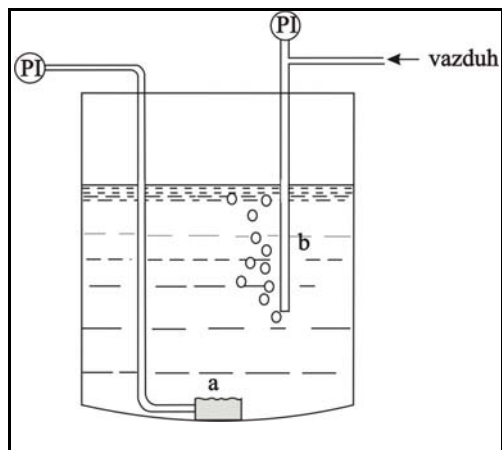


Slika 3.2-19. Direktne metode merenja nivoa

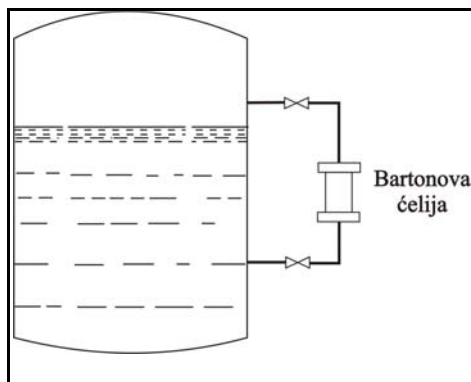
#### 3.2.5.2. Određivanje nivoa preko merenja pritiska i diferencijalnog pritiska

Kod ovih metoda, nivo se određuje posredno, na osnovu merenja hidrostatičkog pritiska. Primenljive su na sisteme iz grupe 1, 2 i 3.

Metode merenja nivoa u otvorenim sudovima, na osnovu merenja pritiska, su prikazane na slici 3.2-20.



Slika 3.2-20. Određivanje nivoa u otvorenim sudovima na osnovu merenja pritiska



Slika 3.2-21. Određivanje nivoa u sudu pod pritiskom

U industrijskim uslovima se najčešće koriste kapsule sa dijafragmom (slika 3.2-20a). Za merenje nivoa jako korozivnih tečnosti, koristi se metoda uduvavanja vazduha (slika 3.2-20b). Ova metoda se zasniva na produvanju instrumentalnog vazduha kroz cevčicu uronjenu u tečnost. Preko pretvarača pritiska, meri se povratni pritisak u cevčici, koji je proporcionalan hidrostatičkom pritisku na mestu isticanja vazduha, koji je sa druge strane proporcionalan visini nivoa tečnosti iznad tog mesta.

Za merenje nivoa u sudovima pod pritiskom ili vakuumom, koriste se pretvarači diferencijalnog pritiska, na primer Bartonova ćelija. Način ugradnje je prikazan na slici 3.2-21.

### 3.2.5.3. Merenje nivoa pomoću pretvarača sa električnim izlaznim signalom

Za merenje nivoa, naročito pod otežanim uslovima (grupe 2. do 6.) mogu se koristiti i različite posredne metode, kod kojih se dobija električni izlazni signal, kao funkcija nivoa ili zapremine materijala. Najčešće korišćene metode iz ove grupe su:

- *Metoda merenja promene kapacitivnosti*, koja se primenjuje za određivanje nivoa provodnih tečnosti i čvrstih nasutih materijala. Meri se promena električnog kapaciteta, pri čemu je jedna elektroda izolovana šipka ili kabl, a druga sam materijal. Može se primeniti i za određivanje nivoa neprovodnih tečnosti, ali se u tom slučaju koristi sonda koja ima dve koaksijalne elektrode, a tečnost predstavlja dielektrik koji menja kapacitivnost proporcionalno nivou. Promena kapacitivnosti se meri metodom kapacitetnog mosta, pri čemu se dobija standardni električni signal proporcionalan nivou. Ova metoda je primenljiva na sisteme iz svih grupa, od 1 do 6.

- *Ultrazvučna metoda* se zasniva na merenju vremena kretanja ultrazvučnih talasa ka interfaznoj površini i natrag ka detektoru. Metoda je primenljiva na određivanje nivoa čvrstih materijala (sonda u vazduhu), čistih tečnosti (sonda na dnu) i interfaznog nivoa između dve nemešljive tečnosti (sonda na dnu). Kao izlaz daje standardni električni signal.

- *Metoda sa apsorpcijom  $\gamma$ -zračenja* koristi izvor i detektor  $\gamma$ -zračenja izvan suda u kome se meri nivo. Primjenljiva je i za najteže uslove rada, ali rastojanje između izvora i detektora ne sme biti veće od 2 m.

## 3.2.6. Instrumenti za merenje temperature

Merenje temperature ima poseban značaj, jer je to procesna veličina kojom vrlo često treba upravljati u pogonima procesne industrije, i to ne samo kod uređaja za prenos toplote, već vrlo često i kod uređaja koji služe za prenos mase ili kod hemijskih reaktora.

Postoje dva osnovna principa za merenje temperature: pomoću *dodirnih termometara*, gde je osetni element u termičkoj ravnoteži sa sistemom čija se temperatura meri i pomoću *zračnih pirometara* kod kojih osetni element prima energiju zračenja zagrejanog tela čija se temperatura meri. U oba slučaja izlazni signal može biti mehanički, vizuelan ili električni.

Prema principu koji koriste za pretvaranje temperature u neku vrstu signala, razlikujemo nekoliko osnovnih grupa dodirnih termometara: dilatacione, manometarske, termootporne termometre i termoelemente. Prve dve grupe daju kao izlaz mehanički izlazni signal, a druge električni izlazni signal.

### 3.2.6.1. Dilatacioni termometri

*Dilatacioni termometri* su dodirni termometri koji se se zasnivaju na linearnoj dilataciji čvrstih tela ili na zapreminskoj dilataciji tečnosti. U oba slučaja, kao izlazni signal se dobija mehaničko pomeranje.

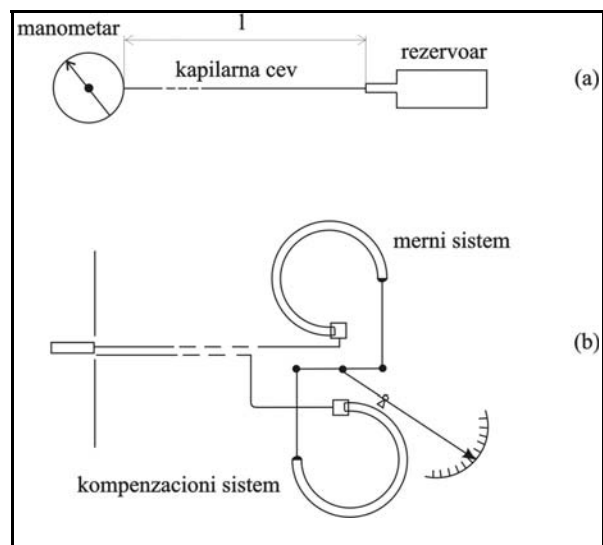
Za indicaciju temperatura u opsegu od  $-30$  do  $1000$  °C se koriste *štapni dilatacioni termometri*, kod kojih je osetni element štap od metala koji se nalazi u cevi od materijala sa manjim linearnim koeficijentom širenja (kvarc, porcelan). Pored indicacije, mogu se koristiti i za otvaranje, odnosno zatvaranje kontakta releja, i na taj način za dvopoložajnu regulaciju temperature u pećima i sušnicama. Kod *bimetalnih dilatacionih termometara* osetni element je bimetalna traka, dobijena spajanjem dva metala sa različitim koeficijentima linearnog širenja. Pomeranje slobodnog kraja trake u funkciji temperature koristi se za indicaciju temperature u opsegu od  $-30$  do  $450$  °C. Mogu se koristiti za dvopoložajnu regulaciju temperature i za kompenzovanje uticaja promene temperature kod drugih instrumenata sa mehaničkim izlaznim signalom (na primer kod Burdonovog manometra). I štapni i bimetalni dilatacioni termometri imaju relativno visoke greške (do 5%), pokazuju histerezis i promene karakteristika sa vremenom.

*Zapreminski dilatacioni termometri* se zasnivaju na zapreminskom širenju tečnosti u staklenom ili kvarcnom sudu sa kapilarnom cevi. Najčešće korišćene tečnosti su: *pentan* (za temperature od  $-200$  do  $+20$  °C), *etanol* (za temperature od  $-110$  do  $+50$  °C) i *živa* (za temperature od  $-30$  do  $+750$  °C). Preciznost ovih instrumenata je visoka, naročito ako se kao termometarska tečnost koristi živa (greška ispod 0.1%), tako da se koriste za kalibrisanje drugih termometara. Termometri sa živom se koriste kao kontaktni termometri za dvopoložajnu regulaciju temperature u termostatima. U industriji se dilatacioni termometri koriste samo za indicaciju temperature na mestu merenja.

### 3.2.6.2. Manometarski termometri

Manometarski termometri su dodirni termometri kod kojih se merenje temperature zasniva na fenomenu promene pritiska tečnosti, gasova ili dvofaznih sistema, pri promeni temperature i konstantnoj zapremini.

Na slici 3.2-22(a). je šematski prikazan osetni element *manometarskog termometra sa gasovima*. Rezervoar od mesinga ili legiranog čelika, povezan kapilarnom cevi, prečnika 0.1 do 0.36 mm i dužine od 10 do 40 m, za Burdonov manometar ili neki drugi manometar sa malom mrtvom zapreminom. Sistem se puni azotom ili helijumom pod pritiskom od 10 do 30 bar. Opseg merenja iznosi od  $-75$  do  $+550$  °C. Greška merenja iznosi do  $\pm 1.5\%$  na temperaturi kapilare i manometra od  $20$  °C i raste za oko 5% od početne greške za svakih  $20$  °C (zbog razlike u temperaturi rezervoara i kapilare). Uticaj greške se može kompenzovati vezivanjem kompenzacionog manometra sa slepom kapilaram u opoziciju sa manometrom termometra (slika 3.2-22(b)).



Slika 3.2-22. Manometarski termometar sa gasom (a) osetni element; (b) temperaturna kompenzacija

*Manometarski termometri sa tečnošću* se, u principu ne razlikuju od manometarskih termometara sa gasom i imaju iste konstruktivne elemente. Prečnik i dužina manometarskog suda su manji ( $d=10$  mm,  $l=125$  mm), a dužina kapilare je maksimalno 25 m. Kao tečnost se najčešće koristi živa, čiji je početni pritisak 15 ili više bar. Greška koja se javlja zbog različitih temperatura rezervoara i kapilare se kompenzuje na isti način kao kod manometarskih termometara sa gasovima.

Kod *manometarskih termometara sa zasićenom parom* rezervoar je delimično ispunjen tečnošću, a delimično parom, i vrši se merenje napona pare, koji je funkcija temperature. Pošto je ova zavisnost eksponencijalna, osetljivost ovih termometara raste sa temperaturom. Ovi termometri se koriste za opseg temperatura od  $-200$  do  $+350$  °C. Kao termometarske tečnosti se koriste lako isparljive tečnosti kao što su: propan (od  $-40$  do  $+40$  °C), dietiletar (od  $+40$  do  $+195$  °C), etanol (od  $+85$  do  $+290$  °C) i ksilen (od  $+150$  do  $+360$  °C). Ova vrsta termometara se izrađuje sa kapilarama do 50 m.

Manometarski termometri se koriste za indikaciju i registrovanje temperature u samokretnim sistemima i kao osetni elementi i primarni pretvarači temperature u mehanički signal, u pneumatskim sistemima.

### 3.2.6.3. Otporni termometri

Princip rada ove grupe dodirnih termometara se zasniva na zavisnosti otpornosti metala, elektrolita ili poluprovodnika od temperature. Najčešća oblast primene im je od 70 do 900 Kelvina.

Zavisnost specifične električne otpornosti provodnika od temperature se može prikazati sledećom jednačinom:

$$\rho_T = \rho_0 e^{\kappa T} \quad (3.2-19)$$

gde su  $\rho_0$  i  $\rho_T$  specifične električne otpornosti materijala na 273 K i temperaturi  $T$ , respektivno, dok je  $\kappa$  ( $1/K$ ) temperaturni koeficijent električne otpornosti. Za metale se desna strana jednačine (3.2-19), za određeni interval temperature u kome nema fazne transformacije, može aproksimirati polinomom. Tako se električna otpornost otpornog termometra najčešće prikazuje kao sledeća funkcija temperature:

$$R_\theta = R_0(1 + a\theta + b\theta^2) \quad (3.2-20)$$

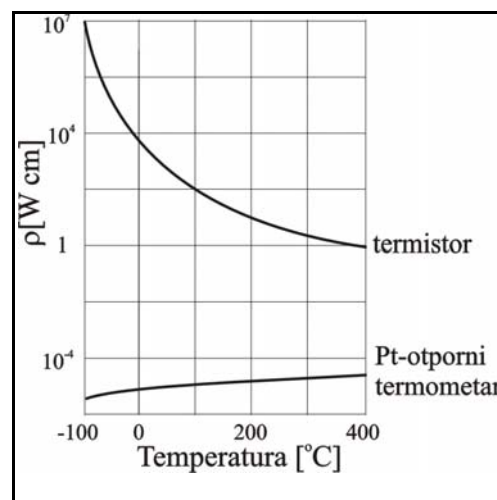
gde je  $R_0$  električna otpornost termometra na 0 °C, odnosno na 273 K,  $\theta$  - temperatura u stepenima Celzijusa,  $R_\theta$  električna otpornost termometra na temperaturi  $\theta$ , i  $a$  i  $b$  konstante termometra koje se određuju kalibrisanjem. Za platinski otporni termometar koji se najčešće koristi, koeficijenti  $R_0$ ,  $a$  i  $b$  se mogu smatrati za konstantne u intervalu od 230 do 900 K.

Kod niza poluprovodnika (smeše oksida metala, germanijum, silicijum, karbidi metala, grafit) temperaturni koeficijent otpornosti je negativan. Kod ovih materijala se promena električne otpornosti sa temperaturom može izraziti pomoću sledeće zavisnosti:

$$R_T = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)} \quad (3.2-21)$$

gde je  $B$  konstanta termometra određena kalibrisanjem,  $T_0=273$  K,  $R_0$  otpornost koja odgovara ovoj temperaturi, i  $R_T$  otpornost koja odgovara temperaturi  $T$ . Kod komercijalnih otpornih termometara na bazi poluprovodnika, koji se nazivaju *termistori*, koeficijent promene otpora sa temperaturom je mnogo veći nego kod otpornih termometara na bazi metala, pa im je i osetljivost mnogo veća. Za većinu termistora, opseg merenja temperature je od 170 do 570 K.

Na slici 3.2-23. su date uporedne karakteristike platinskog otpornog termometra i termistora na bazi smeše oksida nikla i mangana.



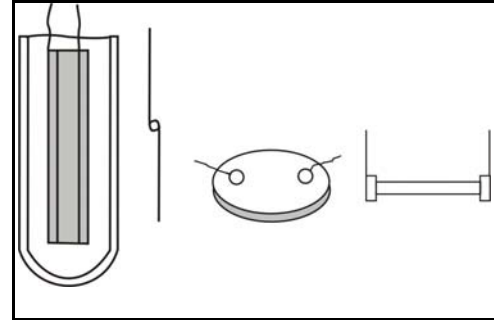
Slika 3.2-23. Uporedne karakteristike Pt-otpornog termometra i termistora

Otporni termometri na bazi metala se najčešće izrađuju od platine, ređe od bakra, nikla ili volframa. Otporna žica se bifilarno mota na krstasti nosač, zatapa na unutrašnju površinu kvarcne cevi ili utapa u keramički nosač. Pt-otporni termometri se prema DIN standardu izrađuju u dva nominalna opsega, sa otpornostima od 10 i 100  $\Omega$ .

Termistori se izrađuju sa veoma različitim početnim otpornostima (od nekoliko stotina  $\Omega$  do 10 k $\Omega$ ) i u različitim oblicima koji se prilagođavaju objektima na kojima se meri temperatura. Mogu se dobiti u obliku kuglice malih prečnika (do 0.5 mm), za merenje temperatura u pojedinim tačkama, tankog diska, za merenje temperature površine, ili štapa. Na slici 3.2-24. su prikazani različiti oblici otpornih termometara na bazi metala i poluprovodnika.

Električna otpornost otpornih termometara se meri standardnim metodama razvijenim u elektrotehnici.

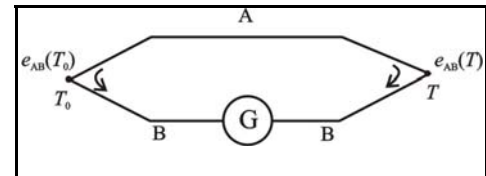
Prednosti otpornih termometara na bazi metala su velika preciznost (do 0.01 K) i linearnost, dok su im nedostaci: relativno mala osetljivost, uzak opseg merenja temperature i mehanička osetljivost. Prednosti termistora su velika osetljivost i laka ugradnja, dok su im nedostaci nestabilnost karakteristika, visoka nelinearnost, uzak opseg merenja temperature i teška zamenjivost zbog razlika u karakteristikama pojedinih elementa. Cena termistora je znatno niža od cene platinskih otpornih termometara.



Slika 3.2-24. Različite konstrukcije otpornih termometara

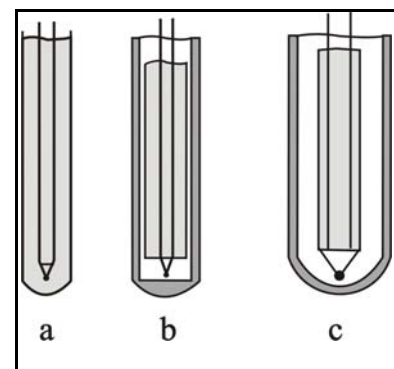
#### 3.2.6.4. Termoelementi

Merenje temperature pomoću termoelementa se zasniva na Zebekovom (Seebeck) efektu, odnosno pojavi da na spojevima dva različita metala, kada se nalaze na različitim temperaturama, nastaje elektromotorna sila koja zavisi od vrste metala, apsolutne temperature hladnijeg spoja i razlike temperatura. Šematski prikaz termoelementa je dat na slici 3.2-25. Temperatura toplijeg spoja se meri na osnovu merenja proizvedene elektromotorne sile. Termoelementi, koji se često nazivaju i *termoparovi*, su aktivni elementi, jer ne zahtevaju napajanje energijom spolja. Mogu se koristiti za merenje temperature u opsegu od -260 do +2800  $^{\circ}\text{C}$ .



Slika 3.2-25. Šematski prikaz termoelementa

Termoelementi se proizvode od metala ili poluprovodnika, u obliku žica, traka ili filmova. Spajanje se vrši zavarivanjem ili lemljenjem. Da bi se ostvarila otpornost na hemijske uticaje, topli kraj termoelementa se štiti na različite načine keramičkim telima za razdvajanje žica i zaštitnim cevima od keramike ili metala. Na slici 3.2-26. su šematski prikazane tri konstrukcije toplog spoja termoelementa.



Slika 3.2-26. Različite konstrukcije toplog kraja termoelementa

Najčešće korišćeni termoparovi su prikazani u tabeli 3.2-1.

Tabela 3.2-1. Najčešće korišćeni termoparovi i maksimalna temperatura njihove upotrebe

Spoj metala	Maksimalna temperatura (°C)	
	Trajna upotreba	kratkotrajno
platina - platina-rodijum	1300	1600
hromel - alumel	900	1300
hromel - kopel	600	800
gvožđe - konstantan (kopel)	600	800
bakar - konstantan (kopel)	400	600

Kao temperatura hladnog spoja se najčešće koristi temperatura od 0 °C. Osetljivost merenja temperature termoelementom zavisi od upotrebljenog termopara i od načina merenja elektromotorne sile. Može se postići osetljivost do 10<sup>-3</sup> °C.

### 3.2.6.5. Greške dodirnih termometara i metode korekcije

Greške pri merenju temperature dodirnim termometrima mogu biti *statičke* i *dinamičke*. Statičke greške predstavljaju greške koje se javljaju u stacionarnom stanju i najčešće se javljaju usled odvođenja toplote, usled zračenja ili usled postavljanja termometra u struju velike brzine. Dinamičke greške nastaju pri promeni temperature koja se meri, zbog inercije termometra.

Greška usled odvođenja toplote. Ova greška nastaje kao rezultat različitih temperatura vrha termometra koji je uronjen u fluid čija se temperatura meri i kraja termometra koji se nalazi u spoljašnjoj sredini, zbog čega dolazi do pojave toplotnog fluksa kroz termometar. Ova greška se može potpuno otkloniti samo totalnim uranjanjem termometra u sredinu čija se temperatura meri. Termometri se najčešće ugrađuju u zid suda ili cevovoda i temperatura ovog zida se najčešće razlikuje od temperature fluida u sudu, odnosno cevi. Način ugradnje termometra i tipičan profil temperature duž štapa termometra, prikazani su na slici 3.2-27. Postavljanjem stacionarnog toplotnog bilansa za diferencijalni element štapa termometra:

$$\lambda S \frac{d^2 T}{dx^2} = h A (T_f - T) \quad (3.2-22)$$

i njegovom integracijom za granične uslove:

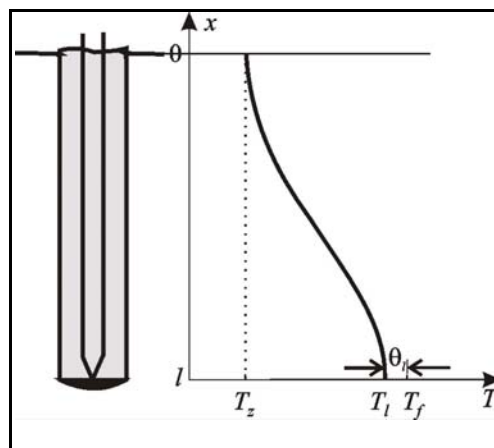
$$x = 0 : T = T_z, \quad x = l : \frac{dT}{dx} = 0 \quad (3.2-23)$$

dobija se izraz za grešku merenja temperature:

$$\theta_l = (T_f - T_l)_{z=l} = \frac{T_f - T_z}{\cosh(ml)}, \quad m = \sqrt{\frac{hA}{\lambda S}} \quad (3.2-24)$$

U ovim jednačinama je:

- $h$  - koeficijent prelaza toplote između fluida i termometra
- $S$  - površina poprečnog preseka štapa termometra
- $A$  - površina po jedinici dužine štapa termometra
- $\lambda$  - koeficijent toplotne provodnosti materijala od koga je načinjen štap termometra
- $l$  - dužina termometra koja je uronjena u sredinu čija se temperatura meri
- $T$  - temperatura termometra
- $T_f$  - temperatura fluida
- $T_z$  - temperatura zida cevi, odnosno suda
- $\theta_0$  - razlika temperatura fluida i zida cevi
- $\theta_l$  - greška merenja



Slika 3.2-27. Greška usled odvođenja toplote kod dodirnih termometara

Funkcija  $\cosh(x)$  je za pozitivne vrednosti argumenta rastuća funkcija između vrednosti 1 i  $+\infty$ , tako da greška merenja temperature usled odvođenja toplote, koja je obrnuto proporcionalna funkciji  $\cosh(ml)$  opadajuća funkcija od  $ml$ . To znači da će greška merenja biti utoliko manja ukoliko je veća dužina termometra koja je uronjena u fluid ( $l$ ) i ukoliko je veći parametar  $m$ , koji je, s druge strane, proporcionalan koeficijentu prenosa toplote i obimu štapa termometra, a obrnuto srazmeran koeficijentu toplotne provodnosti i površini poprešnog preseka termometra. Na osnovu svega ovog, mogu se izvesti zaključci o pravilnoj ugradnji termometra, tako da se greška merenja zbog odvođenja toplote što više smanji: termometar treba ugraditi tako da je dužina koja je uronjena u fluid što veća i da se nalazi na mestu sa najvećom turbulencijom (gde je koeficijent prelaza toplote najveći).

Greška usled zračenja. Ova greška nastaje usled prenosa toplote između termometra i zida suda ili cevovoda u koji je termometar ugrađen, mehanizmom zračenja. Ova greška dolazi do izražaja samo pri temperaturama većim od  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri kojima zračenje kao mehanizam prenosa toplote postaje značajno. Izraz za ovu grešku se može dobiti na osnovu Štefan-Bolcmanovog (Stefan-Boltzmann) zakona i može se prikazati na sledeći način:

$$\theta_z = \frac{\varepsilon_{zt}}{h} (T_t^4 - T_z^4) \quad (3.2-25)$$

gde su  $T_t$  i  $T_z$  temperature termometra i zida, u Kelvinima,  $h$  - koeficijent prelaza toplote sa fluida na termometar i  $\varepsilon_{zt}$  - koeficijent emisivnosti termometra i apsorptivnosti zida.

Greška usled zračenja se smanjuje izolacijom zida, poliranjem površine termometra, zaklanjanjem termometra od izvora zračenja ili korišćenjem specijalne konstrukcije termometra sa usisavanjem fluida.

Greška usled velikih brzina. Ova greška se javlja pri merenju temperatura gasova koji struje velikim brzinama. Greška merenja nastaje zbog prelaza kinetičke energije fluida u toplotu, pri udaru čestica gasa u termometar i može se izraziti na sledeći način:

$$\theta_v = \frac{v^2}{2 c_p} \quad (3.2-26)$$

gde je  $v$  - brzina strujanja i  $c_p$  - specifična toplotna kapacitivnost. Ova greška se javlja samo pri vrlo velikim brzinama fluida (bliskim ili većim od brzine zvuka). Otklanja se specijalnom ugradnjom sa zaštitnom cevi.

Dinamičke greške termometara. Ove greške se javljaju pri merenju temperatura koje se menjaju u toku vremena. Kao što smo pokazali u poglavlju 2.3., termometar bez zaštitne obloge ima dinamičku karakteristiku sistema prvog reda, sa vremenskom konstantom koja je proporcionalna toplotnoj kapacitivnosti termometra i otporu prenosa toplote između fluida i termometra, dok termometar sa zaštitnom oblogom ima dinamičke karakteristike previše prigušenog sistema drugog reda. Termometar sa zaštitnom oblogom se može tretirati kao kombinacija dva sistema prvog reda (obloga i termometar) vezana na red sa međudejstvom.

Dinamičke greške termometra se mogu smanjiti smanjenjem toplotne kapacitivnosti termometra, odnosno obloge i termometra i povećanjem koeficijenta prenosa toplote, što se može postići ugradnjom termometra na mestu najveće turbulencije.

### 3.2.6.6. Zračni pirometri

Kod zračnih pirometara, temperatura se meri na osnovu karakteristika toplotnog zračenja zagrejanih tela. Na slici 3.2-28. je prikazan izgled spektra toplotnog zračenja apsolutno crnog tela, za različite temperature.

Za merenje temperatura se mogu koristiti sledeće karakteristike spektra toplotnog zračenja apsolutno crnog tela:

1. izračena energija za neku uzanu oblast talasnih dužina (obično vidljivi deo spektra);
2. ukupna energija zračenja u celom spektru;
3. odnos izračenih energija za dve oblasti spektra;
4. veličina i položaj maksimuma izračene enegije u spektru.

U praksi se koriste prve dve metode sa korekcijama za emisivnost sivih tela, na osnovu koeficijenata emisivnosti. Neki proizvođači koriste treću metodu i pri tome automatski dobijaju korekciju emisivnosti za siva tela.

Optički pirometri sa vidljivim zračenjem. Na osnovu Vinovog (Vien) zakona, odnos izračenih energija monohromatskog zračenja iste talasne dužine, za dve različite apsolutne temperature, prikazuje se izrazom:

$$\ln \frac{E_{\lambda, T_2}}{E_{\lambda, T_1}} = 1.43 \times 10^{-2} \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (3.2-27)$$

(gde je  $T$  temperatura (K),  $E$  energija i  $\lambda$  talasna dužina). Ovaj izraz važi i za nešto šire opsege talasnih dužina (vidljivi deo spektra). Ukoliko se telo koje zrači po emisivnosti znatno razlikuje od crnog tela, merenjem izračene energije se dobija "crna temperatura tela", a stvarna temperatura se može izračunati na sledeći način:

$$T = \left( \frac{1}{T_c} - \frac{\lambda}{1.43 \times 10^{-2}} \ln \frac{1}{\epsilon_\lambda} \right)^{-1} \quad (3.2-28)$$

gde je  $T_c$  izmerena "temperatura crnog tela", a  $\epsilon_\lambda$  emisivnost sivog tela koja odgovara talasnoj dužini  $\lambda$ .

Najčešće su konstrukcije zračnih pirometara koje rade na principu vizuelnog poređenja svetline nepoznatog izvora i svetline volframovog vlakna u sijalici. Pirometri ovog tipa se mogu koristiti za merenje temperatura u opsegu od 600 do 3000 °C. Tačnost merenja je 1-3%. Ovi instrumenti se ne mogu koristiti za prenos signala i automatsko upravljanje.

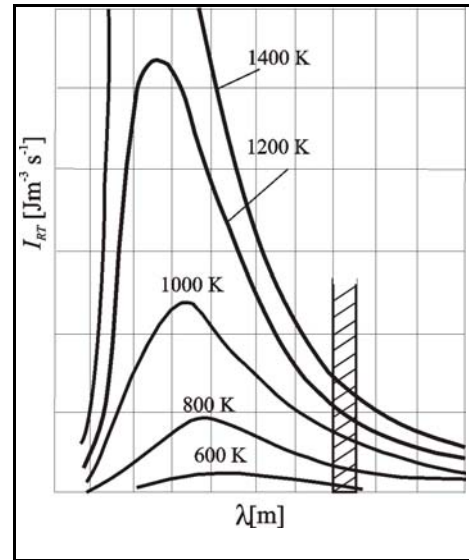
Zračni pirometri sa ukupnim zračenjem mere energiju za ceo spektar, koja je definisana Štefan-Bolcmanovim zakonom:

$$E_T = \sigma T^4 \quad [J/m^2/s] \quad (3.2-29)$$

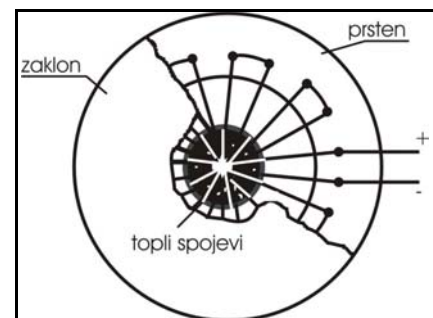
gde je  $\sigma$  Stefan-Bolcmanova konstanta ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2/\text{s/K}^4$ ). I u ovom slučaju se meri "crna temperatura tela"  $T_c$ , koja se za siva tela koriguje pomoću koeficijenta emisivnosti sivog tela  $\epsilon$ :

$$\frac{T}{T_c} = \epsilon^{-1/4} \quad (3.2-30)$$

Kod ovih pirometara se, pomoću optičkog sistema, ukupno zračenje koje pada na objektiv pirometra, koncentriše na malo površini što većeg koeficijenta apsorpcije. Na taj način se ukupno zračenje pretvara u toplotu, i dalje u električnu energiju. Kao prijemnici zračenja i pretvarači toplotnog fluksa u električnu energiju najčešće se koriste višestruki termoelementi sa površinom koja je prekrivena koloidnom platinom. Šematski prikaz ovakvog prijemnika, dat je na slici 2.3-29.



Slika 3.2-28. Spektar toplotnog zračenja apsolutno crnog tela



Slika 3.2-29. Prijemnik toplotnog zračenja sa višestrukim termoparovima

Opseg merenja temperatura za ove instrumente iznosi od 0 do 4000 °C, sa greškom koja je reda veličine  $\pm 0.5$  do 1% od pune skale. Ovi instrumenti su pogodni za prenos signala, registraciju i automatsko



upravljanje.

*Greške kod zračnih pirometara* najčešće nastaju zbog nepoznavanja koeficijenta emisivnosti. Greške mogu da nastanu i zbog nepovoljne geometrije tela koje zrači, prisustva plamena, gasova koji apsorbiraju toplotno zračenje ( $\text{CO}_2$ ) i dima ili prašine. Takođe se mogu javiti greške zbog zagrevanja samog instrumenta.

### 3.2.7. Instrumenti za određivanje sastava i koncentracije

Kontinualna kvalitativna i kvantitativna analiza procesnih struja je sigurno najkomplicovaniji problem kada su u pitanju merenja procesnih veličina u svrhu upravljanja pojedninim uređajima i procesnim postrojenjem u celini. S druge strane, izlazne veličine mnogih procesa su upravo sastavi izlaznih struja, odnosno koncentracije određenih komponenata u njima. Iako se još uvek često vrši merenje i upravljanje samo fizičkim izlaznim promenljivim procesa, dok se sastavi i koncentracije određuju povremeno, uzimanjem uzoraka i analizom u laboratoriji, poslednjih godina dolazi do sve šireg korišćenja kontinualnog merenja sastava i koncentracije i direktnog upravljanja na osnovu ovih merenja. Razlozi za to su, sa jedne strane napredak u instrumentaciji, a sa druge, sve oštriji zahtevi u pogledu kvaliteta proizvoda, energetske efikasnosti i zaštite životne sredine, što sve zajedno zahteva upravljanje upravo sastavima izlaznih struja. Međutim, i pored velike raznovrsnosti metoda za analizu sastava i određivanje koncentracija, u nekim slučajevima je dobijanje ovih podataka vrlo teško, nesigurno ili nemoguće, tako da se upravljanje procesima sa prenosom mase ili reakcijom vrši pomoću posredne regulacije, odnosno na osnovu sekundarnih merenja.

Instrumenti za određivanje sastava i koncentracija se zasnivaju na različitim principima. Uslovno ih možemo podeliti u nekoliko osnovnih grupa:

1. indirektno metode, zasnovane na merenju neke fizičke veličine koja zavisi od sastava smeše
2. elektrohemijske metode
3. metode određivanja koncentracije kondenzabilnih para u gasovima
4. spektroskopske metode
5. hromatografske metode
6. metode zasnovane na hemijskim reakcijama.

#### 3.2.7.1. Indirektno metode određivanja sastava i koncentracije

Procesne struje se često mogu posmatrati kao kvazibinarne smeše. U tim slučajevima, koncentracija jedne komponente se često može odrediti na osnovu merenja neke, pogodno odabrane fizičke karakteristike smeše. Kalibracijom se dobija zavisnost između odabrane fizičke veličine koja se meri i koncentracije, koja se direktno koristi za određivanje sastava smeše. Na ovom principu su razvijene različite, relativno jednostavne, robustne i brze metode merenja, koje daju dosta veliku tačnost i osetljivost. Najčešće se koriste metode zasnovane na određivanju gustine, viskoznosti i toplotne provodnosti.

Određivanje sastava i koncentracije na osnovu gustine. Gustina većine gasovitih smeša značajno zavisi od sastava. Međutim, određivanje sastava gasovite smeše na osnovu gustine je dosta složeno jer na gustinu utiču i pritisak i temperatura. Zbog toga se sastavi gasovitih smeša određuju složenim izračunavanjima na osnovu rezultata više simultanih merenja gustine.

Većina procesnih tečnosti se sastoji uglavnom od vode ili ugljovodonika. Prisustvo suspendovanih čestica ili drugih komponenata kao što su sumpor, hlor, fosfor ili metali izaziva značajne promene gustine, tako da se na osnovu njenog merenja može odrediti njihova koncentracija. Gustina tečnosti se najčešće meri na osnovu razlike pritiska na dva nivoa u tečnosti, ali se u novije vreme koriste i metode merenja brzine zvuka ili apsorpcije  $\gamma$ -zraka i metoda zasnovana na određivanju mase u U-cevi, na osnovu perioda vibracija.

Određivanje sastava i koncentracije na osnovu viskoznosti. Viskoznost se naročito koristi za određivanje koncentracija polimera rastvorenih u tečnostima niske viskoznosti. Takođe se koristi kod maziva, kod

kjih viskoznost predstavlja glavnu karakteristiku. Najjednostavniji način određivanja viskoznosti se zasniva na merenju pada pritiska na određenoj dužini cevi kroz koju fluid struji. Na osnovu ovog pada pritiska i podataka o gustini i zapreminskom protoku, moguće je izračunati viskoznost, i iz nje koncentraciju. Takođe se koriste senzori koji mere otpor koji se javlja pri vođenom kretanju objekta uronjenog u fluid (najčešće rotaciji), na osnovu koga se izračunava viskoznost, a zatim koncentracija.

Određivanje sastava i koncentracije na osnovu toplotne provodnosti. Određivanje toplotne provodnosti je najčešće korišćena nespecifična metoda za određivanje sastava gasovitih smeša. Kao i gustina, i toplotna provodnost se značajno menja pri promeni koncentracije, ali ne zavisi tako mnogo od temperature i pritiska. Toplotne provodnosti većine industrijskih gasova se značajno razlikuju od toplotne provodnosti vazduha (tabela 3.2-2.), tako da je određivanje koncentracija mnogih gasova u vazduhu dosta jednostavno.

Uređaj koji služi za određivanje toplotne provodnosti gasova se zasniva na određivanju odvedene toplote sa zagrejana površine. Najčešće se koristi par zagrejanih platinskih žica, od kojih se jedna nalazi u komori kroz koju struji gasovita smeša koju treba analizirati, dok se druga nalazi u kontrolisanoj sredini, na istom pritisku i temperaturi. Ove dve žice služe kao električni otpornici u Vitstonovom mostu. Merenjem promene otpornosti, određuje se temperatura žice, a preko nje i odvedena toplota, i najzad, toplotna provodnost gasovite struje.

Iako nisu naročito selektivni, uređaji za kontinualno određivanje koncentracije komponente u gasu koji rade na ovom principu su verovatno najčešće zastupljeni u pogonima procesne industrije, zahvaljujući njihovoj jednostavnosti, tačnosti i pouzdanosti.

Tabela 3.2-2. Relativne toplotne provodnosti nekih industrijskih gasova

Gas	Relativna toplotna provodnost
vazduh	1.00
azot	1.00
kiseonik	1.01
vodonik	6.67
vodena para	0.67
ugljen dioksid	0.57
metan	1.24
etan	0.71
etilen	0.67

### 3.2.7.2. Elektrohemijske metode za određivanje sastava vodenih rastvora

Elektrohemijske metode se uglavnom zasnivaju na različitim tipovima elektroda pomoću kojih se detektuje prisustvo jona u vodenim rastvorima. Najčešće se koriste sledeće elektrohemijske metode: pH-metrija, potenciometrija sa jon-selektivnim elektrodama, različite metode za određivanje kiseonika i konduktometrija.

pH-metrijska metoda. Jedna od značajnih karakteristika procesnih tečnosti je pH, odnosno koncentracija  $H^+$  jona u rastvoru. Određivanje i regulacija pH vrednosti je od izuzetnog značaja u mnogim hemijskim i biohemijskim sistemima. Takođe, određivanjem pH se postiže određivanje koncentracije kiselina ili baza. Najčešće se izrađuju pH-metri sa staklenom i referentnom elektrodom. Obično se vrši temperaturna kompenzacija. Sa pretvaračima koji pH-vrednost pretvaraju u električni signal, pH-metri se koriste kao merni elementi za direktno upravljanje procesima.

Potenciometrijske metode sa jon-selektivnim elektrodama. Pored pH-metara koji služe za određivanje koncentracije  $H^+$  jona u vodenim rastvorima, na sličnom principu rade uređaji pomoću kojih se određuju koncentracije drugih jona. U te svrhe su razvijene različite elektrode koje reaguju na prisustvo određenih jona, na primer za određivanje koncentracija  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $CN^-$  jona. Ove elektrode se nazivaju jon-selektivne elektrode. Pored njihove osetljivosti i tačnosti, od velikog značaja je i selektivnost

ovih senzora.

Određivanje sadržaja kiseonika. Sadržaj kiseonika, bilo u gasovitoj fazi, bilo rastvorenog, je od izuzetnog značaja u mnogim, naročito biohemijskim sistemima. Zbog toga se razvoju metoda za njegovo određivanje posvećuje značajna pažnja. Deo ovih metoda se zasniva na specifičnim elektrodama.

Za određivanje sadržaja *rastvorenog kiseonika* razvijen je niz specifičnih elektroda čiji se rad zasniva na difundovanju kiseonika iz rastvora kroz membranu od silikonske gume u rastvor natrijum bikarbonata, gde se vrši njegova redukcija na srebrnoj elektrodi. Promene temperature značajno utiču na rad ove elektrode, tako da najčešće nije dovoljna jednostavna temperaturna kompenzacija već je merenje potrebno vršiti uz regulaciju temperature. Čelija za merenje rastvorenog kiseonika nije reverzibilna, tako da dolazi do oksidacije elektrode i potrebno je njeno povremeno čišćenje.

Najčešće korišćena metoda za određivanje količine kiseonika u *gasovitoj fazi* se zasniva na *cirkonijumovoj elektrodi*. Ova elektroda je analogna staklenoj elektrodi za merenje pH. Ona sadrži membranu od zirkonijuma koja na temperaturama iznad 600 °C postaje propustljiva za kiseonik. Od platinskih mrežica su načinjene elektrode između kojih se javlja napon koji zavisi od razlike parcijalnih pritisaka kiseonika sa jedne i druge strane membrane. Sa jedne strane se kao referentni fluid koristi vazduh (sa 20.9% kiseonika), dok se sa druge strane provodi uzorak gasa čiji se sadržaj kiseonika određuje. Signal se povećava pri smanjenju sadržaja kiseonika. Pomoću ove metode je moguće određivanje sadržaja kiseonika ispod 1 ppm, sa tačnošću od 10%. Pri korišćenju cirkonijumove elektrode, neophodno je vršiti regulaciju temperature ćelije (obično na 800 °C).

Pored cirkonijumove elektrode, za merenje koncentracije kiseonika u gasu se često koriste i *paramagnetni analizatori*, koji se zasnivaju na paramagnetnim osobinama kiseonika. Pored kiseonika, ovakve osobine pokazuju još samo NO<sub>2</sub> i ClO<sub>2</sub>, tako da je ova metoda izuzetno selektivna. Princip rada ovih uređaja se zasniva na skretanju spore struje gasa pod dejstvom magnetnog polja. Mogu se sresti različita konstruktivna rešenja paramagnetnih analizatora. Međutim, za sve njih je karakteristično da su jako osetljivi na promene temperature, tako da je neophodna temperaturna kompenzacija, ili čak regulacija temperature. Postoje uređaji koji mere od 1% do 100% kiseonika, sa preciznošću od 1% od pune skale.

Konduktometrijske metode. Konduktometrija (određivanje električne provodnosti) je nespecifičan način za određivanje ukupne jonske jačine vodenog rastvora. Ova metoda je jeftina, kvantitativna i robustna, tako da i pored svoje nespecifičnosti nalazi veliku primenu. Zasniva se na merenju električne otpornosti određene zapremine procesne tečnosti između dve elektrode. Za ove svrhe su najbolje platinske elektrode, ali se mogu koristiti i elektrode od kompozita na bazi ugljenika, nerđajućeg čelika ili monela. Da ne bi dolazilo do polarizacije elektroda, koristi se naizmenična struja.

Najčešće korišćena konfiguracija konduktometra se sastoji od anularno postavljenih elektroda smeštenih u plastičnoj cevi kroz koju protiče procesna tečnost (najčešće vertikalno, da ne bi došlo do akumulacije čestica nečistoća ili mehurića gasa).

Električna provodnost zavisi od temperature, tako da je najčešće neophodno vršiti temperaturnu kompenzaciju merenja. U slučajevima kada se radi sa jako agresivnim fluidima, ne koriste se elektrode, već se električna otpornost meri korišćenjem principa indukcije, sa spoljašnje strane cevi.

Konduktometrijske metode se koriste za kontinualno određivanje koncentracije u tečnim sistemima i za upravljanje u mnogim procesima. Pored toga, određivanjem električne provodnosti vlažnih materijala, kao što su hartija, tekstil ili prehrambeni proizvodi, može se određivati vlažnost ovih materijala i upravljati procesom njihovog sušenja.

Pored navedenih elektrohemijskih metoda pomoću kojih se može vršiti kontinualna analiza satava, koriste se i sistemi automatske titracije pomoću kojih se dobijaju podaci o sastavu i koncentraciji u uzorcima.

### 3.2.7.3. *Određivanje koncentracije kondenzabilnih para u gasovima (određivanje vlažnosti gasova)*

Sadržaj vodene, ili neke druge, pare u gasu se često naziva vlažnost gasa. Vlažnost gasova se izražava na tri alternativna načina: kao koncentracija (u zapreminskim procentima, ppm-ima ili  $\text{g/cm}^3$ ), preko tačke rose (temperature pri kojoj se javljaju prve kapi kondenzata) ili preko relativne vlažnosti (odnosa parcijalnog pritiska pare i pritiska zasićenja na istoj temperaturi). Za određivanje vlažnosti gasova se najčešće koriste senzori koji rade na principu tačke rose i na principu adsorpcije.

Senzori za određivanje tačke rose. Ovi senzori se zasnivaju na ogledalu (najčešće izrađenom od zlata ili rodijuma) koje se hladi, i na kome treba detektovati pojavu magle, odnosno prvih kapi kondenzata. Detekcija zamagljivanja ogledala se najčešće vrši merenjem refleksije svetlosnog zraka. U novije vreme se koriste keramička ogledala, na kojima se pojava vlage detektuje merenjem promene električne kapacitivnosti. Pošto u oba slučaja senzor radi na principu hlađenja do pojave magle, nakon čega se temperatura opet podiže, ova merenja nisu kontinualna, već se vrše u ciklusima. Vreme potrebno za jedan ciklus zavisi od temperature, i povećava se sa sniženjem temperature.

Senzori za određivanje tačke rose se koriste kao sekundarni standardi za određivanje vlažnosti. Mogu se koristiti u širokom opsegu od 1 ppm (v/v), do zasićenja.

Senzori na principu adsorpcije. Ovi senzori se trenutno najčešće koriste za industrijsko merenje vlažnosti gasova. Njihov ključni deo je sloj poroznog adsorbensa koji služi kao dielektrik električnog kondenzatora. Pri promeni vlažnosti gasa sa kojim je ovaj adsorbens u kontaktu, dolazi do promene adsorbovane količine vlage, što utiče na promenu električne permitivnosti, a time i električne kapacitivnosti. Ova metoda se najčešće koristi za određivanje sadržaja vodene pare koja ima visoke vrednosti električne permitivnosti.

Kao adsorbensi se najčešće koriste aluminijum-oksidi ili silicijum-dioksidi, ali se mogu koristiti i drugi keramički ili polimerni materijali. Ovi senzori se izrađuju u različitim oblicima i veličinama. Robustni su, sigurni i mogu se koristiti za merenje vlažnosti od ispod 1 ppm (v/v) do zasićenja.

Mikrogravimetrijski senzori. Na sličnom principu se zasnivaju i mikrogravimetrijski senzori, nova vrsta uređaja na čijem se razvoju dosta radi poslednjih godina. Oni rade na principu površinskog ili zapreminskog oscilovanja kristala. Ovi kristali se prevlače specifičnim prevlakama, na čijoj površini se vrši adsorpcija određenih komponenata iz gasne smeše. Kao rezultat adsorpcije, dolazi do promene mase čitavog sistema, zbog čega dolazi do promene frekvencije oscilovanja. Na ovaj način se koncentracija određuje na osnovu merenja promene frekvencije oscilovanja kristala. Izborom vrste i mase prevlake, utiče se na selektivnost i osetljivost merenja.

### 3.2.7.4. *Spektroskopske metode*

Spektroskopske metode koje se koriste za određivanje sastava i koncentracije se zasnivaju na merenju apsorpcije zračenja. Na osnovu talasne dužine apsorbovanog zračenja može se odrediti vrsta supstance koja je prisutna u fluidu, dok stepen apsorpcije određuje količinu prisutne supstance. Većina uređaja se zasniva na poređenju apsorpcije zračenja koje prolazi kroz ćeliju koja sadrži fluid koji treba analizirati sa zračenjem koje prolazi kroz referentnu ćeliju.

Za određivanje vlažnosti gasova se koriste sledeće metode apsorpcione spektroskopije: kolorimetrija, vidljiva i ultra-ljubičasta spektroskopija i infra-crvena spektroskopija.

Kolorimetrija. Najjednostavnija spektroskopska metoda se zasniva na merenju obojenosti rastvora. Deo procesne struje se provodi između staklenih ili kvarcnih prozora, kroz koje prolazi svetlosni snop koji je prethodno propušten kroz pogodno odabran filter od obojenog stakla, tako da sadrži samo određeni deo spektra u kome supstanca čija se koncentracija određuje najbolje apsorbuje. Kao izlaz se može dobiti kontinualan električni signal koji se može upotrebiti u sistemima automatskog upravljanja.

U industrijskim uslovima, kolorimetrija se može koristiti samo za kontinualno određivanje koncentracije obojenih tečnosti. U laboratorijskim uslovima se ova metoda može koristiti i za određivanje koncentracije bezbojnih tečnosti, tako što se prethodno vrši njihovo bojenje, dodatkom specifičnih reagenasa.

Vidljiva i ultra-ljubičasta spektroskopija. U ultraljubičastom i delom u vidljivom delu spektra, supstance apsorbuju zračenje u skladu sa energetske nivoima elektrona u njihovim molekulima. Za određivanje koncentracije se može upotrebiti izvor ultraljubičaste svetlosti, u željenom delu spektra. Ova tehnika je vrlo pouzdana za analizu jednostavnih smeša, ali nije mnogo specifična. Vrlo se mnogo koristi u laboratorijama, ali ne i za kontinualna merenja koncentracije u procesu.

Infra-crvena spektroskopija. U infra-crvenoj oblasti spektra, molekuli apsorbuju zračenje talasnih dužina koje odgovaraju vibracijama molekulskih veza. Složeniji molekuli imaju više mogućih načina vibracije, tako da se apsorpcija javlja u nekoliko oblasti spektra.

Najvažnija činjenica koju koristi infra-crvena spektroskopija je da različite strukture veza u molekulima imaju karakteristične frekvencije vibracija, pa time i talasne dužine koje apsorbuju. Tako se, na primer, prisustvo benzena u heksanu može detektovati po prisustvu apsorpcionih linija koje odgovaraju aromatičnom benzolovom prstenu.

Infra-crvena spektroskopija se široko primenjuje u procesnoj industriji, za određivanje sastava gasova, tečnosti i čvrstih supstanci. U ovom poslednjem slučaju, meri se odbijena svetlost. Treba napomenuti da infra-crvena spektroskopija nije pogodna za određivanje koncentracije u vodenim rastvorima, kao ni u gasovima u kojima je prisutna vodena para.

Kao izvor infra-crvenog zračenja, najčešće se koristi zagrejana keramička žica, mada sve više u upotrebu ulaze i laseri.

Pored navedenih, postoji niz spektroskopskih metoda koje se uobičajeno koriste u laboratoriji, ali uglavnom nisu primenjivane za industrijska merenja: nuklearna magnetna rezonansa, masena spektroskopija, atomska apsorpcija, opto-akustična spektroskopija i slično.

### 3.2.7.5. Hromatografske metode

*Hromatografija* je jedna od najšire korišćenih instrumentalnih analitičkih metoda za analizu sastava i određivanje koncentracije u gasovitim i tečnim smešama. Po svojoj prirodi, ova metoda se ne može koristiti kontinualno, ali se koristi za semikontinualno (periodično) određivanje u industrijskim uslovima. Zasniva se na različitom afinitetu sorbenta (adsorbensa, jonoizmenjivačke smole ili neisparljivog rastvarača koji je nanet na inertni nosač) ka pojedinim komponentama smeše koja se analizira. Uzorak smeše se rastvara u nosećem gasu ili tečnosti i propušta kroz jako usku i dugačku kolonu koja je napunjena sorbentom, posle čega se ispira inertom. Različite komponente se različito vezuju, zbog čega se razlikuje njihovo vreme zadržavanja u koloni (retenciono vreme). Merenjem vremena zadržavanja pojedinih komponentata dolazi se do podataka o prisutnim komponentama u smeši, dok se merenjem desorbovanih količina pojedinih komponentata (određivanjem površine pikova), određuju koncentracije pojedinih komponentata. Za detekciju desorbovanih komponentata u nosećem gasu ili tečnosti, koriste se različite metode, od kojih su najpoznatije metoda određivanja toplotne provodnosti pomoću zagrejjane žice i metoda jonizujućeg plamena za gasnu, i konduktometrija, refraktometrija i različiti elektrohemijski senzori za tečnu hromatografiju.

Hromatografske metode su diskontinualne i mogu se koristiti za određivanje koncentracije u procesu samo sa uzimanjem uzoraka i cikličnim radom hromatografa. Primenom digitalnih računara za obradu podataka, popravljaju se njihove, inače loše dinamičke karakteristike. Korišćenjem diskretnih sistema upravljanja, koji koriste uzorkovane podatke, hromatografske metode se sve više koriste za direktno merenje u pogonu, u cilju automatskog upravljanja. Glavni nedostaci ovih uređaja, iz ovog aspekta su: relativno veliko vreme potrebno za merenje, osetljivost na uslove rada i visoka cena.

### 3.2.7.6. Metode zasnovane na hemijskim reakcijama

Ograničeni broj uređaja za određivanje sastava radi na principu hemijske reakcije. U industriji se ove metode najčešće koriste za određivanje ukupnog ugljenika. Količina ukupnog "organskog" ugljenika koji je prisutan u vodenim rastvorima se može odrediti oksidacijom do ugljen dioksida i njegovim merenjem pomoću infra-crvene spektroskopije. Kao oksidaciono sredstvo se koristi persulfat i reakcija je katalizovana ultravioletnim zračenjem. Tipičan industrijski uređaj može da određuje sadržaj ukupnog ugljenika manji od 1 ppm. Postupak određivanja je cikličan (trajanje ciklusa je nekoliko minuta) i podrazumeva prethodno uzimanje uzoraka.

## 3.3. REGULACIONI VENTIL KAO IZVRŠNI ELEMENT SISTEMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

Izvršni element predstavlja vezu između regulatora i procesa. U velikoj većini slučajeva, kao izvršni element se koristi regulacioni ventil kojim se na željeni način menja protok fluida kroz cevovod u koji je ugrađen.

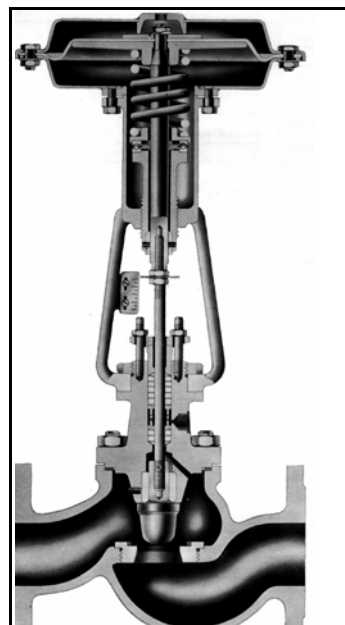
### 3.3.1. Osnovni elementi i tipovi regulacionih ventila

Regulacioni ventil ima dva osnovna funkcionalna dela: motorni deo i izvršni deo.

*Motorni deo* regulacionog ventila (*aktuator, servomotor*) je element koji prima upravljački signal iz regulatora i pretvara ga u mehaničko pomeranje vretena ventila.

*Izvršni deo* regulacionog ventila pretvara pomeranje vratila ventila u promenu protoka fluida kroz cevovod u koji je ugrađen. On se sastoji od tela ventila u kome se nalazi sedište na koje naleže pečurka ili čep na kraju vretena ventila. Pomeranjem vretena ventila naviše i naniže, pečurka manje ili više naleže na sedište ventila i time se postiže povećanje ili smanjenje zazora, a time i protoka kroz ventil.

Na slici 3.3-1. je prikazan presek jednog tipičnog konvencionalnog pneumatskog regulacionog ventila.



Slika 3.3-1. Tipičan konvencionalni pneumatski regulacioni ventil

#### 3.3.1.1. Klasifikacija regulacionih ventila prema konstrukciji motornog dela

Prema vrsti energije, odnosno signala koji prima motorni deo, razlikujemo sledeće vrste regulacionih ventila:

- *pneumatski* koji je najčešće korišćen, naročito ako u sistemu postoji opasnost od paljenja ili eksplozije (najčešće se koristi konfiguracija pneumatskog motornog dela sa membranom i oprugom koji smo opisali u poglavlju 2.3.4.6.);
- *elektropneumatski* koji se koristi u kombinaciji sa električnim upravljačkim sistemom i u kome je obuhvaćen pretvarač električnog u pneumatski signal;
- *hidraulički* koji ima oblik hidrauličkog klipa koji se pomera pomoću tečnosti pod pritiskom i koristi se kada treba ostvariti velike sile, odnosno momente;

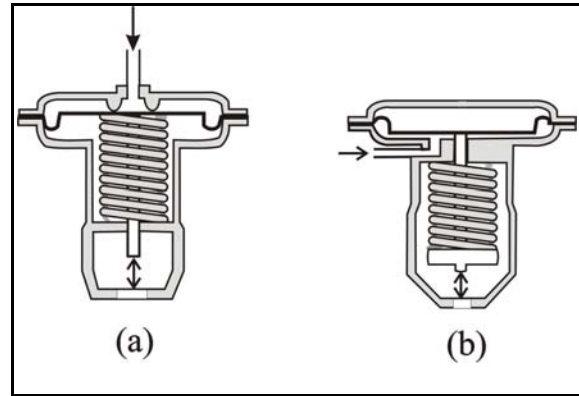
- *elektrohidraulički* koji ima iste karakteristike kao hidraulički, samo obuhvata i pretvarač električnog u hidraulički signal, pa se koristi u kombinaciji sa električnim upravljačkim sistemom;

- *električni* koji može biti na principu elektromotora ili solenoida i čije se korišćenje izbegava u hemijskoj industriji, zbog mogućnosti varničenja koje može izazvati eksploziju.

Na osnovu toga da li akcija servomotora teži da otvori ili da zatvori ventil, servomotore delimo na:

- *servomotore sa direktnim dejstvom*, koji teže da zatvore ventil koji je normalno otvoren (slika 3.3-2(a));

- *servomotore sa inverznim dejstvom* koji teže da otvore ventil koji je normalno zatvoren (slika 3.3-2(b)).



Slika 3.3-2. Pneumatski servomotor (a) sa direktnim i (b) sa inverznim dejstvom

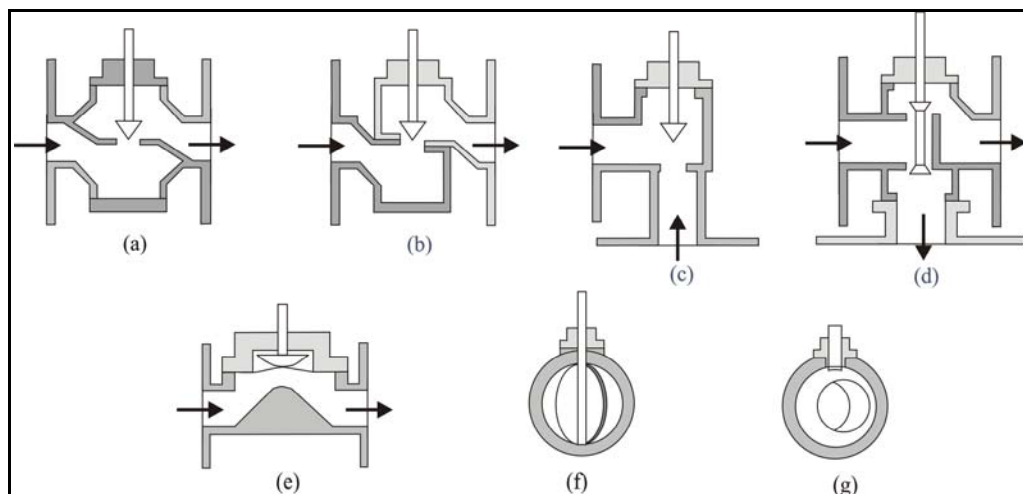
### 3.3.1.2. Klasifikacija ventila prema konstrukciji tela ventila

Telo ventila može biti konstruisano na različite načine. Najčešći tipovi koji se koriste kod regulacionih ventila su sledeći:

- konvencionalni jednodelni
- konvencionalni dvodelni
- ugaoni
- trokraki
- leptir
- loptasti
- membranski
- specijalne konstrukcije.

Kod ugaonog ventila struja menja pravac za  $90^\circ$ , što je povoljno kada je potrebna velika redukcija pritiska u ventilu. Trokraki ventili se koriste u slučaju mešanja dve struje ili u slučaju razdvajanja jedne struje na dva dela. Leptir ventili daju vrlo male otpore strujanju, dok loptasti obezbeđuju vrlo dobro zaptivanje, a membranski su pogodni za rad sa agresivnim i toksičnim fluidima.

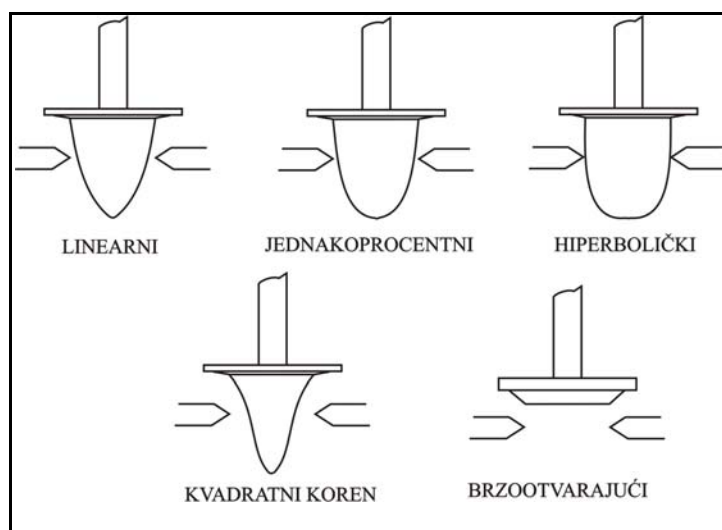
Šematski prikaz različitih tipova tela ventila je dat na slici 3.3-3.



Slika 3.3-3. Različiti tipovi tela ventila (a) jednodelni, (b) dvodelni, (c) ugaoni, (d) trokraki, (e) membranski, (f) leptir, (g) loptasti

### 3.3.1.3. Klasifikacija ventila prema broju i obliku čepova i sedišta

Konvencionalni ventili mogu biti sa jednim ili sa dva sedišta, odnosno čepa.



Slika 3.3-4. Različiti oblici čepova regulacionih ventila

Od oblika čepa zavisi statička karakteristika ventila, koja je značajna za karakteristiku celog regulacionog ventila. Na slici 3.3-4. su prikazani primeri različitih oblika čepova regulacionih ventila.

### 3.3.2. Statičke i dinamičke karakteristike regulacionih ventila

Kao i kod ostalih elemenata sistema upravljanja, i kod regulacionog ventila su značajne i statičke i dinamičke karakteristike.

#### 3.3.2.1. Statičke karakteristike regulacionih ventila

Poznavanje statičke karakteristike regulacionog ventila je od velikog značaja, jer ona utiče na ukupnu statičku karakteristiku regulacionog sistema (množi se sa statičkim karakteristikama objekta i mernog elementa). Ako je statička karakteristika ventila nelinearna, ona može da uvede nelinearnost u regulaciono kolo. Sa druge strane, pravilnim izborom nelinearne statičke karakteristike regulacionog ventila može se kompenzovati nelinearnost procesa i na taj način izvršiti linearizacija sistema.

Protok fluida kroz regulacioni ventil zavisi od veličine ventila, pada pritiska na njemu, pozicije vratila ventila i karakteristika fluida. Projektna jednačina zavisi od vrste fluida i režima strujanja:

- za nestišljive tečnosti i  $Re > 1000$ :

$$F = C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho}} \quad (3.3-1)$$

- za nestišljive tečnosti i  $Re < 1000$  uvodi se korekcija za viskoznost:

$$F = C_v f(x) \Psi_G \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho}} \quad (3.3-2)$$

- za gasove i pare uvodi se korekcija zbog stišljivosti:



$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 \\ F &= C_v \frac{f(x)\varepsilon}{p_1} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} & \text{za } \Delta p_v < 0.1 p_1 \\ \varepsilon &\approx 1 - \beta \frac{\Delta p_v}{p_1} & \text{za } 0.1 p_1 < \Delta p_v < 0.5 p_1 \\ \varepsilon &\approx 0.95 - (\beta - 0.1) \frac{\Delta p_v}{p_1} & \text{za } \Delta p_v > 0.5 p_1 \end{aligned} \quad (3.3-3)$$

Koeficijent  $\beta$  zavisi od vrste fluida i ima sledeće vrednosti:

- $\beta=0.5$  za zasićenu vodenu paru
- $\beta=0.47$  za pregrejanu vodenu paru i troatomne gasove
- $\beta=0.45$  za vazduh i dvoatomne gasove
- $\beta=0.42$  za jednoatomne gasove.

U gornjim jednačinama je:

- $F$  - zapreminski protok fluida
- $C_v$  - koeficijent veličine ventila
- $f(x)$  - protočna karakteristika ventila
- $x$  - položaj vretena ventila
- $\rho$  - gustina fluida
- $\Delta p_v$  - pad pritiska na ventilu
- $\Psi_G$  - popravni koeficijent zbog viskoznosti koji je funkcija  $Re$ -broja
- $p_1$  - pritisak radnog fluida ispred ventila

Protočne karakteristike ventila. Od oblika protočne karakteristike zavisi oblik statičke karakteristike ventila. Najčešće korišćene protočne karakteristike su prikazane na slici 3.3-5.

Matematičke zavisnosti ovih protočnih karakteristika su sledeće:

- za linearnu:

$$f(x) = x \quad (3.3-4)$$

- za jednakoprocentnu:

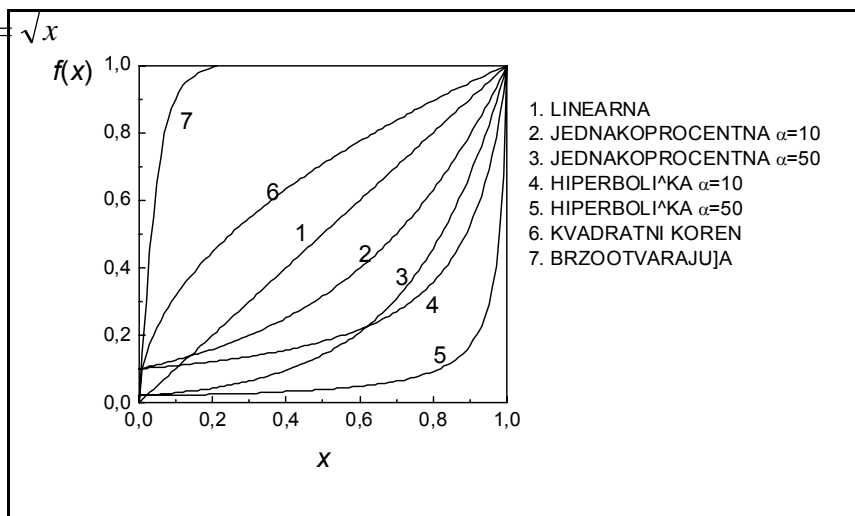
$$f(x) = \alpha^{x-1} \quad (3.3-5)$$

- za hiperboličnu:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha - (\alpha - 1)x} \quad (3.3-6)$$

- za karakteristiku oblika kvadratnog korena:

$$f(x) = \sqrt{x} \quad (3.3-7)$$



Slika 3.3-5. Najčešće korišćene protočne karakteristike regulacionih ventila

Oblik protočne karakteristike zavisi od oblika čepa i sedišta ventila. Oblici čepova prikazani na slici 3.3-4. odgovaraju različitim karakteristikama prikazanim na slici 3.3-5.

Često se, umesto protočne karakteristike, koristi *koeficijent propusne sposobnosti* ventila, koji se definiše na sledeći način:

$$K_v = C_v f(x) \quad (3.3-8)$$

$f(x)$ , odnosno  $K_v(x)$ , predstavlja konstruktivnu karakteristiku ventila, koja je identična statičkoj karakteristici samo kada je pad pritiska na ventilu konstantan. Ove karakteristike daje proizvođač ventila.

### 3.3.2.2. Dinamičke karakteristike regulacionih ventila

Dinamičke karakteristike ventila (izvršnog dela regulacionog ventila) su uglavnom zanemarljive u odnosu na dinamičke karakteristike servomotora sa kojim je spregnut. Može se reći da ukupnu statičku karakteristiku izvršnog elementa određuje ventil (izvršni deo), a njegovu dinamičku karakteristiku servomotor (motorni deo regulacionog ventila). Ukupna dinamička karakteristika izvršnog elementa (ventila sa servomotorom) se najčešće može prikazati prenosnom funkcijom:

$$G_{IE}(s) = \frac{K_{IE}}{\tau_{IE} s + 1} e^{-D_{IE}s} \quad (3.3-15)$$

Dinamika servomotora treba da bude takva da ne utiče značajno na ukupnu dinamiku sistema upravljanja, odnosno da se može zanemariti u odnosu na dinamiku samog procesa kojim se upravlja. Najčešće se zahteva da bude zadovoljen uslov:

$$\begin{aligned} \tau_{IE} &< (0.2 - 0.3) \tau_p \\ D_{IE} &< (0.1 - 0.2) D_p \end{aligned} \quad (3.3-16)$$

gde su  $\tau_p$  i  $D_p$  vremenska konstanta i čisto kašnjenje procesa.

### 3.3.3 Izbor i specifikacija regulacionog ventila

#### 3.3.3.1. Opšte preporuke za izbor regulacionog ventila

U opštem slučaju treba primeniti konvencionalne ventile sa jednim ili dva sedišta i koaksijalnim ulazom i izlazom. Druge konstrukcije se primenjuju u sledećim slučajevima:

- ugaoni ventili se koriste u slučajevima kada nisu primenljivi konvencionalni ventili zbog visokog pritiska u struji fluida, kada je potrebno ostvariti veliki pad pritiska kroz ventil ili kada je radni fluid jako viskoznan;

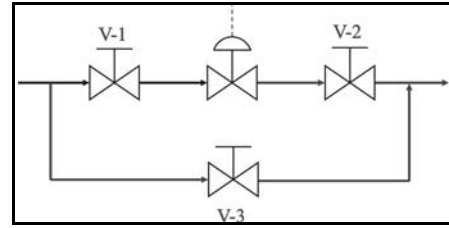
- loptasti ventili se primenjuju u ulozi strujnih prigušnica, kada se zahteva veliki opseg protoka i dobro zaptivanje (primena za blokadu strujanja pri ispadu postrojenja) i kod prisustva čvrstih čestica u fluidu;

- trokraki ventili se primenjuju kada se tok deli na dva dela ili kod spajanja dva toka. Treba izbegavati njihovo korišćenje pri visokim temperaturama ( $>150^\circ\text{C}$ ) i kod velikih prečnika cevovoda.

#### 3.3.3.2. Dodatna oprema regulacionih ventila

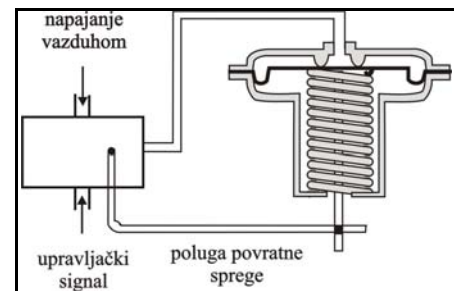
Regulacioni ventil je često dodatno opremljen delovima kao što su točak za ručno otvaranje, pozicioner i drugi.

Točak za ručno otvaranje i zatvaranje ventila treba predvideti u slučajevima kada ne postoji zaobilazna linija oko ventila. Uobičajeni način ugrađivanja regulacionog ventila je šematski prikazan na slici 3.3-7. Regulacioni ventil se ugrađuje između dva ručna ventila (V-1 i V-2), a paralelno sa njim se ugrađuje još jedan ručni ventil ili slavina (V-3).



Slika 3.3-7. Uobičajeni način ugrađivanja regulacionog ventila

Pozicioner. Kod pneumatskih ventila, ponekad, zbog trenja vratila ili sila koje su rezultat strujanja fluida, položaj vratila ventila nije proporcionalan ulaznom signalu. U tim slučajevima se na ventilu postavlja pneumatski ili elektropneumatski pojačavački uređaj koji ostvaruje povratnu spregu položaja čepa u odnosu na sedište, i naziva se pozicioner. Pozicioner zapravo predstavlja regulator povratne sprege sa velikim pojačanjem, koji je prikačen za vratilo ventila i reguliše njegov položaj. Pored toga, pomoću pozicionera se može promeniti opseg ulaznog signala koji stiže iz regulatora u odnosu na opseg rada ventila. Šematski prikaz pozicionera je dat na slici 3.3-8. Zavisno od karakteristika motornog dela ventila (površine membrane, dužine puta vratila itd), pozicioner može značajno da utiče na dinamiku regulacionog ventila, a time i ukupnog sistema.



Slika 3.3-8. Šematski prikaz pneumatskog motornog dela sa pozicionerom

### 3.3.3.3. Izbor protočne karakteristike regulacionog ventila

Za izbor protočne karakteristike ventila je neophodno prethodno poznavanje statičke karakteristike procesa. Pri tome se mogu koristiti sledeća generalna pravila:

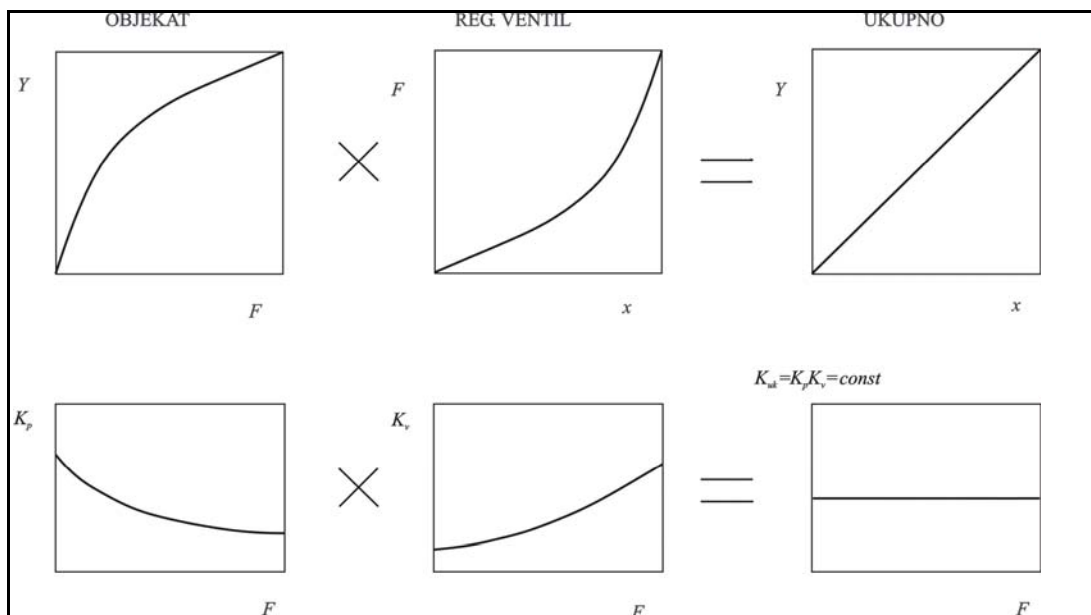
(1) Za linearne procese treba koristiti regulacioni ventil sa linearnom protočnom karakteristikom, ako se pad pritiska na ventilu ne menja značajno u toku rada. Ukoliko se pad pritiska na ventilu smanjuje sa povećanjem protoka, treba koristiti regulacioni ventil sa jednakoprocentnom karakteristikom.

(2) Za nelinearne procese treba utvrditi potrebnu karakteristiku regulacionog ventila da bi se nelinearnost kompenzovala.

(3) Brzo otvarajuća karakteristika se koristi kod dvopoložajne regulacije, u sistemima blokade i kada je potrebno dobro zaptivanje.

Ukoliko objekat upravljanja ima nelinearnu statičku karakteristiku, može se izvršiti njegova linearizacija izborom regulacionog ventila sa odgovarajućom nelinearnom protočnom karakteristikom. Nelinearnost regulacionog ventila treba da bude inverzna nelinearnosti objekta upravljanja. To se postiže ukoliko je funkcija kojom je definisana zavisnost pojačanja regulacionog ventila od protoka recipročna odgovarajućoj funkciji koja odgovara objektu upravljanja. Ovaj postupak za nalaženje potrebne protočne karakteristike ventila da bi se kompenzovala nelinearnost objekta upravljanja je grafički prikazan na slici 3.3-9.

**PREPORUKA:** Linearizaciju objekta upravljanja regulacionim ventilom treba vršiti samo ako se u punom opsegu rada postrojenja pojačanje objekta upravljanja menja za više od 20 %.



Slika 3.3-9. Postupak nalaženja protočne karakteristike ventila za kompenzaciju nelinearnosti objekta upravljanja

### 3.4. TRANSMISIONE LINIJE

Da bi se ostvario prenos signala od mernog elementa do regulatora i od regulatora do izvršnog elementa, neophodno je ostvariti međusobnu vezu ovih elemenata. Za to se koriste transmisionne linije. Dinamičke karakteristike transmisionih vodova se najčešće mogu zanemariti. Međutim, ako su promene u sistemu vrlo brze, ili su transmisioni vodovi jako dugi, kod pneumatskih sistema se mora uzeti u obzir i njihova dinamička karakteristika. Odnos pritiska na izlazu iz, i na ulazu u transmisioni vod, može se prikazati sledećom prenosnom funkcijom:

$$\frac{P_o(s)}{P_i(s)} = \frac{e^{-D_t s}}{\tau_t s + 1}, \quad D_t / \tau_t \approx 0.25 \quad (3.4-1)$$