

REGULACIJSKO IN SLEDILNO DELOVANJE:

Namen regulacijskega delovanja je obdržati regulirno veličino pri določeni delovni točki ne glede na motnje, če pa omogočamo čim idealnejše prilagajanje regulirne veličine spremembam referenčne vrednosti pa imamo sledilno delovanje regulacijske zanke.

DOBRE LASTNOSTI POVRATNE ZANKE:

Z večanjem ojačenja regulatorja vpliva na časovno konstanto sistema, ki se zmanjša in zato sistem postaja hitrejši. Dodatek ustrezno izbrane negativne povratne zanke sistem stabilizira, kar pri odprti zanki ni mogoče. Zmanjšuje občutljivost sistema na spremembe sistemskih parametrov. Povratna zanka bistveno zmanjša občutljivost sistema na motnje.

PROPORCIONALNO VODENJE (P):

Spreminjanje odprtosti ventila v smislu popraviljanja pretoka vroče vode v nekem razmerju do spremembe pogreška e . Proporcionalno vodenje opišemo z naslednjo relacijo:

$$V = K_C E + m$$

V = odprtost ventila

K_C = proporcionalno ojačanje regulatorja

m = konstanta, ki podaja odprtost ventila v povprečnih razmerah ($e=0$)

Faktor K_C je mera za občutljivost spremembe odprtosti ventila glede na dani pogrešek. Ventil naj bi bil dimenzioniran tako, da je za določenon nastavitveno točko nekje na sredini, saj tako omogoča akcije v obeh smereh, ki jih v največjih primerih zahtevajo motnje.

Odprtost ventila se lahko spremeni, le če se spremeni e , saj je m konstanta. Kolikšen bo pogrešek (padec temperature) je odvisno od nastavitve konstante K_C v regulatorju. Večja kot bo K_C manjši bo e . Pogrešek ne more biti nič ker bi to pomenilo $V=m$, kar pa ni mogoče saj je m nastavljen za povprečne razmere, kar pa za določeno spremembo dotoka ne daje $e=0$.

PROPORCIONALNO OJAČANJE in PROPORCIONALNO OBMOČJE (PB):

Proporcionalno ojačanje se je uveljavil šele v času uporabe metod analize v regulacijski teoriji. Zgodovinsko gledano pa so proporcionalnost med pogreškom in odprtostjo ventila najprej imenovali **proporcionalno območje (PB)**. Slednje je definirano kot faktor ki pokaže procent spremembe pogreška, ki je potreben da povzroči poln hod ventila (akcija popraviljanja pogreška).

Povezava z ojačenjem:
$$K_C = \frac{100\%}{PB\%}$$

Člen m pomeni odprtost ventila. Tako pozicijo ki jo padaja konstanta m imenujemo ročna prednastavitev.

PROPORCIONALNO-INTEGRIRNO (PI) VODENJE:

Namesto prednastavitve m načrtamo regulator, ki premika ventil s hitrostjo proporcionalno pogrešku e . Ta dodatni regulacijski način imenujemo avtoamtična prenestavitev ali pa **integrirno vodenje**. Navadno ta način vodenja uporabljajo v kombinaciji s proporcionalnim vodenjem in služi za izničenje pogreška v ustaljenem stanju.

Glede na dejstvo, da integrirna akcija premika ventil s hitrostjo ki je proporcionalna pogrešku, lahko ta način vodenja opišemo z dif. enačbo: $\frac{dV}{dt} = K_I e$ pri čemer je K_I integrirna konstanta definirana kot $K_I = K_C / t_i$.

t_i **integracijski čas:**

Čas po katerem pride do enake spremembe odprtosti ventila kot pride pri proporcionalnem delu

Za odprtost ventila V torej dobimo enačbo:

$V = K_I \int_0^t e dt$ Ta enačba nam pove da je odprtost ventila proporcionalna integralu pogreška.

S kombinacijo proporcionalnega in integrirnega delovanja dobimo izraz

$$V = K_C e + \frac{K_C}{t_i} \int_0^t e dt + m$$

Pri tem načinu naj še omenimo še problem tako imenovanega integralskega pobega.

INTEGRALSKI POBEG:

Zgodi se namreč lahko, da regulator zahteva signal, ki je izven operacijskega področja regulatorja samega ali aktuatorja ali pa izvršnega člana (npr. ne moremo doseči več kot polno odprtost ventila). V tem primeru pogrešek ne more pasti na 0 in integrirni del regulatorja ta pogrešek integrira, s čimer zahteva še vedno večjo in večjo regulirno veličino.

PROPORCIONALNO-DIFERENCIRNO (PD) VODENJE:

Deluje le ko se pogrešek spreminja. Sprememba odprtosti ventila je proporcionalna hitrosti spremembe pogreška. Ko se pogrešek ne spreminja več, tudi tovrstna regulacija preneha delovati, pa čeprav je pogrešek velik. Diferencirno regulacijsko akcijo opisuje dif. enačba

$$V = K_D \cdot \frac{de}{dt}; \text{ kjer je } K_D \text{ definirana kot } K_D = K_C t_d \text{ pri čemer je } t_d \text{ **diferencirni čas!**}$$

Kombinacija te funkcije s proporcionalnim regulatorjem predstavlja proporcionalno-diferencirno (PD) vodenje, ki ga opisuje izraz

$$V = K_C e + K_D \dot{e} + m$$

diferencirni čas (t_d) = je čas ko se prispevek proporcionalnega dela izenači z začetnim prispevkom diferencirnega dela.

Spremenljivi pogrešek lahko matematično opišemo z relacijo $e = ct$ kjer je c konstanta ki določa naklon premice.

PROPORCIONALNO-INTEGRIRNO-DIFERENCIRNO VODENJE

Proporcionalno-integrirno-diferencirno (PID) vodenje kombinira tri načine vodenja, kar je razvidno iz regulacijskega zakona, ki ga zapišemo v obliki:

$$u = K_C e + \frac{K_C}{t_i} \int_0^t e dt + K_C t_d \frac{de}{dt}$$

Tovrstno vodenje omogoča hiter in stabilen odziv brez pogreška v ustaljenem stanju. Uглаševanje PID regulatorjev je težavno, saj v tem primeru spreminjamo tri parametre. Kljub temu pa je to eden najbolj razširjenih regulatorjev, ki ob korektni nastavitvi daje najboljše rezultate vodenja.

FEEDFORWARD CONTROL (Krmiljenje z upoštevanjem motnje)

Ideja tovrstnega vodenja je reagirati na motnjo, še predno ta vpliva na izhod sistema. Seveda pa ima tovrstni način nekeje tako resnih slabih lastnosti, da krmiljenje z upoštevanjem motnje navadno vedno uporabljamo v kombinaciji s povratozančnim vodenjem. Krmiljenje z upoštevanjem motnje ki bi bilo uporabljeno brez povratozančnega vodenja bi namreč zahtevalo detilno poznavanje sistema, pri čemer omenjena kompenzacija motnje še vedno ni idealna. Motnje ki jih želimo kompenzirati na ta način, morajo biti natančno predvidene in enostavno merljive. Za našete slabosti poskrbi povratna zanka, ki pa ima po drugi strani delo olajšano, saj za glavno motnjo v veliki meri skrbi krmilnik.

REGULACIJA RAZMERJA (RATIO CONTROL):

Za regulacijo razmerja je značilno, da zagotovi želeno razmerje dveh veličin. Ena je merljiva, vendar pa nanjo z regulirno veličino ne moremo vplivati, druga pa je prava regulirana veličina, ki jo merimo in nanjo tudi vplivamo z regulirno veličino. Vendar pa je dejanska regulirana veličina R razmerje med veličino, na katero lahko vplivamo in veličino, ki jo le merimo. Včasih lahko R dobimo kar neposredno iz merilnika (n. pr. Merilnik koncentracije), vendar pa se izkaže da je bolje če prenesemo računanje razmerja iz rregulacijske zanke. Regulacija razmerja se največkrat pojavlja pri vodenju procesov, kjer je potrebno kontinuirano mešati več komponent tako, da dobimo želeno sestavo rezultirajoče mešanice.

KASKADNA REGULACIJA: (CASCADE CONTROL)

Kaskadna regulacija predstavlja eno izmed najpogosteje uporabljenih večzanknih regulacijskih struktur. Temelji na uvedbi pomožne regulirane velikčine. Razen prave regulirane veličine merimo še neko pomožno (Y_p) in uporabimo dva regulatorja ki sta vezana v kaskado. Prvi glavni regulator ima nastaljivo referenco (R), njegov izhod pa ne predstavlja regulirne veličine, temveč je to referenčni vhod (R_p) za drugi (pomožni) regulator(nima nastavljive reference), ki na svojem izhodu daje regulirno veličino (u). Dobimo glavno(zunanjo) zanko in pomožno (notranjo)zanko, ki pomenita izboljšanje kvalitete regulacije glede na enozančno regulacijo zanke:

- zmanjšaje vpliva motenj in in sprememb v proicesu
- zmanjšanje vplivov nelinearnosti procesu
- zaradi hitrejšega delovanja sistema

Tip regulatorja moramo skrbno izbrati za obe zanki. Za pomožno zanko največkrat izberemo P regulator, saj integrirne komponente, ki bi izničila pogrešek v ustljenem stanju največkrat ne potrebujemo, ker glavna zanka tako ali tako zvezno spreminja referenco pomožne. V zunanjo pa je priporočljivo vstaviti vsaj PI regulator. Diferencialna komponenta naj bi bila vključena v eno ali drugo zanko le v primeru zelo velikih zakasnitev. Najprej moramo ugglasiti pomožno(P) zanko potem pa še glavno (PI) ki obravnava že nastavljeno pomožno zanko kot del sistema.

ŽIVA NIČLA (prednosti, slabosti, primeri):

Najpogosteje uporabljen pnevmatski signal je standarniziran na 20-100 kPa, najbolj razširjen električni pa na od 0-20mA ali 4-20mA enosmernega toka. V omenjenih primerih pomenita 20kPa in 4 mA takoimenovano **živo ničlo**. Ne glede na to da smo pri pnevmatičnih signalih v to prisiljeni, saj ne moremo realizirati popolnega vakuma, pa ima živa ničla pri električnih signalih nekaj pomembnih prednosti:

- Možne so hitre detekcije nekaterih okvar v zanki (če tok pade pod 4mA in tlak pod 20kPa).
- Tudi razmerje signal-šum lahko vseskozi ohranimo na primernem nivoju.

Seveda pa moramo pri računanju s takimi signali predhodno živo ničlo odšteti in jo po računanju zopet prišteti.

UPOROVNI LISTIČI (deformacija, kompenzacija s slepim lističem...)

Uporovni listič spreminja svojo upornost, ko ga raztegujemo ali krčimo. Sprememba upornosti je posledica:

- spremembe dolžine in prečnega prereza vodnika,
- sprememb v materialu vodnika, ki so posledice raztezanja in krčenja

Uporovni listič sestavlja merilna mrežica, ki je iz tanke uporovne žice (debelina cca. 0.015mm) ali pa iz uporovne folije (debelina cca. 0.005mm) in je pritrjena na tanek izolacijski material (debeline do 0.1mm). Vse skupaj z ustreznim lepilom nalepimo na merilno mesto, kjer prihaja do raztezkov ali skrčkov. Merilna mrežica je izvedena v obliki vijugaste strukture tako, da na majhni površini cca. 2cm² dobimo čimvečjo dolžino uporovne žice ali folije in s tem večjo spremembo upornosti. Čeprav so lističi predvideni le za meritev v eni smeri pa so rahlo občutljivi tudi na spremembe v pravokotni smeri. Povezavo med spremembo upornosti in dolžine podaja relacija:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad \Delta R \text{ je sprememba originalne upornosti elementa } R \text{ zaradi raztezka } \varepsilon, \text{ ki je}$$

definiran kot razmerje $\varepsilon = \frac{\Delta X}{X}$ pri čemer je ΔX sprememba prvotne dolžine uporovnega

lističa X . K je proporcionalni faktor, imenovan tudi **razteznostna konstanta uporovnega lističa**. Tipična vrednost za metalne uporovne lističe je $K=2$. Uporovni lističi so lahko narejeni tudi polvodniških materialov, pri čemer je K tudi do 50 krat večji kot pri metalnih izvedbah. Taki uporovni lističi so dražji in ter zelo temperaturno občutljivi in odvisni. Spremembe uporovnega lističa največkrat merimo tako, da ga vključimo v vejo Wheatstoneovega mostiča. Ko je mostič uravnotežen velja

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = U_{IZH} = 0 \quad \text{Temperaturno kompenzacijo pri uporovnih lističih največkrat izvedemo}$$

s pomočjo **slepega lističa**. Tega namreč namestimo v neposredno bližino aktivnega lističa, vendar pravokotno na smer raztezanja ali krčenja. Tako je sprememba upornosti aktivnega lističa posledica raztezka ali skrčka in temperature, sprememba upornosti slepega lističa (je izpostavljen enaki temperaturi kot aktivni) pa le posledica temperature.

MERJENJE TORZIJE:

Ker vsak tak sistem vsebuje vir in porabnika energije, je možno torzijo meriti na ležajih bodisi pri viru ali pa pri porabniku kot rejekcijsko silo F ki deluje na ustrezno ročico dolžine l .

Torzijo izračunamo kot produkt $F \cdot l$. najpogosteje uporabljena meritev za merjenje torzije, ki ne moti merjenega sistema pa je meritev **z uporovnimi lističi** s katerimi merimo napetost v gredi. Da bi izničili vplive upogibnih in osnih sil moramo uporabiti štiri lističe. Vse štiri lističe moramo vključiti v mostič. Para 1 in 2 ter 3 in 4 bosta spreminjala svojo upornost enako glede na upogibne in osne sile in tako bo njihov vpliv U_{IZH} ničen. Torzijski raztezki pa bodo povzročili da R_1 in R_4 enako naraščata, R_2 in R_3 pa enako padata. Tako se pri vplivu na U_{IZH} vsi ti vplivi seštejejo. Lističi morajo biti izredno natančno nameščeni.

Optični princip merjenja torzije: Na oba konca rotirajoče gredi namestimo koleščka, ki imata na obodu vzorec črnih in belih trakov. Če na gredi torzije ni morata biti vzorca enakoležna. Preko dveh optičnih kablov usmerimo na oba koleščka laserska žarka ki se odbijata in tvorita pulzirajočo svetlobo. To preko dveh optičnih kablov vodimo v sprejemnik. Če torzije ni sta oba optična žarka v fazi, fazna razlika pa je proporcionalna torziji, ko se le ta pojavi na gredi.

MERJENJE TLAKA:

Tlak je lahko **absoluten** (merjenje glede na nično vrednost), **diferencialen** (ko gre za razliko dveh tlakov) ali pa **relativen** (kjer merimo razliko absolutnega in diferencialnega tlaka). Če je relativni tlak negativen ga imenujemo **vakum** če je pozitiven pa **nadtlak**.

- **MERILNIKI TLAKA S KAPLJEVINAMI:**

Najstarejše naprave za merjenje tlaka so manometri, s katerimi merimo v glavnem tako imenovano srednjo območje tlakov od 100Kpa so 7Mpa. Uporabljamo jih za merjenje relativnega, absolutnega in diferencialnega tlaka. Gre za merjenje višine, ki je proporcionalna tlaku. Največ izvedb uporablja živo srebro, ki zelo malo izpareva, ima nizek temperaturni razteznostni koeficient in je mnogo težji od vode. Vrste manometrov::

- Živosrebrni manometer za merjenje atmosferskega tlaka
- U cevni manometer za merjenje absolutnega tlaka
- U cevni manometer za merjenje relativnega tlaka
- U cevni manometer za merjenje diferencialnega tlaka
- Manometer z nagnjeno cevjo
- Zvonasti manometer

- **MERILNIKI TLAKA NA OSNOVI ELASTIČNOSTI:**

Tovrstne naprave delujejo na osnovi pretvorbe sile tlaka v mehanski premik. Delimo jih na:

- mehove
- Bourdanove cevi
- opne in kapsule

Merjenje tlaka z **mehovi:**

Narejeni so iz tankostenskih kovinskih cevi, ki so globoko narebričene, kar omogoča relativno velik premik v obe smeri, do katerega pride pod vplivom tlaka ali pa dveh tlakov. Mehovi so narejeni iz nerjavečega jekla, medenine. Njihovo merilno področje seže od 1Kpa do 3Mpa.

Lastnosti:

- .-velika sila ki jo dobimo ob premiku vrha meha (skrčenje ali raztezanje)
- prilagodljivost na merjenje absolutnega ali diferencialnega tlaka
- zmerna cena
- občutljivost na udarce in treslaje
- izbor materialov iz katerih so narejeni je majhen

Merjenje tlaka z **Bourdanovimi cevmi:**

Tovrstne naprave so narejene v obliki tanke metalne cevi, ki je ukrivljena na različne načine. Njen presek je okrogel, največkrat pa eliptičen. Pod vplivom merjenega tlaka se oblika upognjenosti cevi sprameni in konec cevi se premakne. Ta premik je proporcionalen tlaku in ga zato merimo s primernim merilnikom premika, ki daje na izhodu električni signal. Bourdanove cevi so lahko izvedene v C, spiralni, vijaki obliki. Narejene so iz enakega materiala kot mehovi. Z njimi merimo tlake od 1KPa do 100MPa. Lastnosti:

- enostavna zgradba in visoka zanesljivost
- širok razpon merjenih tlakov
- cenenost
- dobra točnost glede na ceno
- odvisnost od temperature
- občutljivost na udarce in treslaje
 - slaba ponovljivost zaradi mehanske histereze

Merjenje tlaka z **opnami in kapsulami:**

Opne (membrane, diafragme) so fleksibilni diski s koncentričnimi gubami. Njihov upogib je proporcionalen tlaku, ki deluje nanje. S povečanjem števila in zmanjšanjem globine gub se poveča občutljivost (maksimalna pri popolnoma gladki opni), vendar pa s tem pokvarimo linearnost. Glede na zahteve moramo najti nek kompromis. Narejene so iz podobnih materialov kot mehovi in Bourdanove cevi, so pa tudi iz gume, najlona, teflona... Tudi upogib opne je

odvisen od mnogih faktorjev kot so: premer, debelina materiala, število gub, oblika nagubanosti, modul elastičnosti in seveda tlak. Uporaba open je primerna za merjenje tlaka kapljev, saj istočasno preprečuje izliv kapljevine v merilnik

Kapsula sestoji iz dveh kovinskih open, ki sta na robovih zvarjeni skupaj. Navadno povežemo dve ali več kapsul tako, da je skupni premik, ki je posledica delovanja tlaka, enak vsoti premikov posameznih kapsul in je zato večji. Taki merilniki se v glavnem uporabljajo za merjenje absolutnega tlaka.

Lastnosti open in kapsul:

Zmerne cene, majhne dimenzije, možnost merjenja absolutnega in diferencialnega tlaka, izvedbe materialov, ki so odporni proti koroziji, slaba odpornost proti udarcem in treslajem
ELEKTRIČNI PRINCIPI MERJENJA TLAKA:

Merjenje tlaka s pomočjo vibrirajoče žice:

Žica niha s frekvenco odvisno od napetosti žice, ki se stlakom spreminja.

Merjenje tlaka s pomočjo uporovnih lističev:

Uporovni lističi se pojavljajo kot merilniki premika v mnogih izvedbah merilnikov tlaka. Ena od njih se imenuje merilnik z upogljivo ploščo. Področje meritev je od 20KPA do 250MPA.

Merjenje tlaka s pomočjo piezoelektričnega efekta:

V tem primeru se kot piezoelektrični material uporablja turmalin, ki pod vplivom tlaka proizvaja napetost. Napetost je linearno odvisna od tlaka. Merilnik je sestavljen iz štirih turmalinskih diskov (T), ki so prevlečeni na stičnih ploščah s prevodnim materialom. Na vsaki strani železne plošče sta po dva diska. Med njima in na zunanji strani pa so elektrode v obliki aluminijaste folije. Merilno območje je do 150MPA. Tovrstne naprave niso primerne za merjenje konstantnega ali počasi premikajočega tlaka, saj piezoelektrična napetost s časom upada.

Merjenje tlaka na osnovi spremembe upornosti:

Nekateri materiali pod vplivom tlaka spreminjajo upornost, pri čemer je dosežena ustrezna linearnost in občutljivost. Fina žica iz manganija je zvita v spiralo in zaprta v primeren oklop. Celotna upornost žice je 100ohm, spremembe pa zaznamo s pomočjo primerne mostične vezave. Tovrstne merilnike uporabljajo za merjenje najvišjih tlakov. (od 100MPa pa navzgor) in so tudi natančni. Pri merjenju stalnih tlakov dosežejo do nekaj Gpa.

- **MERJENJE ZELO NIZKIH TLAKOV:**

Za merjenje tlakov pod 1 Pa uporabljamo v glavnem dva principa:

-merjenje na osnovi spremembe toplotne prevodnosti

-merjenje na osnovi ionizacije

Merjenje tlaka s Piranijevim merilnikom:

Merilnik deluje na osnovi povezave med izgubo toplote grete žice in tlaka plina, ki jo obkroža. Ker je izguba toplote odvisna tudi od zunanje temperature, izvedemo meritev upornosti s pomočjo mostične vezave, v katero vključimo dve popolnoma enaki merilni napravi. V eni posodi je greta žica, ki jo izpostavimo merjenemu tlaku. V drugi pa je enaka žica, vendar pa je ta posoda hermetično zaprta. Meritev se začne s kompenzacijo temperature okolice. Zato izčrpamo plin tudi iz merilne buče in obe izpostavimo vplivu okoliške temperature. S pomočjo upora R2 uravnotežimo mostič na nično pozicijo. Nato pa v merilni buči vzpostavimo merjeni tlak in odklon mostiča iz ravnotežne lege je soracionalen merjenemu tlaku. Piranijev merilnik tlaka je enostaven in ima zelo hiter odziv.

Ionizacijski merilnik tlaka:

Greta katoda emitira elektrone, ki jih pospešuje pozitivna mrežca. Pri premikanju elektroni trkajo z molekulami plina in povzročajo ionizacijo. Plošča je na neg potencialu in pozitivni ioni

se nabirajo na njen in povzročajo tok i_p . Negativni ioni in elektroni pa se zbirajo na mrežici in povzročajo tok i_m . Tlak plina je sorprocionalen razmerju obeh tokov. Pri višjih tlakih je nevarnost da pregori katoda. Običajno področje ionizacijskega merilnika je od $0,1$ do 10^{-6} Pa.

Alfatron:

Radioaktivni ionizacijski merilnik se imenuje alfatron.

Majhen vir α žarkov povzroča ionizacijo plina. Prednost tovrstnih merilnikov je izredno široko merilno območje, saj tudi pri atmosferskih tlakih ni nevarnosti da bi pregorela katoda. Vendar pa ne moremo meriti tako nizkih tlakov kot s specialnimi ionizacijskimi merilniki.

MERJENJE TEMPERATURE:

PALIČASTI RAZTEZNI TERMOMETER:

Merilnik je zgrajen iz kovinske cevi, ki ima v notranjosti palico, katera je s cevjo čvrsto povezana. Cev predstavlja del merilnika, ki pride v neposreden kontakt z medijem, katerega temperaturo merimo in je iz materiala z velikim koeficientom temperaturnega raztezka (navadno iz ustrezne kovine). Nasprotno pa je palica iz materiala s čim manjšim koeficientom temperaturnega raztezka (porcelan, kvarc). Tako ob spremembi temperature pride do premika palice, ki ga merimo in je odvisen od temperature. Tovrstni merilnik ima široko merilno območje ($0-1000$ C) vendar pa je precej nenatančen. Premiki ki jih moramo meriti so majhni (μm).

Električni merilniki temperature:

- termočleni
- uporovni merilniki
- termistorji
- polprevodniški merilniki
- merilniki s kvarčnim kristalom

TERMOČLEN:

So zelo razširjeni. Delujejo na osnovi termoelektričnega učinka. Vzamemo dve žici iz različnih materialov in ju na koncu zvarimo, pri čemer sta oba zvara na različnih temperaturah, začne teči po tokokrogu termoelektrični tok. Če žici ustrezno izbranih materialov zvarimo le na enem koncu in zvar izpostavimo merjeni temperaturi, se bo med prostima koncema žice pojavila termoelektrična napetost, odvisna od temperaturne razlike med obema koncema elementa. Tak element imenujemo termočlen. Pri delu s termočleni upoštevamo tri osnovne zakone:

- na termoelektrično napetost, ki jo daje termočlen, kateri ima konca na temperaturah T (merjena temperatura) in T_R (referenčna temperatura), ne vpliva nobena toplota, ki se pojavi na kateremkoli mestu v tokokrogu.
- Vsota termoelektričnih napetosti v tokokrogu, ki sestoji iz poljubnega števila kovin, je enaka nič, če je celoten tokokrog izpostavljen enaki temperaturi. Zakon vmesne kovine ($U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$) A, B, C pomenijo spoje različnih kovin.
- Termoelektrična napetost, ki je posledica temperatur T_1 in T_3 (na katerih so konci termočlena) je enaka vsoti napetosti tega para, ko sta temperaturi T_1 in T_2 ter T_2 in T_3 (zakon vmesne temperature)

UPOROVNI MERILNIK TEMPERATURE:

Imenujemo jih tudi uporovni temperaturni detektorji. Izdelujejo jih v glavnem na dva načina. Kovinsko žico navijejo na stekleno ali keramično palico in nato zataljijo v steklo, kar po eni strani omogoča delovanje elementa tudi v primeru močnih vibracij, po drugi strani pa preprečuje raztezanje platinske žice pod vplivom visokih temperatur.

Novejša konstrukcija uporovnih termometrov pa uporablja metalni film, ki ga nanesejo na majhno keramično ploščico in naqto vse skupaj zatalijo. So majhni, poceni, hiter odzivni čas in velika sprememba upornosti za dane dimenzije. Če jih lahko uporabljamo brez oklopa je njihov odziv na spremembo temperature hiter, z oklopom pa se ta čas podalša. Oklop tudi močno poveča fizične dimenzije. Upornosti tovrstnih merilnikov grede od 10 do 25 Kohm za izvedbe z metalnim filmom. Najbolj tipična je upornost 100ohm pri 0 C (zato oznaka Pt-100).
TERMISTORJI:

Termistor je majhen kos keramičnega materiala, ki ga dobimo s sintranjem mešanic oksidov, sulfidov, ali selenidov kovin kot so : krom, kobalt, nikelj, magnezij, železo... Lahko je v obliki zrnca, tabletko ali valjčka. Navadno so zaliti v steklo, vloženi v stekleno cevko ali pa so zaščiteni lakom ali epoksidno smolo. Padanje upornosti termistorju opisuje naslednja enačba

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$
 kjer je R_0 upornost pri referenčni temperaturi T_0 , β pa je eksperimentalno

določena konstanta. Termistorji so majhni, robustni in relativno poceni. Njihov odziv je zelo hiter. Uporabljamo jih lahko v povezavi z enosmernimi in izmeničnimi napetostmi. So izredno občutljivi.

PIROMETER:

-Optični: So široko uporabni na območju od 600 C pa do najvišjih temperatur. Meritev temelji na primerjavi svetlobe referenčnega vira, ki ga predstavlja žarnica z volframovo nitko in svetlobo merjenega telesa. Pri tem svetlobo referenčnega vira reguliramo s tokom preko nitke s čimer je določena tudi Tž. Tako s pomočjo objektiva zberemo žarke iz merjenega telesa na žarnici. Skozi okular in rdeči filter pa opazujemo žarnico in prilagajamo Tž toliko časa da pride do $T = Tž$.

Sevalni: Tovrstni inštrumenti merijo temperaturo merjenega objekta na osnovi celotnega sevanja vseh valovnih dolžin. Uporabljata se tako izvedba z lečo kot tudi izvedba z ogledalom.

Energijo gretega telesa z lečo ali ogledalom zberemo v točko, kjer je nameščeno tipalo za temperaturo (termočlen, uporovni termometer, termistor), ki meri spremembo črnega telesa ali pa fotodetektor. Sevalni pirometri imajo zelo hiter odziv in dajejo električni izhodni signal zaradi česar so primerni za uporabo v regulacijski zanki so pa manj natančni od optičnih pirometrov.

Širokopasovni sevalni pirometri:

So najširše uporabljani v industriji na področju od 0 do 4000C. Temperaturo temnega platinskega diska merimo s termočleni. Temperatura narašča dokler se dovedena energija ne izenači s toplotnimi izgubami zaradi konvencije in sevanja. Za visoke temperature je odziv hiter za nizke pa moramo uporabiti več termočlenov kar čas odziva povečuje.

Ozkopasovni sevalni pirometri:

Pa uporabljajo fotodetektorje kot merilnike temperature. Pri tem fotoprevodni detektorji pod vplivom temperature spremenijo upornost, fotonapetostni pa napetost na sponkah. Reagirajo na ozko definiranih področjih valovnih dolžin, pri čemer je odvisnost njihovega izhoda od temperature zelo linearna. Delujejo navadno v režimu prekinjanja toka dovedene energije, kar daje izmenični izhodni signal. Sevana energija ki jo dobimo iz merjenega telesa je povezana s temperaturo preko Štefanovega zakona.

Kadar bi želeli sevano energijo prevesti okrog vogalov ali pa daleč od merjenca lahko uporabimo **pirometer z optičnimi kablji**.

MERJENJE VISKOZNOSTI:

Upornost, oziroma notranje trenje, ki zavira nemoteno pretakanje fluidov ob trdnih površinah imenujemo **viskoznost**.

LABORATORIJSKI KAPILARNI VISKOZKOZIMETER:

Predstavlja napravo, kjer iz posode na višini h ki vsebuje merjeno tekočino in zagotavlja konstantno tlačno razliko Δp , skozi kapilaro polmera r in dolžine l teče nek volumski pretok v posodo znanega volumna V . Tako z merjenjem časa pretakanja t lahko izračunamo viskoznost.

VISKOZIMETER Z VRTLJIVIM VALJEM:

V regulacijske namene se največkrat uporabljajo **rotacijski viskozimetri**, ki jih imenujemo tudi **viskozimetri z vrtljivim valjem** (ali vretenom). So sicer manj natančni od kapilarnih, vendar pa dajejo zvezno informacijo o spremembah viskoznosti. Merilnik sestavlja zunanji valj, ki se vrti s konstantno hitrostjo in vreteno, ki na torzijski niti visi v valj. Med valjem in vretenom je ozka reža, ki je napoljena z merjeno tekočino. Ob vrtenju valja tekočina teži obrniti tudi vreteno, katerega vrtilni moment merimo s torzijsko nitko in je proporcionalen viskoznosti. Zaradi vplivov temperature je naprava običajno v ustreznem ohišju, ki zagotavlja stalno temperaturo.

KAPILARNI PLINSKI VISKOZIMETER:

Za laboratorijske meritve viskoznosti plinov je najprimernejša izvedenka kapilarne metode, ki se imenuje **kapilarni plinski viskozimeter**. Merilno napravo sestavljata kapilarna in nekoliko debelejša cevka, združeni v zanko. Med padanjem kroglica iz živega srebra potiska plin skozi kapilaro, s čimer postane hitrost padanja linearno odvisna od viskoznosti plina.

PLINSKI VISKOZIMETER:

Predstavlja različico tekočinskega. V tem primeru zaradi majhne viskoznosti plinov merilnik prilagodimo tako, da osnovnemu valju in vretenu dodamo še eč koaksialno vpetih valjev in vreten. Tako kljub majhni viskoznosti dobimo ustrezen vrtilni moment.

MERJENJE VLAŽNOSTI PLINOV:

-higroskopske metode izkoriščajo dejstvo, da nekatere snovi, ko se navlažijo z vodo iz plina, ki jih obdaja, spremenijo nekatere fizikalne lastnosti (fizične dimenzije, električna prevodnost, dielektričnost):

MEHANSKI HIDROMETER:

Izkorišča linearno raztezanje in krčenje higroskopskih materialov, kot so človeške, živalske dlake, les, živalske membrane, papir... Običajno higrometri vsebujejo sveženj človeških las ki ga rahlo napenja ustrezna vzmet, na drugi strani pa je fiksno pritrjen. Spremembo dimenzij merimo z ustreznim merilnikom. Odziv mehanskih hidrometrov je zelo počasen. Reda nekaj minut.

Poznamo še **uporovne** in **kapacitivne** hidrometre.

- psihometrična metoda merjenja vlažnosti plinov temelji na merjenju temperaturne razlike suhega in vlažnega termometra pri konstantnem zračnem toku.

PSIHROMETER: (za merjenje vlažnosti plinov)

Merjenje vlažnosti plinov temelji na merjenju temperaturne razlike suhega in vlažnega termometra pri konstantnem zračnem toku. Izhlapevanje vode iz tekstilne obloge vlažnega termometra le taga ohladi na določeno temperaturo T_v ki je nižja od temperature suhega termometra T_s . Z uporabo ustreznih psihometričnih diagramov lahko iz razlike $T_v - T_s$ odčitamo absolutno in relativno vlažnost ter temperaturo rosišča. Pri tem moramo paziti da merjeni vlažni plin z dovolj veliko konstantno hitrostjo (5 m/s) vpihavamo na merilno mesto in da je vlaženje tekstilne obloge vlažnega termometra ravno pravišnje (temperatura tekočine za vlaženje mora biti enaka temperaturi suhega termometra) saj sicer pride do napake v ustaljenem stanju. Laboratorijski psihometri uporabljajo živosrebrne termometre, medtem, ko v industrijskih izvedbah najdemo kot merilnike omenjene temperaturne razlike termočlene ali pa termistorje, nameščene v primerni cevi v katero vpihujemo plin.

OPERACIJSKI OJAČEVALNIK:

Praktično vse številne izvedbe predojačevalnikov, ki opravljajo najrazličnejše naloge, temeljijo na **operacijskem ojačevalniku**. Ime je dobil ravno zaradi svoje vsestranske uporabnosti, ki je posledica številnih dobrih lastnosti. Gre za integrirno vezje, ki že vsebuje tako temperaturno kot frekvenčno kompenzacijo in katerega funkcijo določajo enostavni pasivni elektronski elementi. Operacijske ojačevalnike je možno direktno zaporedno vezati brez vmesnih prilagoditvenih vezij. Običajno ima dva vhoda (oznaka + pomeni, da posreduje na izhod neinvertirni vhodni signal, oznaka – pa pomeni invertirani vhodni signal na izhodu) in en izhod. Najvažnejša lastnost operacijskega ojačevalnika je **ojačanje**, ki naj bi bilo čimvečje (običajno razmerje izhodne napetosti proti vhodni je 10^6 do 10^8). Ker gre navadno za izhodno napetost 10V so glede na omenjena ojačanja vhodne napetosti v razredu μV .

Druga značilnost operacijskega ojačevalnika je **visoka vhodna upornost** (več $M\Omega$), kar povzroči, da v ojačevalnik teče zanemarljiv vhodni tok. To pomeni da je potencial vhoda navidezno na 0V glede na ozemljitev. Kar ima za posledico, da to točko imenujemo **navidezna masa**. Operacijski ojač. naj bi imel tudi **čimvečjo pasovno širino**, kar pomeni da na nekem predpisnem frekvenčnem področju obdrži enako ojačanje ne glede na frekvenco. **Izhodna upornost** oper. ojač. naj bo **čimnižja** (manj kot 100Ω), da se izhodna upornost z obremenitvijo ne bi spreminjala, dokler izhodni tok ne preseže omejitev. Želeli bi tudi, da bi 0V na vhodu oper. ojač. povzročilo tudi 0V na izhodu.

Relacija med vhodom in izhodom ojačevalnika:

$$U_{IZH} = - \left(\frac{Z_{pz}}{Z_{vh}} \right) U_{VH} \quad \text{pri čemer sta } Z_{vh} \text{ in } Z_{pz} \text{ impedanci na vhodu in v povratni zanki na}$$

negativni vhod. Če pri operacijskem ojačevalniku uporabimo oba vhoda, deluje kot diferencialni ojačevalnik, pri čemer naj bi bil njihov izhod odvisen le od razlike vhodnih signalov.

Ob že naštetih možnostih uporabe, lahko operacijski ojačevalnik uporabimo še kot: ločilni ojačevalnik, impedančno prilagoditev, filter, primerjalnik, generator signalov (pravokotni, žaga, sinus), omejevalnik, napetostno-tokovni referenčni vir, tokovno napetostni prevornik, usmernik, modulator, vzorčevalnik, detektor prehoda preko ničle...

PNEVMATSKI TER HIDRAVLICNI OJAČEVALNIKI IN KONČNI IZVRŠNI ČLENI:

Ojačevalnike s fluidi delimo na :

- Ojačevalnike s tekočinami (navadno uporabljajo hidravlično olje):
 - curkovna cev
 - sklop šoba-zaslon
 - batni ojačevalnik
- Ojačevalnike s plini (pnevmatski)
 - curkovna cev
 - sklop šoba-zaslon
 - Coanda ojačevalnik

CURKOVNA CEV:

Tovrstni ojačevalniki imajo univerzalne možnosti uporabe in so dosegljivi v hidravličnih kot tudi v pnevmatskih izvedbah. Sestavljeni so iz premične cevi s šobo, iz katerebrizgamo hidravlično tekočino (ali plin) pod visokim tlakom v odprtini dveh vodov proti bremenu. Ko je cev v ničnem položaju, bo tlak v obeh izhodnih vodih enak, če pa se cev pod vplivom vhodnega izmakne iz centralne lege, bo tlak v enem odvodu padal, v drugem pa naraščal. Če

je breme bat se bo ta gibal v skladu z vhodnim premikom. Sistem deluje praktično brez trenja in ga uporabljamo kot predojačevalnik pri večstopenjskih ojačevalnikih.

KONČNI IZVRŠNI ČLENI:

Hidravlični ali **pnevmatski** motorji predstavljajo naprave, ki ravno obrnejo delovanje nekaterih črpalk, kompresorjev. Pogonsko sredstvo je torej fluid.

- Pnevmatski motorji:

V glavnem ločimo batne in membranske izvedbe.

VENTILI:

Delimo jih na **električne** in **procesne**.

Električne uporabljamo za regulacijo el. toka ali moči v enosmernih ali izmeničnih razmerah.

Procesne delimo na zaporne (ON/OFF) in regulacijske.

Zaporni (on/off) ventil naj bi v danem trenutku popolnoma zaprl cev (če to zahteva proces, npr. v primeru remonta). V normalnem delovanju pa je zaporni ventil največkrat popolnoma odprt in je v zapori le v relativno kratkih časovni intervalih.

Najvažnejši so zvezni regulacijski ventili, s katerimi uravnavamo masne oz. prostorninske pretoke fluidov (plinov, par, kapljevina, sipkih materialov). Ventil predstavlja upor proti pretoku Φ ki je odvisen od prereza odprtja ventila (A).

MONTAŽA VENTILOV:

Ventile vgrajujemo v cevovod s pomočjo navojev, ki so na ohišju, največkrat pa s pomočjo prirobnic. Ventili morajo biti na takih mestih, da so lahko dosegljivi in jih lahko demontiramo ali pa samo izvlečemo nekatere dele, ne da bi se dotikali ohišja ventila vstavljenega v cev.

KARAKTERISTIKE VENTILOV:

Karakteristika ventilov je relacija med spremembo odprtosti ventila in spremembo pretoka skozi ventil. Največ uporabljane so linearna, enakoprocentualna in zaporna karakteristika.

- **Zaporna:** Zaporni ali hitro odpirajoči ventil uporabljamo v glavnem za ON/OFF regulacijo. Ima raven čep in do polne odprtosti pride že po 30% hoda ventila. Tovrstne ventile uporabljajo predvsem pri gretju, ventilaciji, itd.
- **Linearna:** Za ventile z linearno karakteristiko je značilno, da pri konstantnem padcu tlaka na ventilu sprememba lege čepa h povzroči enako spremembo pretoka

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{h}{h_{\max}}$$

Ti ventili imajo čep z izrezom V. Primerni so naprimer pri proporcionalni regulaciji pretoka pare itd.

- **Enakoprocentualna:** Pri ventilih z enakoprocentualno karakteristiko pa enaka procentualna sprememba lege čepa povzroči enako spremembo pretoka. V splošnem ta tip ventila v svojem celotnem hodu ne zapre popolnoma ventila. To ponazorimo z rangirnim faktorjem

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \quad \text{in relacijo} \quad \Phi = \Phi_{\min} \cdot R^{\frac{h}{h_{\max}}}$$

Oblika čepa pri teh ventilih je taka da se pretok menja kot kvadratni koren hoda čepa. Take ventile uporabljamo npr. pri ogrevanju z vrelo vodo. Poznamo še korenske in hiperbolične karakteristike...

MEHURČKI IN KAVITACIJA:

Zaradi padca tlaka na ventilu (ožji prerez cevi-večja hitrost pretoka-padec tlaka), ki je večji od vparjalnega tlaka tekočine, se v njej pojavijo mehurčki. Če je na izhodu iz ventila tlak še vedno pod vparjalnim, bodo mehurčki še vedno ostali v tekočini, če pa se tlak dvigne nad vparjalnega, pride do hitre reabsorbcije mehurčkov, ki jo imenujemo **kavitacija**. Veliko število majhnih mehurčkov, ki pri reabsorbciji povzročijo majhne implozije, sprošča energijo, katera se kaže v obliki šuma pa tudi v obliki resnih fizičnih poškodb ventila. Površine poškodovane od kavitacije izgledajo grobe in ožgane, dočim mehurčki le rahlo poškodujejo ventil. Šum in obraba pa nista najpoembnejše posledice kavitacije. Važnejše je dejstvo, da pojava mehurčkov zmanjša maso tekočine, ki gre skozi ventil. Kavitacija duši pretok skozi ventil. Pri določenih pogojih tako pride do situacije, ko pretok ne more več naraščati, čeprav padec tlaka še vedno narašča. To je zelo pomembno dejstvo, ki ga moramo upoštevati pri dimenzioniranju ventilov.

POZICIONERJI PRI PNEVMATIČNIH VENTILIH:

Pri regulacijskih ventilih, ki uporabljajo pnevmatske aktuatorje uporabljamo takoimenovane **pozicionerje**.

Ventilski pozicioner je v bistvu zaprtozančni regulator pozicije vodilain s tem čepa ventila. Za to potrebujemo pnevmatični diferencialni ojačevalnik tipa šoba-zaslon, ki krmili pnevmatski rele, ta pa aktuator. Dodatek le teh prinaša naslednje prednosti

-zmanjša odzivni čas ventila

-izboljša linearnost med premikom vodila in regulirnim signalom

Ločimo dve vrsti pozicionerjev:

- z odjemom položaja
- z odjemom sile

Na zaslon deluje vhodni (regulirni) signal ,ki ga v primeru ponevmatičnega standarda vnašamo z mehomo (ali kapsulo), v primeru enosmernega električnega standardnega regulirnega signala pa s primernim motorjem. Pravtako deluje na zaslon povratozančni signal, ki ga z vodila ventila odjemamo direktno z ustreznimi povezavami ali preko vzmeti. Ko dosežemo ravnotežje zaslona (vhodni signal enak premiku vodila) je ventil pozicioniran. Tako lahko vedno dosežemo zahtevani položaj ne glede na zunanje faktorje , ki vplivajo na vodilo.