

KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET U SPLITU
SVEUČILIŠTA U SPLITU

ZAVOD ZA KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Ratimir Žanetić
Renato Stipišić

MJERNI PRETVORNICI U PROCESNOJ INDUSTRIJI

(Skripta za internu upotrebu)

Split, 2005.

PREDGOVOR

Skripta "Mjerni pretvornici u procesnoj industriji" predstavlja prikaz načela djelovanja mjernih pretvornika tlaka, temperature, protoka i razine, te njihove opće značajke, koje se odnose na statičke i dinamičke karakteristike.

Djelovanja mjernih pretvornika su dio gradiva koji se obrađuje u okviru seminara i vježbi na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu. Za dobro savladavanje izloženog sadržaja o načelima djelovanja mjernih pretvornika potrebno je dobro znanje fizike i tehnoloških operacija kemijske industrije, te osnovna naobrazba iz strojarstva i elektrotehnike. Prikaz tih načela i izvedbu mjernih pretvornika obradio je stručni suradnik Renato Stipišić, dipl. ing., koji je vodio seminar i vježbe u okviru predmeta "Mjerenje i vođenje procesa" i "Mjerna i regulacijska tehnika".

Zahvaljujemo se recenzentima prof. dr. sc. Editi Mitrović-Kessler i prof. dr. sc. Nenadu Kuzmanić koji su pregledali rukopis i čije smo savjete i primjedbe sa zadovoljstvom prihvatili.

Prof. dr. sc. Ratimir Žanetić

SADRŽAJ

1. MJERENJE I KARAKTERISTIKE MJERNIH PRETVORNIKA	1
1.1. Što je mjerenje?	1
1.2. Karakteristike mjernih pretvornika	2
1.2.1. Statičke karakteristike	2
1.2.1.1. Određivanje statičke karakteristike živinog staklenog termometra	2
1.2.2. Dinamičke karakteristike	3
1.2.2.1. Dinamički odziv mjernog pretvornika prvog reda	6
1.2.2.2. Dinamički odziv mjernog pretvornika drugog reda	7
1.2.2.3. Primjeri odziva	8
2. MJERENJE TLAKA	20
2.1. Jedinice tlaka	21
2.2. Mjerni pretvornici tlaka (manometri)	22
2.2.1. Kapljevinski manometri	22
2.2.1.1. Torricelliev barometar	24
2.2.1.2. U-manometar	26
2.2.1.3. U-manometar nesimetrične izvedbe	28
2.2.1.4. Manometar s čašicom	29
2.2.1.5. Manometar s priklonjenom cijevi	30
2.2.2. Manometri s krutim utezima	31
2.2.2.1. Prstenasti manometar	31
2.2.2.2. Zvonasti manometri	33
2.2.3. Manometarske kapljevine	34
2.2.4. Deformacijski manometri	35
2.2.4.1. Bourdonova cijev	36
2.2.4.2. Membranska osjetila tlaka	38
2.2.4.3. Mijeh	39
2.2.4.4. Pogreške mjerenja kod deformacijskih manometara	40
2.2.5. Mjerenje niskih tlakova (vakuum)	41
2.2.5.1. McLeodeov vakuummetar	42
2.2.5.2. Pretvornici vakuum s osjetilima na načelu toplinske vodljivosti	43
2.2.5.3. Ionizacijski pretvornici vakuum	44
3. MJERENJE TEMPERATURE	46
3.1. Dilatacijski mjerni pretvornici temperature	46
3.1.1. Kapljevinski termometar	48
3.1.2. Mehanički termometri	51
3.1.2.1. Štapni dilatacijski pretvornik	51

3.1.2.2. Bimetalni termometri	52
3.1.3. Tlačni termometri	54
3.1.3.1. Kapljevinski tlačni termometar	55
3.1.3.2. Parni tlačni termometar	56
3.1.3.3. Plinski tlačni termometar	57
3.2. Električni termometri	57
3.2.1. Termoparovi	57
3.2.2. Otpornički pretvornici temperature	64
3.2.2.1. Slog neuravnoteženog Wheatstoneova mosta	66
3.2.2.2. Spojni vodovi	68
3.2.2.3. Slog uravnoteženog Wheatstoneova mosta	69
3.3. Pirometri zračenja	70
3.4. Optički pirometri	72
3.5. Radijacijski pirometri	74
3.6. Pirometri boje	74
3.7. Indikatori temperature	74
3.8. Ostali mjerni pretvornici temperature	75
4. MJERENJE PROTJECANJA	76
4.1. Turbinski pretvornici protoka	76
4.2. Potisni pretvornici protoka	77
4.2.1. Stapni potisni pretvornik protoka	78
4.2.2. Potisni pretvornik protoka s titrajućom pločom (Nutirajuća pumpa)	78
4.2.3. Vrtivi potisni pretvornici protoka	80
4.3. Pretvornici protoka s osjetilima na osnovi svojstava tekućina	80
4.3.1. Toplinski pretvornici protoka	80
4.3.2. Elektromagnetski pretvornik protoka	82
4.4. Ionizacijski pretvornik protoka	83
4.5. Ultrazvučni pretvornik protoka	84
4.6. Osjetila brzine protjecanja	86
4.6.1. Pitotova cijev	86
4.6.2. Anemometar s vijkom	87
4.6.3. Otpornička osjetila brzine strujanja	87
5. MJERENJE RAZINE KAPLJEVINA, SIPINA I KRUTINA	88
5.1. Mjerni pretvornici razine kapljevina	88
5.1.1. Mjerenje razine pomoću plovka i ronila	88

5.1.2. Mjerenje razine kapljevine pomoću hidrostatičkog tlaka	89
5.1.3. Električni pretvornici razine	90
5.1.4. Ultrazvučni pretvornici razine	91
5.1.5. Radioaktivni pretvornici razine	91
5.1.6. Optički pretvornici razine	92
5.1.7. Mjerni pretvornici razine, sipina i krutina	93

1. MJERENJE I KARAKTERISTIKE MJERNIH PRETVORNIKA

1.1.Što je mjerenje?

Mjerenje je postupak kojim se ostvaruju informacije o fizičkoj ili kemijskoj prirodi promatranog procesa. Može služiti u svrhu: promatranja procesa, vođenja procesa ili eksperimentalne analize.

Mjerenje se izvodi **mjernim instrumentom**. Svaki mjerni instrument se u pravilu sastoji od: **osjetila, pretvornika i pokazivala**.

Osjetilo je tehnički element koji neposredno osjeća promjene u procesu i na svom izlazu daje odziv koji je analogan ulaznoj fizikalnoj veličini.

Pretvornik je tehnički element koji izlaznu veličinu osjetila pretvara u analognu fizikalnu veličinu prikladnu za prijenos ili dovod na pokazivalo. Energija što je daje pretvornik obično je mehanička ili električna, iskazana kao standardizirani signal (0.2 - 1 bar ili 4 - 20 mA).

Slog koji služi za osjećanje i pretvorbu naziva se općenito **mjerni pretvornik**.

Pokazivalo je tehnički element koji na neki način pokazuje vrijednost mjerene veličine.

Mjerni pretvornici, koji se najčešće pojavljuju u vođenju procesa su: mjerni pretvornici tlaka, temperature, protoka i razine. Njihovo vladanje je usko povezano s tipom mjerene veličine i osjetila koji se upotrebljavaju za odgovarajuće mjerenje.

Današnji mjerni instrumenti najčešće se izvode tako, da se mjerni signali neelektričnih veličina pretvaraju iz primarnih u sekundarne, a zatim se sekundarni pretvaraju u analogne električne signale. Električni signali se onda pretvaraju u standardizirane naponske ili strujne signale. Signali neelektričnih veličina mogu se pretvoriti i u standardizirane pneumatske ili hidraulične signale s pomoću odgovarajućih pretvornika signala.

Signal mjerene veličine se s izlaza mjernog pretvornika do pokazivala prenosi prijenosnim mjernim slogom. Oni mogu biti mehanički, pneumatski i hidraulični prijenosni vodovi, te električni vodovi.

1.2. Karakteristike mjernih pretvornika

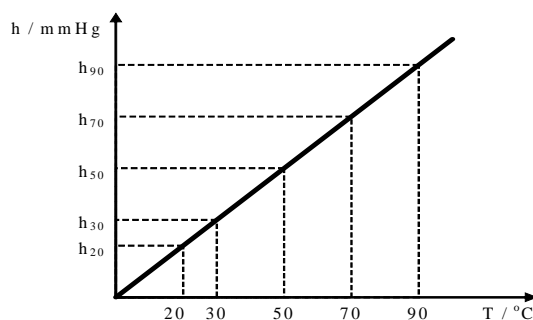
Obzirom na istraživanja zavisnosti izlaznih i ulaznih veličina razlikuju se **statičke** i **dinamičke** karakteristike mjernih pretvornika.

1.2.1. Statičke karakteristike

Statičke karakteristike su one koje se ne mijenjaju sa vremenom. Dobiju se izvođenjem statičke analize tako da se pobudi određena promjena vrijednosti ulazne veličine, a kad se sustav ustali određuje se nastala promjena izlazne veličine.

1.2.1.1. Određivanje statičke karakteristike živinog staklenog termometra

Termometar se drži na temperaturi okoline ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$), a zatim se uranja u četiri kupke u kojima se održava određena temperatura ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $90\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pri svakoj ovoj temperaturi stupac žive u kapilari termometra se ustali na nekoj vrijednosti (h_{30} , h_{50} , h_{70} , i h_{90}). Zavisnost stupca žive, h , o temperaturi predstavlja statičku karakteristiku živinog staklenog termometra.



Slika 1.1. Statička karakteristika živinog staklenog termometra

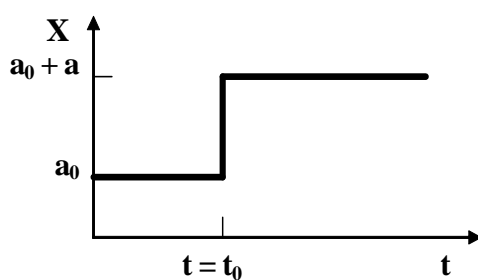
1.2.2. Dinamičke karakteristike

Dinamičke karakteristike se dobiju kao rezultat dinamičke analize, pri čemu se ispituju vremenske promjene izlaznih veličina prema vremenskim promjenama ulaznih veličina.

Pri dinamičkoj analizi izvede se različite **pobude**. Primjenjuju se tri osnovne vrsti pobuda (promjena): **prijelazne i periodične** koje spadaju u **determinirane**, te **slučajne** ili **stohastičke**.

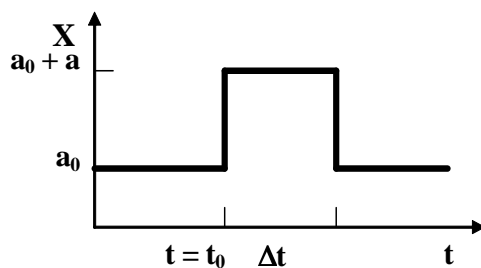
Prijelazne pobude su:

a. **skokomične** - ulazna vrijednost mijenja vrijednost skokomice, trenutačno,



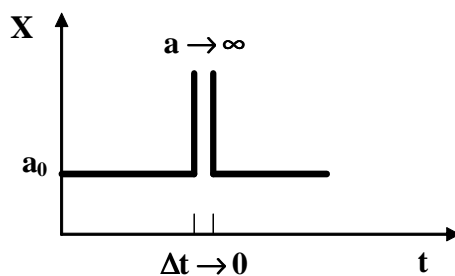
Slika 1.2. Skokomična pobuda

b. **impulsna** - ulazna veličina mijenja vrijednost skokomice, kratkotrajno zadržava tu vrijednost, te opet skokomice poprima početnu vrijednost. To su zapravo dvije uzastopne vremenski pomaknute skokomične pobude istih iznosa, a suprotnih djelovanja,



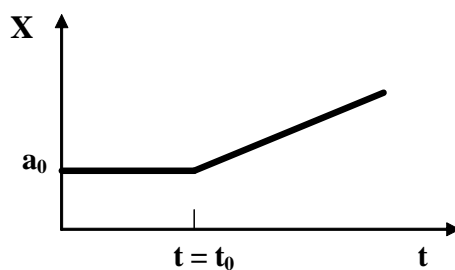
Slika 1.3. Impulsna pobuda

c. **δ pobuda (Dirack-ova pobuda)** - ulazna veličina poprima za trenutak beskonačno veliku vrijednost,



Slika 1.4. δ pobuda

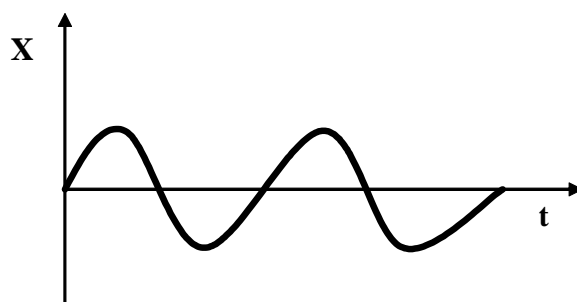
d. **uzlazna (linearna)** - ulazna veličina mijenja vrijednost postupno.



Slika 1.5. Linearna uzlazna pobuda

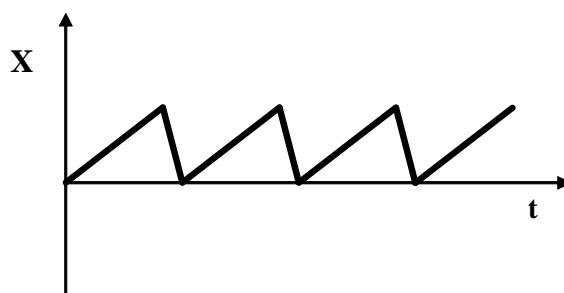
Periodične pobude se koriste pri određivanju dinamičkog vladanja u okolišu danog ustaljenog stanja, a mogu biti:

a. **sinusne** - ulazna veličina mijenja vrijednost u skladu sa sinusnom funkcijom,



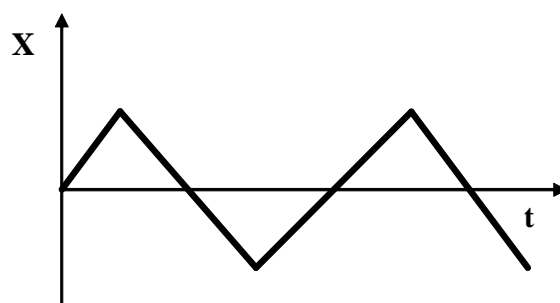
Slika 1.6. Sinusna pobuda

b. **pilasta** - ulazna veličina mijenja vrijednost jednolikom brzinom, dostiže danu vrijednost, te trenutačno pada na početnu vrijednost, ponovno mijenja vrijednost jednolikom brzinom itd.,



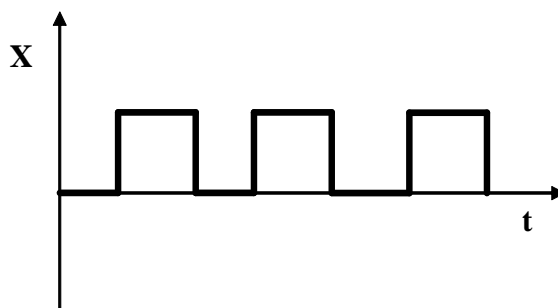
Slika 1.7. Pilasta pobuda

c. **trokutasta** - vrijednost ulazne veličine raste jednolikom brzinom, dostiže danu najveću vrijednost, te pada istom jednolikom brzinom, dostiže danu najnižu vrijednost, ponovno raste itd.,



Slika 1.8. Trokutasta pobuda

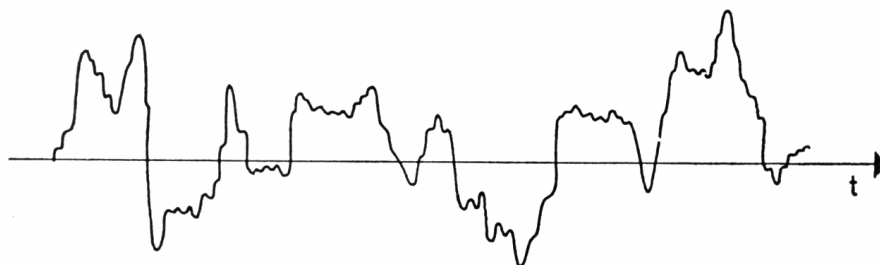
d. **pravokutna** - ulaznu veličinu čini slijed impulsnih pobuda.



Slika 1.9. Pravokutna pobuda

Ove periodične pobude djeluju kao val, te se može govoriti o sinusnom, trokutastom i pravokutnom valu.

Slučajne pobude predstavljaju takve promjene ulaznih veličina, kojima se ni u jednom trenutku vremena ne može predvidjeti način niti vrijednost promjene.



Slika 1.10. Slučajna pobuda

1.2.2.1. Dinamički odziv mjernog pretvornika prvog reda

Mjerni pretvornici čiji se dinamički opis može prikazati pomoću obične linearne diferencijalne jednadžbe I reda nazivaju se mjerni pretvornici I reda. Takva jednadžba ima oblik:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_o y = b_o x \quad (1.1)$$

Tom jednadžbom može se opisati vladanje staklenog kapljevinskog termometra.

Uobičajeno je da se jednadžba (1.1) podijeli s a_o i prikazuje u obliku:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (1.2)$$

gdje se $\tau = \frac{a_1}{a_o}$ naziva **vremenska konstanta**, a $K = \frac{b_o}{a_o}$ **statička osjetljivost**. Jednadžba

je linearna jer se nezavisna veličina y i njena derivacija pojavljuju kao članovi s prvom potencijom, obična jer ne sadrži parcijalne derivacije, a prvog reda zato jer je prva derivacija najviši red derivacije zavisne veličine obzirom na nezavisnu veličinu - vrijeme.

1.2.2.2. Dinamički odziv mjernog pretvornika drugog reda

Mjerni pretvornici čiji se dinamički opis može opisati linearnom diferencijalnom jednadžbom drugog reda nazivaju se mjerni pretvornici II reda. Takva jednadžba ima oblik:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_o y = b_o x \quad (1.3)$$

Takvom jednadžbom mogu se opisati mjerni pretvornici sa dodatnim zaostajanjem, u kojima su pojedini mehanički dijelovi ili tekućina izloženi ubrzanju. Primjer prve skupine predstavlja U - manometar, a druge stakleni kapljevinski termometri u zaštitnoj cijevi.

Jednadžba (1.3) se podijeli s a_o i prikazuje u ovom obliku:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (1.4)$$

gdje je:

$$K = \frac{b_0}{a_0} \quad - \text{statička osjetljivost,}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad - \text{neprigušena frekvencija prirodnog titranja,}$$

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} \quad - \text{koeficijent prigušenja,}$$

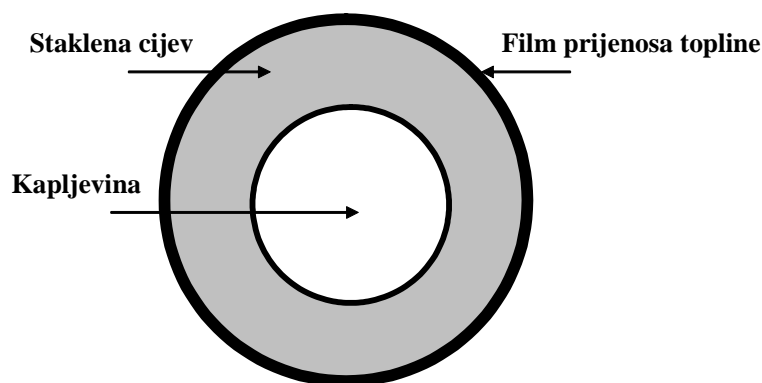
a_0, a_1, a_2 i b_0 - konstante karakteristične za određeni mjerni pretvornik.

1.2.2.3. Primjeri odziva

Smišljenom ulaznom promjenom pobuđuje se **odziv**, te se na temelju njega zaključuje o vladanju mjernog pretvornika, odnosno procesa ili sustava.

Primjer 1: Stakleni kapljevinski termometar

Vladanje stupca kapljevine u staklenom termometru u zavisnosti od mjerene temperature može se opisati diferencijalnom jednačbom prvog reda. Poprečni presjek termometra prikazan je na slici:



Slika 1.11. Poprečni presjek termometra

Termometar se sastoji od staklene cijevi i kapljevine u njoj. Oni zajedno predstavljaju toplinski kapacitet (C). Staklena cijev je okružena filmom fluida kojem se mjeri temperatura. Taj film prijenosa topline predstavlja toplinski otpor (R). Toplinski kapacitet i otpor su u seriji i predstavljaju toplinski ekvivalent.

Dinamički odziv jednog takvog mjernog pretvornika prvog reda na skok promjenu može se prikazati linearnom diferencijalnom jednačinom I reda:

$$\tau \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \Theta_F \quad (1.5)$$

gdje je:

Θ - temperatura koju pokazuje termometar

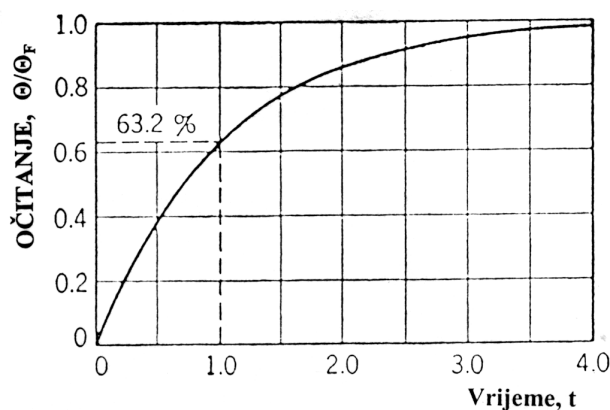
Θ_F - konačna ravnotežna vrijednost

τ - vremenska konstanta, koja je jednaka R.C sek ili min

Uz zadane početne uvjete kada na ulazu djeluje **jedinična skok promjena** jednačina (1.5) ima određeno rješenje

$$\frac{\Theta}{\Theta_F} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (1.6)$$

To rješenje ima jednostavni eksponencijalni odziv, koji se može prikazati slikom:



Slika 1.12. Odziv mjernog pretvornika prvog reda na skok promjenu

Dijagram je nacrtan u bezdimenzijskim odnosima, tako da promjena vremenske konstante τ mijenja vremensku skalu na osi apscisi. Opaža se, da kako vremenska konstanta τ postaje veća, odziv proporcionalno postaje sve sporiji. Vremenska konstanta τ predstavlja vrijeme koje je potrebno da se odigra 63,2 % ukupne promjene. Takvo zaostajanje mjernog pretvornika obično je specificirano za određeno vrijeme do postizanja 90 %, 95 % i 99 % ukupne promjene. Te specifikacije se lako mijenjaju za dobivenu vremensku konstantu τ , koristeći tablicu za e^{-x} , kako je prikazano u slijedećoj tablici:

Vrijeme	Postignuto, %
τ	63,2
2.303τ	90.0
2.996τ	95.0
4.605τ	99.0

Prema tome, zaostajanje mjernog pretvornika prvog reda je u ovisnosti o vremenskoj konstanti τ . To je zaostajanje za mjerne pretvornike specificirano dovoljno točno za potrebe industrijske instrumentacije. Dinamička pogreška koja slijedi skokovitu promjenu nije toliko značajna, kao kod linearne i sinusne promjene, budući da se mjerena veličina ne mijenja po tom obliku.

Dinamički odziv mjernog pretvornika prvog reda kod **linearne (uzlazne) promjene** prikazan je slijedećom jednačinom:

$$\tau \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = Kt \quad (1.7)$$

gdje je:

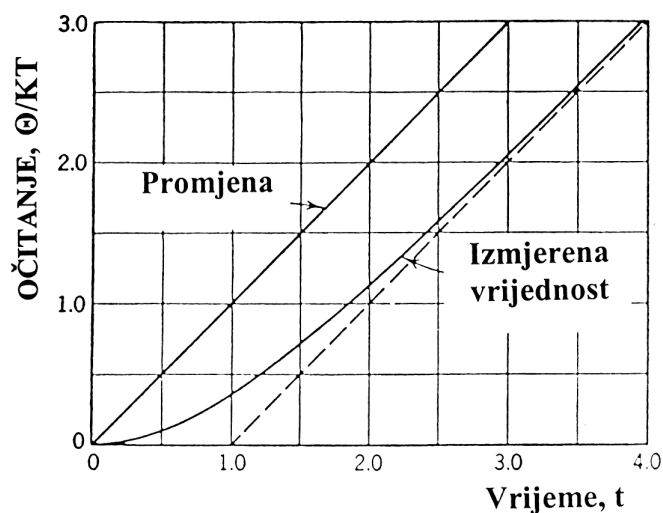
K - vrijednost promjene stvarne vrijednosti mjerene veličine

Kt - pokazuje da se mjerena veličina linearno mijenja s vremenom

Rješenje te jednačine za dane početne uvjete je:

$$\frac{\Theta}{K\tau} = \frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau} \quad (1.8)$$

a prikazano u bezdimenzijskom dijagramu ima slijedeći oblik:



Slika 1.13. Odziv mjernog pretvornika prvog reda na linearnu promjenu

Zaostajanje mjernog pretvornika je direktno zadano s vremenskom konstantom τ i ono neprekidno raste za ulaznom promjenom približavajući se asimptotski vrijednosti τ . Iz slike se vidi da očitavanje na instrumentu kasni za mjerenom veličinom za vrijeme koje je jednako vremenskoj konstanti.

Dinamički odziv sa sinusnom periodičnom promjenom zadan je slijedećom jednačinom:

$$\tau \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = A \sin \omega t \quad (1.9)$$

gdje je:

- Θ - vrijednost koju pokazuje instrument,
- t - vrijeme,
- A - amplituda periode mjerene veličine,
- ω - kutna frekvencija periode.

Rješenje sa danim početnim uvjetima nakon prijelaznog stanja je:

$$\frac{\Theta}{A} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t - \Phi) \quad (1.10)$$

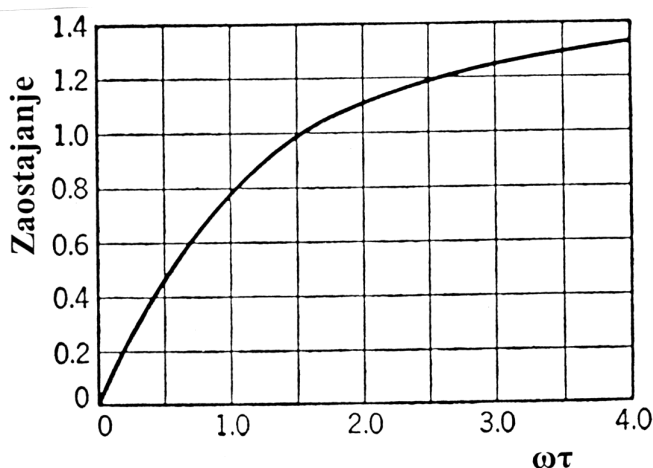
gdje je:

$\Phi = \arctg \omega\tau$, kut zaostajanja, za koji se po vremenu zbivanja razlikuju ulazna i izlazna veličina. Ova jednadžba pokazuje da mjerni pretvornik usporava mjerenu veličinu za kut Φ i da je odnos izlazne prema ulaznoj amplitudi jednak $1/\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$ i uvijek manji od jedinice.

Budući da jednadžba (1.10) daje nedostatnu informaciju, to se zaostajanje i dinamička pogreška u ovom slučaju posebno tretiraju. Tako se zaostajanje izražava u vremenskim jedinicama slijedećom jednadžbom:

$$\text{Zaostajanje} = \frac{1}{\omega} \arctg \omega\tau \quad (1.11)$$

i prikazuje s dijagramom (Slika 1.14.):

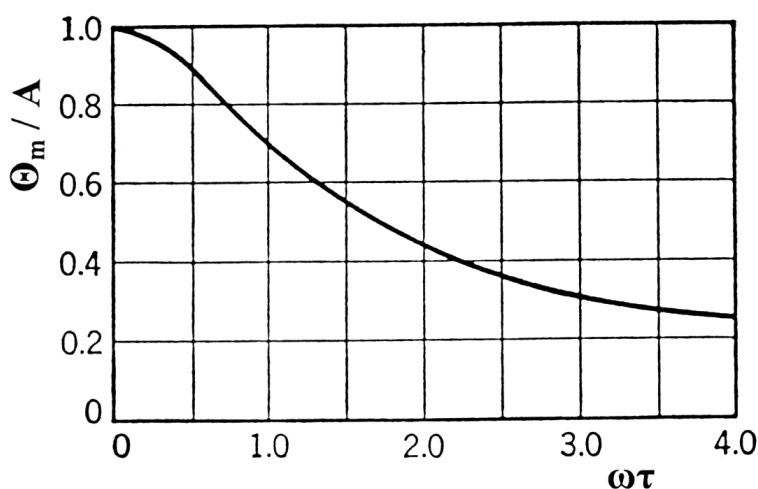


Slika 1.14. Zaostajanje mjernog pretvornika prvog reda prema sinusnoj promjeni

Omjer pokazne i stvarne amplitude dan je sljedećom jednačinom:

$$\frac{\Theta_m}{A} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1.12)$$

i može se prikazati sljedećim dijagramom (Slika 1.15.):

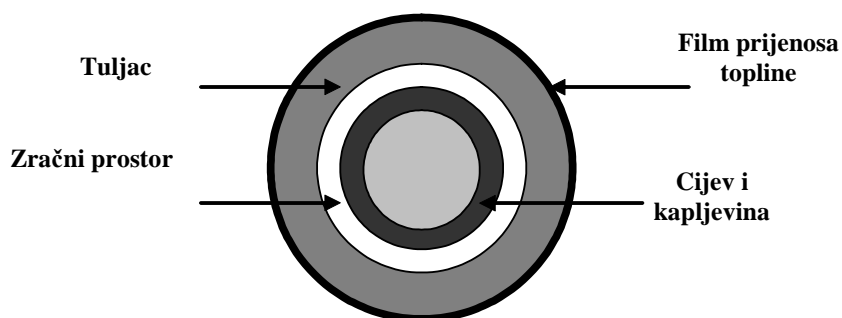


Slika 1.15. Amplitudna ovisnost mjernog pretvornika prvog reda na sinusnu promjenu

Taj amplitudno - frekvencijski odziv je manji od jedinice, što znači da izlazni signal slabi s vremenom. Kod $\omega\tau = 0$, $\frac{\Theta_m}{A} = 1$ i u tom slučaju ne postoji pogreška u očitavanju.

Primjer 2: Termometar u zaštitnoj cijevi (tuljcu)

Termometar u zaštitnoj cijevi (tuljcu) predstavlja primjer sustava drugog reda, čiji poprečni presjek izgleda kao što je prikazano (Slika 1.16):



Slika 1.16. Poprečni presjek termometra u zaštitnoj cijevi (tuljcu)

Zadržane su iste oznake kao u primjeru staklenog kapljevinskog termometra, pri čemu osjetilo predstavlja toplinski kapacitet C_2 , zračni prostor toplinski otpor R_2 , zaštitna cijev toplinski kapacitet C_1 , a film prijenosa topline toplinski otpor R_1 .

Dinamički odziv jednog takvog mjernog pretvornika s dva kapaciteta i 2 otpora na **skok promjenu** može se prikazati slijedećom jednačbom:

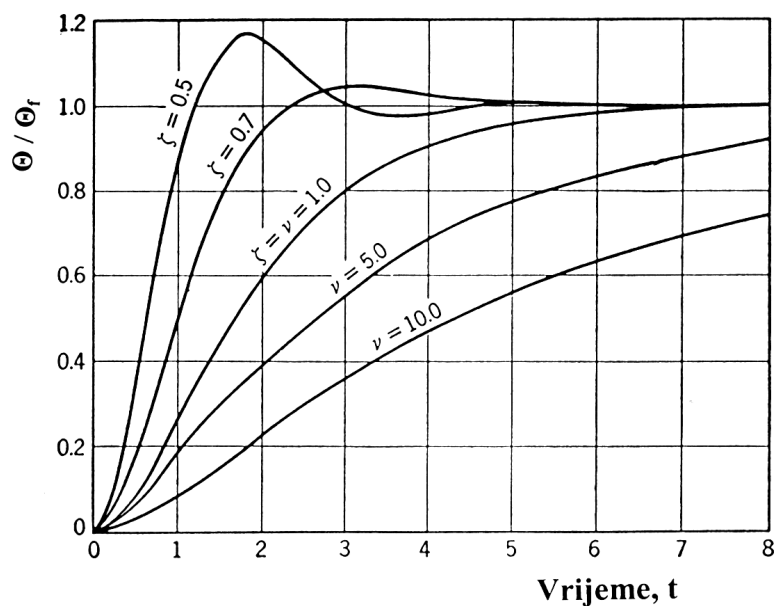
$$a_2 \frac{d^2\Theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\Theta}{dt} + a_0\Theta = b_0\Theta_F \quad (1.13)$$

gdje je:

Θ - vrijednost koju pokazuje instrument,

Θ_F - konačna ravnotežna vrijednost.

Odziv kod takvog mjernog pretvornika drugog reda na jediničnu skok promjenu može se prikazati slikom 1.17.:



Slika 1.17. Odziv mjernog pretvornika drugog reda na skok promjenu

Koeficijent prigušenja ζ uzet je kao parametar, a kao najpovoljnija vrijednost uzima se vrijednost $\zeta = 0.6 - 0.7$.

Ako je $\zeta < 0.7$ za mjerni pretvornik je karakteristično **nadprigušenje**, pri čemu izlazna vrijednost raste iznad konačnog postojanog stanja, prigušeno titra i smiruje se.

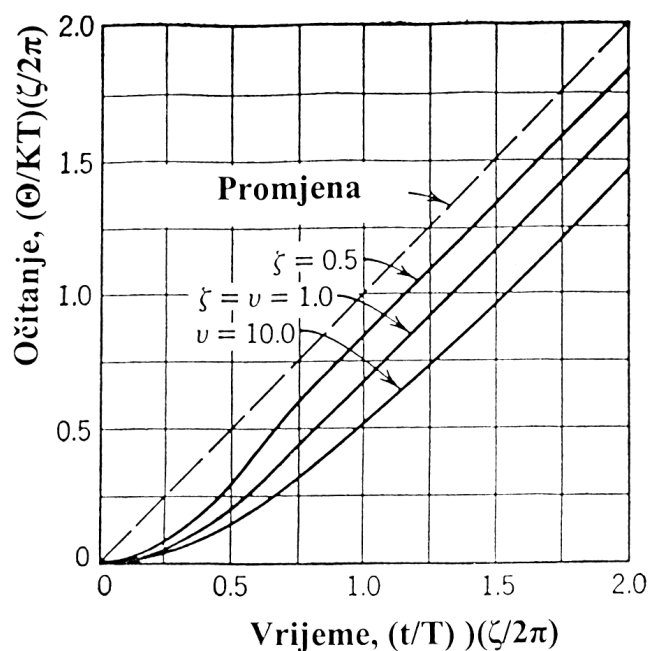
Ako je $\zeta > 0.7$ imamo **podprigušenje** pri čemu odziv dostiže konačnu postojanu vrijednost bez titranja i nadvišenja.

U slučaju $\zeta = 0.7$ imamo granični slučaj, odnosno **kritično prigušenje**.

Dinamički odziv mjernog pretvornika drugog reda na **linearnu (uzlaznu) promjenu** prikazuje se jednačbom:

$$a_2 \frac{d^2\Theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\Theta}{dt} + a_0\Theta = Kt \quad (1.14)$$

Rješenje te jednačbe može se prikazati u bezdimenzionalnom dijagramu (Slika 1.18.):



Slika 1.18. Odziv mjernog pretvornika drugog reda na linearnu promjenu

Izlazna veličina slijedi ulaznu sa zaostajanjem koje je jednako $\frac{2\zeta}{\omega_n}$.

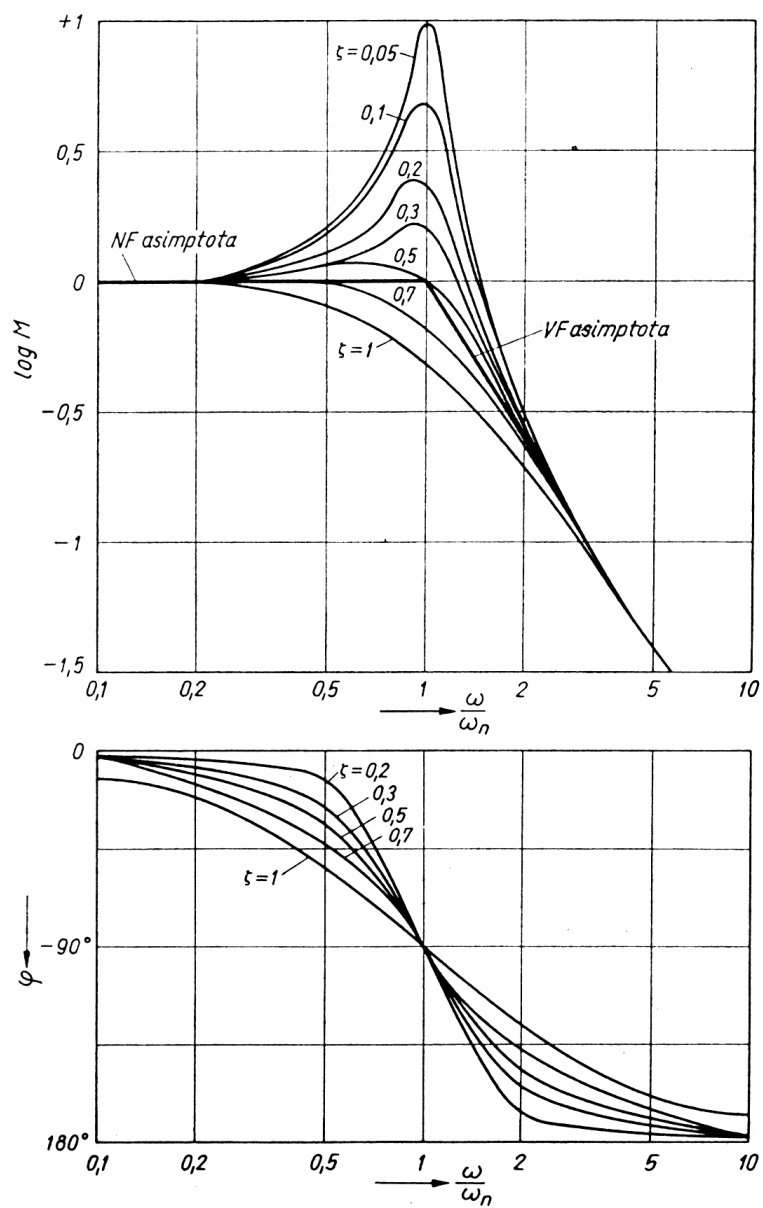
Dinamički odziv mjernog pretvornika na **sinusnu** promjenu može se prikazati jednadžbom:

$$a_2 \frac{d^2\Theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\Theta}{dt} + a_0\Theta = A \sin \omega t \quad (1.15)$$

gdje je:

- A - amplituda periode mjerene veličine,
- ω - kutna frekvencija periode.

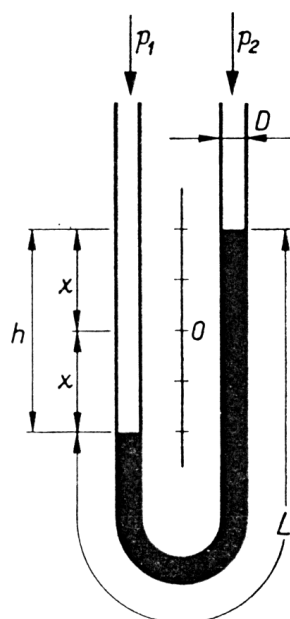
Rješenje se može prikazati omjerom amplituda pokazne i stvarne amplitude u Bode-ovom amplitudno-frekvencijskom dijagramu (Slika 1.19).



Slika 1.19. Frekvencijski odzivi procesa drugog reda

Primjer 3: U - manometar

Vladanje U - manometra predstavlja primjer sustava drugog reda. Slika 1.20 poslužit će za njegov opis.



Slika 1.20. U-manometar

Statički opis vladanja U - manometra može se prikazati jednačbom:

$$h = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} \quad (1.16)$$

koja pokazuje da visina stupca (h) zavisi o razlici tlakova, gustoće kapljevine (ρ) i ubrzanju sile teže (g). Opis ništa ne govori o tome kako će se sustav vladati pri promjenljivim tlakovima i kako će stupac slijediti te promjene. Do takvog opisa može se doći samo promatranjem dinamičkog vladanja sustava.

Pri dinamičkom promatranju uzima se da u U-manometru djeluju tlakovi $p_1(t)$ i $p_2(t)$ kao funkcije vremena, tako da je i visina stupca h vremenska funkcija $h(t)$. Ukoliko se još uzme u obzir i tromost kapljevine, zatim njeno trenje o stijenke cijevi, dinamički opis ravnoteže sila u U-manometru glasi:

$$p_2(t)A - p_1(t)A - F_g(t) - F_i(t) - F_r(t) = 0 \quad (1.17)$$

gdje su:

A - površina unutarnjeg presjeka cijevi manometra

$F_g = hAg\rho$ - težina stupca kapljevine visine $h = 2x$

$F_i = LA\rho \frac{d^2x}{dt^2}$ - tromost kapljevine (umnožak mase i ubrzanja)

$F_t = \frac{32\mu Lv}{D^2}$ - unutrašnje trenje kapljevine

ρ - gustoća kapljevine

μ - viskoznost kapljevine

D - promjer unutrašnjeg presjeka cijevi manometra

$v = A \frac{dx}{dt}$ - brzina gibanja obujma kapljevine

Uvrštavanjem u jednadžbu (1.17) dobije se konačni izraz za vladanje U - manometra:

$$\frac{p_2(t) - p_1(t)}{g\rho} = h(t) + \frac{16\mu L}{g\rho D^2} \frac{dh(t)}{dt} + \frac{L}{2g} \frac{d^2h(t)}{dt^2} \quad (1.18)$$

Iz opće jednadžbe II reda slijedi da je:

$$a_2 = \frac{L}{2g}, \quad a_1 = \frac{16\mu L}{g\rho D^2}, \quad a_0 = 1, \quad b_0 = \frac{1}{g\rho}$$

2. MJERENJE TLAKA

Razvoj mjerenja tlaka počeo je Torricellijevim eksperimentom 1643 god. kojim je pokazano da zemljin atmosferski omotač tlači površinu Zemlje tlakom koji odgovara približno 760 mm Hg stupca. Od toga se doba tehnika mjerenja tlaka usavršila se je toliko da se danas mogu bez teškoća i dovoljno točno mjeriti vrlo niski i neobično visoki tlakovi. Mjerna tehnika tlaka obuhvaća ogromno mjerno područje od oko 10^{-9} do 10^5 at. To se područje može pokriti samo brojnim izvedbama instrumenata, koji djeluju na različitim principima. Mjerila tlaka nazivamo **manometrima**.

Tlak nastaje djelovanjem jednoliko raspoređene sile na određenu površinu. Ta jednoliko raspoređena sila može biti posljedica gibanja molekula neke tekućine, izazvanog njenim toplinskim stanjem, ili pak težina okomitog stupca te tekućine jednoliko raspoređene po vodenoj podlozi.

Zračni omotač Zemlje djeluje svojom težinom na njenu površinu pa na taj način izaziva atmosferski tlak. Težina zračnog omotača iznosi oko 1 kp po svakom cm^2 zemljine površine što se izražava tlakom od 1 kp cm^{-2} (1 kp = 9.81 N). Međutim tlak ovisi o trenutnoj težini tako zamišljenog stupca zraka, koja je podložna mnogim utjecajima, pa se atmosferski tlak stalno i nepravilno mijenja. Nizom mjerenja utvrđen je njegov normalni iznos na površini mora pri temperaturi od 15 °C pa se za normalni atmosferski tlak uzima:

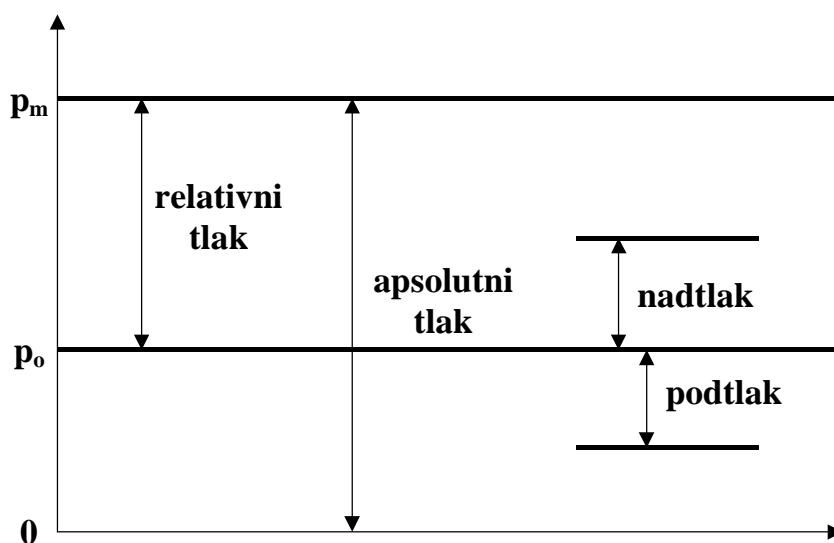
$$p_0 = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 1.03327 \text{ kp cm}^{-2} = 101325 \text{ Pa}$$

S obzirom na polaznu veličinu tlaka prilikom mjerenja postoji:

- **vakuum** - prazan prostor, koristi se i kao pojam za vrlo mali tlak sveden na najmanju ostvarljivu vrijednost,
- **apsolutni tlak** - tlak mjeren s obzirom na ništicu tj. vakuum,
- **relativni tlak** - tlak mjeren s obzirom na atmosferski tlak.

Razlika tlakova je bilo koja razlika tlakova mjerenih na dva mjesta u prostoru. S obzirom na razliku tlakova imamo:

- **nadtlak** - tlak veći od atmosferskog,
- **podtlak** - tlak manji od atmosferskog.



Slika 2.1. Grafički prikaz odnosa tlakova

Instrumenti za mjerenje tlaka mjere uvijek razliku tlakova ovisno o tome koja im je referentna vrijednost mjere apsolutni ili relativni tlak. Instrumenti predviđeni za mjerenje apsolutnog tlaka imaju prema tome u svom slogu vakuum ili neku drugu fizikalnu veličinu analognu vakuumu. Oni instrumenti koji mjere relativni tlak izloženi su djelovanju dvaju tlakova različitih od nule, od kojih je jedan obično atmosferski tlak. Pošto se atmosferski tlak tijekom vremena mijenja ne može se uzeti kao referentna vrijednost kod točnijih mjerenja bez posebne kompenzacije tih promjena.

2.1. Jedinice tlaka:

Osnovna jedinica za mjerenje tlaka je **Pascal**. 1 Pascal je definiran kao tlak kojeg proizvodi sila od 1 N kad jednoliko raspoređena djeluje na površinu od 1 m^2 .

Ostale jedinice tlaka:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at (tehnička atmosfera)} = 98066.5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm (fizikalna ili normalna atmosfera)} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$$

2.2. Mjerni pretvornici tlaka (manometri)

Mjerni pretvornici tlaka osjećaju promjene tlaka pomoću mehaničkih osjetila u kojima se na prikladan način uspostavlja ravnoteža sila i kao posljedica mjerljiv pomak ili deformacija. Tako su razvijeni različiti pretvornici tlaka, a svrstavaju se prema načinu osjećanja tlaka, pa zatim pomaka ili deformacije kao posljedice tlaka. Obično se pod pretvornicima tlaka ne podrazumijevaju i pretvornici vakuuma, koji spadaju u posebno područje.

2.2.1. Kapljevinski manometri

U ovu skupinu spadaju oni manometri koji sadrže kapljevinu. Stupac te kapljevine, određene visine i presjeka, djeluje kao kapljevinski uteg poznate težine. Za mjeru težine takvog utega uzima se obično njegova visina u kalibriranoj staklenoj cijevi. Težina toga utega, dakle sila, služi za usporedbu sa silom kojom mjereni tlak djeluje na određenu površinu. Tako se visina stupca kapljevine može smatrati mjerom tlaka u slogovima kapljevinskih manometara. Točnost mjerenja dakle ovisi o točnosti određivanja težina.

Težina je sila kojom tijelo djeluje na svoju podlogu. Ta sila nastaje uslijed privlačenja masa po zakonu:

$$F = K \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (2.1)$$

m_1 - masa Zemlje

m_2 - masa tijela na površini Zemlje

r - polumjer Zemlje

K - konstanta gravitacije ($6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

Ako se za masu tijela m_2 uzme 1 kg dobije se $F_1 = 9.81 \text{ kg m s}^{-2} = 9.81 \text{ N}$.

Ta je sila dakle određena umnoškom mase tijela od 1 kg i ubrzanja zemljine težine $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ pa općenito vrijedi za težinu:

$$G = F = m \cdot g \quad (2.2)$$

Dakle težina tijela je ovisna o prilično čvrstim konstantama pa se s dovoljno sigurnosti upotrebljava pri mjerenju. Treba napomenuti da ipak treba voditi računa da je ubrzanje zemljine teže (g) ovisno o mjestu mjerenja, točnije o geografskoj širini (najmanje na ekvatoru 9.78 m s^{-2} , a najveće na polovima 9.83 m s^{-2}) i nadmorskoj visini. Zato se za točnija mjerenja ne može smatrati konstantnom obzirom na različita mjesta zemljine površine. Međutim, na jednom te istom mjestu nije zapažena promjena gravitacije pa se jednom određenu za dotično mjesto može smatrati konstantnom u svim uvjetima mjerenja. Ubrzanje zemljine teže ili gravitacija ovisi o geografskoj širini φ po zakonu:

$$g = (9.78049 (1 + 5.2884 \times 10^{-3} \sin^2 \varphi - 5.9 \times 10^{-6} \sin^2 2\varphi)) \quad (2.3)$$

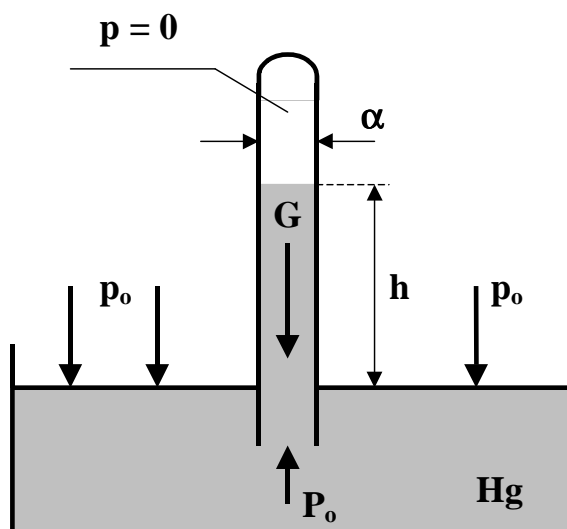
Pored toga gravitacija Zemlje ovisi o nadmorskoj visini h :

$$g = g_o \frac{1}{1 + 2 \frac{h}{R} + \left(\frac{h}{R}\right)^2} \quad (2.4)$$

R - srednji polumjer Zemlje (6.3711177×10^6 m)

Iz svega se može zaključiti da manometri s kapljevinom podliježu gravitacijskim utjecajima, ako se mijenja mjerno mjesto, ali ipak po svojim svojstvima spadaju u grupu apsolutnih instrumenata koji se mogu baždari pomoću tri osnovne SI veličine: kg, m, s. To su klasični pretvornici i danas se upotrebljavaju samo u posebnim okolnostima. Međutim zbog jednostavnosti izvedbe i primjene pojedine se izvedbe upotrebljavaju u laboratorijima, a na osnovi U-manometra izvedeni su i precizni baždarni instrumenti.

2.2.1.1. Torricelliev barometar



Slika 2.2. Torricelliev barometar

Torricelliev barometar najjednostavniji je predstavnik kapljevinskih manometara. Namjenjen je mjerenju atmosferskog, dakle apsolutnog tlaka. Izrađen je tako da se kalibrirana čista staklena cijev, zataljena na jednom kraju, napuni čistom živom, začepi, okrene, uroni u posudu sa živom i odčepi. Tada stup žive u cijevi zauzme visinu od oko 760 mm od razine žive u posudi što ovisi o postojećem atmosferskom tlaku. Iznad meniskusa žive u cijevi stvori se vakuum ili točnije nizak tlak živinih para.

Uvjet statičke ravnoteže zahtijeva da suma svih sila koje drže stup žive u predloženom položaju bude jednaka nuli, dakle da težina stupa žive (G) bude jednaka sili (P_o) koju proizvodi atmosferski tlak (p_o) djelovanjem na površinu otvora cijevi kroz živu.

$$G = P_o \quad (2.5)$$

$$h \frac{d^2 \pi}{4} \rho g = p_o \frac{d^2 \pi}{4} \quad (2.6)$$

Sređivanjem jednadžbe dobiva se izraz za visinu stupca žive pod djelovanjem tlaka p_o :

$$h = \frac{1}{\rho g} p_o \quad (2.7)$$

pa je mjereni tlak:

$$p_o = h \rho g = h \gamma \quad (2.8)$$

Uz konstantnu specifičnu težinu žive $\gamma = \rho g$ (gdje je ρ gustoća žive, a g gravitacija na mjestu mjerenja) visina stupca žive mjeri je tlaka p_o . Skala se obično izgravira na samu cijev u mmHg. Ovaj manometar mjeri i razliku tlakova $p_o - p$ gdje je $p = 0$, dakle vakuum, prema kojemu se određuje iznos mjerenog tlaka p_o . Umjesto žive može se koristiti bilo koja druga kapljevina prikladna za potrebno mjereno područje manometra, ali zbog manje specifične težine ostalih kapljevina u odnosu na živu potrebna je znatno duža cijev (npr. za vodu preko 10 m).

No i ovako jednostavan manometar podvrgnut je utjecaju mnogih smetnji koje smanjuju točnost mjerenja. Npr. manometar baždaren na 45° geografske širine pokazuje pozitivne greške ako se njime mjeri južnije, a negativne ako se mjerno mjesto nalazi sjevernije od mjesta baždarenja. Gustoća žive ovisi o temperaturi kao i njen obujam. To se dakako odražava i na visinu živinog stupca u cijevi barometra h :

$$h_T = h_0 (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots) \quad (2.9)$$

h_T - visina stupca žive na temperaturi T

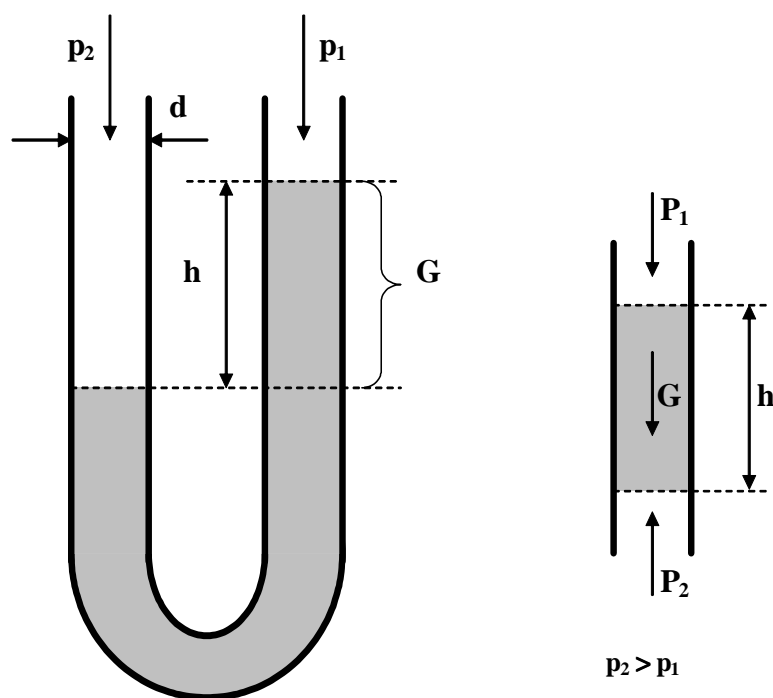
h_0 - visina stupca žive na temperaturi na kojoj je baždaren barometar

α, β, γ - temperaturni koeficijenti širenja žive

ΔT - razlika temperature na kojoj se mjeri i temperature na kojoj je baždaren barometar

Također treba paziti na kapilarne pojave. U cijevima malog promjera živa ima konveksni meniskus pa se javlja kapilarna depresija. Kapljevine koje kvase stijenku imaju konkavni meniskus pa ispoljavaju kapilarnu elevaciju. Osim matematičkih korekcija postoje i rastezljive skale za kompenzaciju pogrešaka.

2.2.1.2. U-manometar



Slika 2.3. U-manometar

Mjerenje s ovim manometrom zasniva se na istom principu kao i kod Toricellijevog barometra. Razlika je u izvedbi. Kalibrirana cijev savijena je u obliku slova U. Ovaj manometar mjeri relativni tlak $\Delta p = p_2 - p_1$, dakle razliku tlakova, pa se zove i diferencijskim manometrom.

Sila P_2 uslijed tlaka p_2 prenosi se kroz živu u desni krak gdje drži ravnotežu sa silom P_1 uslijed tlaka p_1 i težinom stupca žive G visine h .

$$P_2 = P_1 + G \quad (2.10)$$

$$p_2 \frac{d^2 \pi}{4} = p_1 \frac{d^2 \pi}{4} + h \rho g \frac{d^2 \pi}{4} \quad (2.11)$$

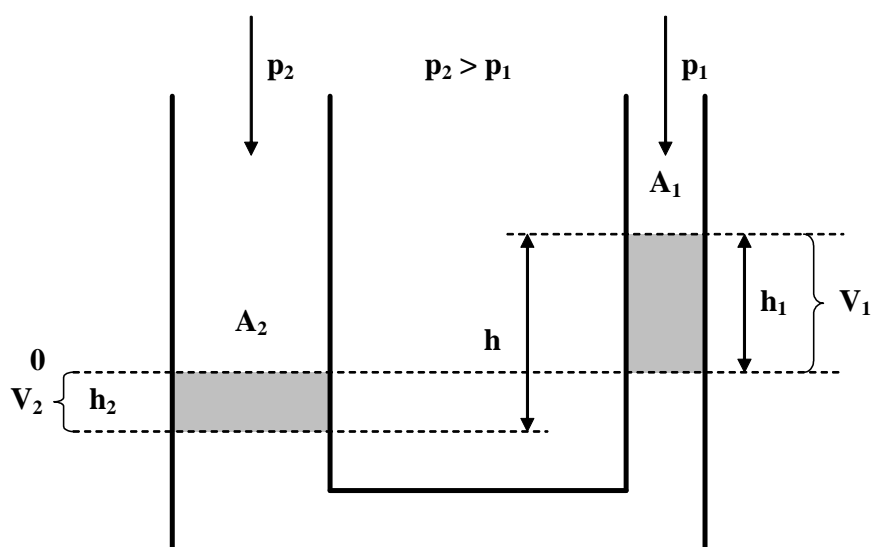
$$\Delta p = p_2 - p_1 = h \rho g = h \gamma \quad (2.12)$$

Ovaj izraz je sličan izrazu za Toricellijev manometar. U-manometrom se može mjeriti apsolutni tlak kad bi p_1 bio jednak 0 a što se postiže evakuiranjem i zataljivanjem desnog otvora cijevi. Obično je desni otvor podvrgnut djelovanju atmosferskog tlaka pa u tom slučaju U-manometar služi za mjerenje relativnog pretlaka ili podtlaka. Univerzalnost primjene U-manometra je u tome što se privođenjem bilo kakvih tlakova p_2 i p_1 uvijek mjeri njihova razlika. Tlakovi se obično privode savitljivim gumenim cijevima koje se navuku na otvore. Smetnje koje djeluju na točnost pokazivanja Toricellijevog manometra djeluju i na U-manometar, jedino se pogreške uslijed kapilarnih pojava kompenziraju same od sebe zahvaljujući simetričnoj izvedbi manometra.

U-manometar koristi se i za pretvorbu tlaka u električni mjerni signal pri čemu stupac žive djeluje kao kliznik.

2.2.1.3. U-manometar nesimetrične izvedbe

U-manometar nesimetrične izvedbe ima cijevi s različitim površinama presjeka A_1 odnosno A_2 . U slučaju da je $\Delta p = p_2 - p_1 = 0$ razine kapljevine su u obje cijevi jednake i pokazuju razinu označenu s 0. Ako nastupi stanje $p_2 > p_1$ kao što je prikazano na slici 2.4., istisnuti obujmi moraju ostati isti, no visine h_1 i h_2 bit će različite ovisno o površinama presjeka cijevi točnije o njihovom omjeru.



Slika 2.4. U-manometar nesimetrične izvedbe

Uz pretpostavku da se u desnoj cijevi razina podigla za h_1 , a u lijevoj se spustila za

$$h_2 = h_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (2.13)$$

uz razliku tlaka $\Delta p = p_2 - p_1 = h\rho g$ i uz $h = h_1 + h_2$ vrijedi:

$$h = h_1 + h_1 \frac{A_1}{A_2} = h_1 \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (2.14)$$

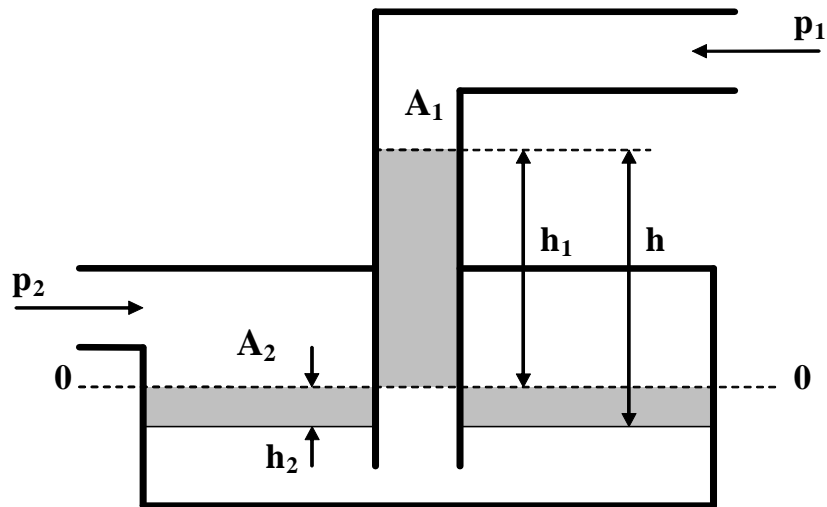
pa je

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h_1 \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \rho g \quad (2.15)$$

Ako je $A_2 \gg A_1$ onda je h_2 zanemarivo pa je $h \cong h_1$ što daje:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \cong h_1 \rho g \cong h \rho g \quad (2.16)$$

2.2.1.4. Manometar s čašicom

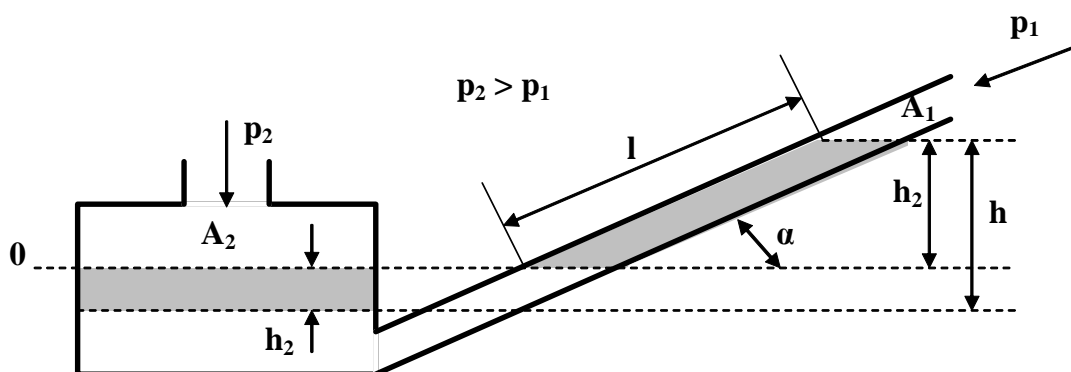


Slika 2.5. Manometar s čašicom

Manometar s čašicom radi u stvari kao U-manometar nesimetrične izvedbe, kod kojega je tanja cijev smještena u debljoj koja ima oblik čašice. Nesimetrija je ovdje jako naglašena tako da je $A_2 \gg A_1$. Na isti način može se dokazati da je $\Delta p = p_2 - p_1 \cong h_1 \rho g \cong h \rho g$.

Za praktičnu primjenu može se koristiti približni izraz. Ako je A_2 100 puta veća od A_1 onda je pogreška samo 1%. Ova je izvedba prikladna za brzo određivanje razlike tlakova, jer je za to dovoljno samo jedno čitanje, ako se tolerira navedena pogreška.

2.2.1.5. Manometar s priklonjenom cijevi



Slika 2.6. Manometar s priklonjenom cijevi

Manometar s priklonjenom cijevi služi za mjerenje vrlo malih tlakova. Cijev je priklonjena pod kutem α prema horizontali. Kada nastupi situacija $p_2 > p_1$ kapljevina daleko dopire u kosu cijev pa je već za male vrijednosti Δp , l veliko, ako je kut priklona malen. Na sličan način kao i prije može se dokazati da je:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = l \left(\frac{A_1}{A_2} + \sin \alpha \right) \rho g \cong l \rho g \sin \alpha \quad (2.17)$$

Za postizanje što veće osjetljivosti potrebno je kut priklona učiniti što manjim. Ako se želi čitati direktno na skali (l) uz zanemarivu pogrešku tada treba udovoljiti uvjet da je $A_2 \gg A_1$. Kod stvarnih se izvedaba može postići osjetljivost 0.1 mmH₂O stupca po milimetru dužine skale. Za punjenje se obično uzima alkohol ili koja druga organska kapljevina.

Prednost je ove izvedbe pred onima s okomitim cijevima jer je ovdje pomak veći nego što je visina (h) pri istoj razlici tlakova Δp pa se može koristiti dulja skala.

2.2.2. Manometri s krutim utezima

Kod ove skupine manometara u slogu se nalazi kapljevina, ali ona ovdje ne igra više ulogu kapljevinskog utega već samo prenosnika tlaka. Njenu ulogu preuzimaju stvarni kruti metalni utezi, vrlo točno odvagani, pomoću kojih se mjeri sila mjerenog tlaka na određenu površinu. Mjerenje tlaka svodi se ovdje na postupak vaganja izrazitije nego kod kapljevinskih manometara.

2.2.2.1. Prstenasti manometar

Prstenasti manometar (prstenasta vaga) se sastoji od šupljeg prstena, srednjeg polumjera r i površine presjeka A , pomoću nosača smještenog na ležaj. Prsten je balansiran obzirom na taj nožasti ležaj pa se može slobodno zakretati za kut α . Prsten je do polovine ispunjen kapljevinom. Na osovini koja nosi kazaljku pričvršćen je uteg težine G . Tlakovi se privode kroz dvije savitljive cijevi zanemarivog trenja s obje strane hermetičke pregrade. Kada je Δp jednak 0 onda kazaljka sa utegom pokazuje oznaku 0 na skali. Pri tome je otklon vage $\alpha = 0^\circ$. Razine kapljevine u desnoj i lijevoj polovici vage su jednake.

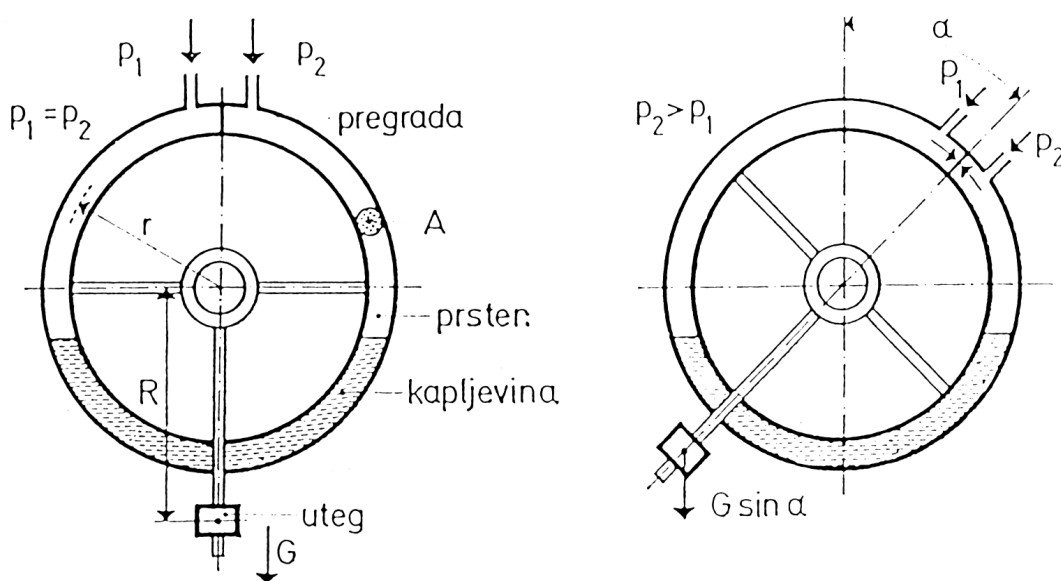
U slučaju $p_2 > p_1$ razina u lijevoj polovici vage opadne, a u desnoj se poveća kao kod U-manometra. To naruši ravnotežu vage, jer je desna polovica vage postala teža, pa se javlja zakretni moment. Vaga se otklanja u smjeru tog momenta sve dok se protumoment utega G , koji djeluje suprotno, ne izjednači s njim. U tom času nastupa statička ravnoteža vage pri kojoj je postignuti otklon mjera razlike tlakova Δp . Iz jednadžbi za uvjet ravnoteže može se izračunati da je:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{GR}{Ar} \sin \alpha \quad (2.18)$$

odnosno

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{Ar}{GR}\right)\Delta p \quad (2.19)$$

Otklon vage α nije linearan pa se posebnim dodatnim uređajima skala linearizira. To se radi tako da se uteg G objesi preko profilirane vođice na vagu, pri čemu se njegov moment mijenja linearno s otklonom vage, a ne kako je prikazano po zakonu sinusa.



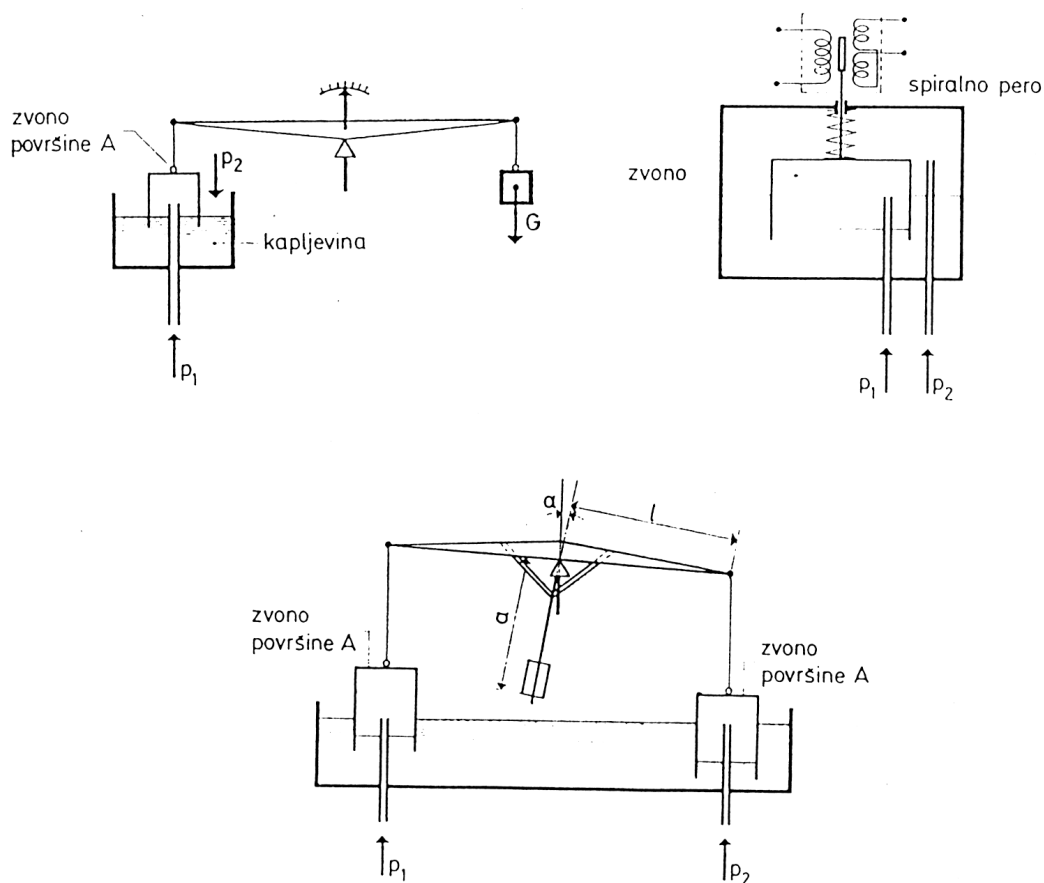
Slika 2.7. Prstenasti manometar

Iz jednadžbi se vidi da svojstva kapljevine ne utječu na mjerenje tlaka već samo geometrijske dimenzije vage i težina utega G . Kod ovog utega postoji jednostavna promjena mjernog područja zamjenom utega G ili promjenom kraka R . Pomaci prstena se

lako pretvaraju u električni signal pomoću potenciometrijskog pretvornika. Ovi manometri mogu se koristiti za široko mjerno područje od 15 Pa sve do 20 kPa.

2.2.2.2.. Zvonasti manometri

Odlikuju se posebnom osjetljivošću, a djeluju na principu vage. Promjene tlaka pobuđuju promjenu momenta sila na vagi. Zvono se giba sve dok se ne uspostavi ravnotežni položaj koji je ujedno i mjera razlike tlaka. Protumoment mjerenoj razlici tlaka dobije se pomoću utega ili pera. Zakreti se pretvaraju u električni signal potenciometrijskim ili induktivnim pretvornikom pomaka.



Sika 2.8. Zvonasti manometri

2.2.3. Manometarske kapljevine

Kod punjenja manometara koriste se realne kapljevine pa je potrebno kod analize rada voditi računa o nekim njihovim svojstvima koja mogu imati utjecaj na točnost mjerenja (npr. adhezija, promjena specifične težine s temperaturom, indeks loma). Tako se zbog adhezije sa stijenkama posude uzimaju cijevi tanje od 5 mm. Kod vode promjena specifične težine sa temperaturom dolazi do izražaja tek iznad 30 °C gdje se ona smanjuje. S obzirom na kemijske reakcije kapljevine ne smiju ulaziti u reakcije s mjernim fluidom. Indeks loma mora biti različit od indeksa loma mjernog fluida.

Najpoznatije manometarske kapljevine su voda (gustoće 1000 kg m⁻³) i živa (gustoće 13595 kg m⁻³). Tlak izražen 1 mmHg stupca odgovara stupcu H₂O koji je visok 13.595 mmH₂O.

Osim njih koriste se: acetilentetrabromid (gustoće 2965 kg m⁻³), bromoform (gustoće 2889 kg m⁻³), tetraklorugljik (gustoće 1594 kg m⁻³).

Vrlo je praktičan tetraklorugljik (CCl₄) jer se ne miješa s vodom i lako se oboji bojama netopivim u vodi.

U radu sa manometrima treba voditi računa o gravitaciji na mjestu mjerenja za razliku od standardne gravitacije na koju je manometar baždaren. U takvom slučaju treba izvršiti korekciju:

$$h_n = h_{iz} \frac{g_{iz}}{g_n} \quad (2.20)$$

h_n - visina kapljevina za normalnu gravitaciju

h_{iz} - izmjerena visina kapljevine

g_n - normalna gravitacija (9.81 m s⁻²)

g_{iz} - točna gravitacija na mjestu mjerenja

Utjecaj temperature dan je izrazom:

$$h_0 = h_t \frac{1 + \alpha t}{1 + \gamma t} \quad (2.21)$$

h_0 - visina stupca kapljevine na normalnoj temperaturi

h_t - visina stupca kapljevine na temperaturi T

α - koeficijent linearnog širenja skale

γ - koeficijent kubnog širenja skale

2.2.4. Deformacijski manometri

U ovu skupinu manometara spadaju svi oni sustavi za mjerenje tlaka kod kojih se sile za uravnoteženje stvaraju zbog elastične deformacije svinutih cijevi, membrana, mjehova i sličnih slogova. Te sile su posljedica elastične deformacije materijala po Hookeovom zakonu:

$$\varepsilon = \frac{1}{E\sigma} = \frac{1}{E} \frac{P}{A} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.22)$$

ε - relativno produženje

ΔL - apsolutno produženje

L - prvobitna dužina bez opterećenja

σ - naprezanje materijala

P - sila

A - površina presjeka materijala

E - Youngov modul elastičnosti

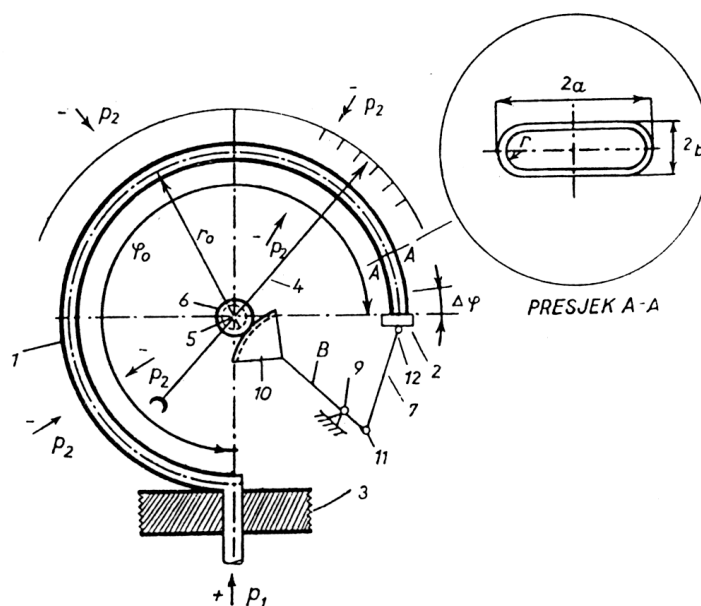
Pomoću ovog zakona može se izraziti sila kao posljedica te deformacije:

$$P = \left(E \frac{A}{L} \right) \Delta L \quad (2.23)$$

Tu silu razvija elastično osjetilo deformirano za ΔL . Ona ovisi pored geometrijskih dimenzija osjetila i o svojstvima tvari predloženima modulom elastičnosti E . Taj je modul znatno ovisan o temperaturi, načinu predhodne obrade, trajanju opterećenja i o posljedicama starenja tvari, pa će sila F znatno ovisiti o vanjskim utjecajima. Utjecaj gravitacije može se prema ostalim utjecajima zanemariti.

2.2.4.1. Bourdonova cijev

Bourdonova cijev spada među najjednostavnija osjetila tlaka. Današnje izvedbe sastoje se od metalne cijevi jednolikog presjeka (A-A), svinute u obliku srpa, koja je na jednom kraju zatvorena (2), a na drugom kraju učvršćena u podlogu (3): Cijevi imaju obično presjek kao na slici, ali se susreću i pravokutni, kružni i eliptični presjeci.



Slika 2.9. Bourdonova cijev

Ako u unutrašnjosti cijevi djeluje tlak p_1 , izvana p_2 (obično je p_2 atmosferski tlak), a istovremeno je $p_1 > p_2$, slobodni kraj cijevi (2) nastoji se ispraviti, pa se pomakne za kut $\Delta\varphi$ prema gore. Ako bi bilo $p_1 < p_2$, (mjerenje vakuuma), cijev bi se još više savila i to za $\Delta\varphi$, ali ovaj put prema dolje. Kod prvobitnih izvedbi na kraju cijevi (2) bila je pričvršćena kazaljka. Današnje izvedbe imaju kazaljku (4) koja se okreće oko osovinice (5) na kojoj je učvršćen zupčanik (6). Pomak slobodnog kraja cijevi (2) prenosi se preko poluge (7) na polugu (8) koja se okreće oko ležaja (9) i predaje pomak preko nazubljenog sektora (10) na zupčanik (6). Poluge su vezane zglobovima (11) i (12) međusobno i sa slobodnim krajem cijevi. Pomoću opisanog sustava poluga i zupčanika pomak $\Delta\varphi$ prenosi se povećan na kazaljku, a instrument ima veću osjetljivost u odnosu na prvobitnu izvedbu.

Veza između pomaka kraja cijevi i razlike tlaka dana je izrazom:

$$\Delta\varphi = \pi \frac{r_0^2 \varphi_0 a b}{EI} \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] (p_1 - p_2) \quad (2.24)$$

gdje je:

φ_0 kut luka cijevi u položaju mirovanja (obično 270°)

r_0 - srednji polumjer cijevi u položaju mirovanja

a, b, r - dimenzije presjeka cijevi

I - moment inercije poprečnog presjeka cijevi

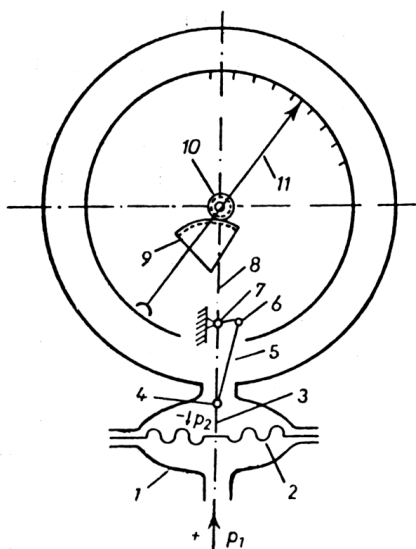
E - Youngov modul elastičnosti

Kako se iz izraza vidi, veća osjetljivost Bourdonove cijevi nastupa ako se srednji polumjer i dužina luka povećavaju, a visina presjeka smanjuje. Zbog toga se često cijevi savijaju u obliku spirale, što većeg srednjeg polumjera, sa 5-9 zavoja. Debljina stijenke cijevi mora biti takva da izdrži mjerene tlakove, a kao materijal upotrebljavaju se razne legure bakra ili nerđajući čelici, što ovisi o fluidu s kojim cijev dolazi u kontakt. Raspon mjernih tlakova kod različitih izvedbi varira u granicama između $9806.65 - 98066.5 \times 10^4$ Pa. Zbog svoje robusnosti ovi su manometri pogodni za različite svrhe u pogonu, a zbog precizne izvedbe i

u laboratoriju. Mana im je što ne podnose dobro vibracije i potrese pa ih u takvim uvjetima treba zamjeniti nekim drugim manometrima (u prvom redu onim s membranom).

2.2.4.2. Membranska osjetila tlaka

Ako na kružnu, elastičnu membranu, koja zatvara po svome obodu dno šuplje kalote, djeluje tlak, otklon njenog središta mjerja je veličine tlaka. Taj se otklon prenosi pomoću prijenosa na kazaljku, slično kao kod Buordonove cijevi.

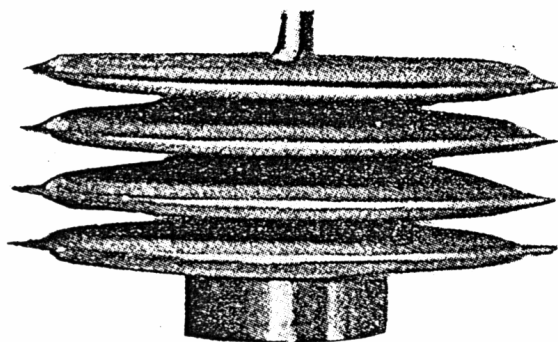


Slika 2.10. Membransko osjetilo tlaka

Između dvije stisnute kružne kalote (1) s otvorima na vrhu, nalazi se kružna elastična, metalna valovita membrana (2), koja zbog djelovanja razlike tlaka $p_1 > p_2$ ispupčuje prema gore svoj središnji ravni dio na kojem je pričvršćen stupić (3). Pomoću zglobova (4) i (6) i poluge (5) prenosi se pomak na dvokraku pravokutnu polugu s kruto vezanim kracima (8), koja ima zakretno ležište (7), a na duljem kraku nosi segmentni zupčanik (9) preko kojeg se pomak prenosi na zupčanik (10), na čijoj je osovinici pričvršćena kazaljka (11). Polužno-zupčasti prijenos ima zadaću da gibanje po pravcu, koje izvodi središte membrane, pretvori u kružno gibanje kazaljke i da pri tome bez unošenja nelinearnosti, taj pomak što više poveća kako bi sustav bio osjetljiviji.

Rasponi mjernog tlaka kreću se od 2×10^4 - 3×10^6 Pa. Prednost membrana ispred Bourdonovih cijevi je u tome što se membrane pored manje osjetljivosti na vibracije i potrese, lakše mogu zaštititi putem folija od agresivnih fluida, a isto tako je i prilaz k čitavoj površini membrane kroz široki prilazni otvor lakši za viskoznije fluide. Kao zaštita primjenjuju se folije od bakra, srebra i platine, a katkada i od plastičnih masa.

Da bi se maleni pomak jedne membrane uvišestručio, vežu se često dvije membrane u parove, a više parova u kapsule. Takvi se parovi i kapsule primjenjuju kod propuhomjera, barometara i avio instrumenata.

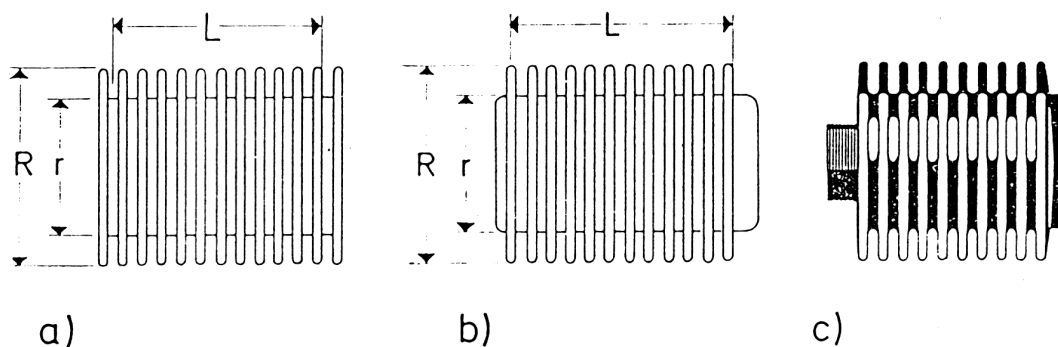


Slika 2.11. Kapsula

2.2.4.3. Mijeh

Mijeh ili harmonika je limena cijev s tankom stijenkom i s plaštom u obliku navoja. Na jednom je kraju zatvorena, a na drugom kraju je ugrađen priključak za mjereni tlak. Broj i dubina navoja ovisi o potrebnoj osjetljivosti. Prikladnom izvedbom navoja postiže se približno lineran pomak pa se mijeh mnogo upotrebljava u tehnici pneumatičkih regulatora. Postoje izvedbe manometara kod kojih je mijeh smješten u kruti lončić pa se vanjska površina mijeha može podvrći djelovanju nekog drugog tlaka, različitog od atmosferskog. Tada se mjeri razlika tih tlakova.

Mjehovi se upotrebljavaju za mjerenje malih tlakova, a i u uvjetima kad su potrebni veliki pomaci za male promjene tlaka. Za mjerenje većih tlakova upotrebljavaju se u sklopu s elastičnim perom. Pomaci mijeha mogu se pretvoriti u električni signal pomoću potenciometrijskog ili induktivnog osjetila.



Slika 2.12. Mijeh

2.2.4.4. Pogreške mjerenja kod deformacijskih manometara

Deformacijski manometri su izloženi utjecaju smetnji koje znatno smanjuju njihovu točnost, čak i u normalnim uvjetima rada. Utjecaj temperaturnih promjena mijenja elastična svojstva materijala i početne dimenzije manometra. Uslijed toga nastaju pogreške nul-točke koje se tijekom upotrebe manometra mijenjaju. Deformacijski se manometri sa Bourdonovom cijevi obično baždare kod 20 °C. Mjerenje kod neke druge temperature zahtijeva korekciju koja se može izračunati pomoću izraza:

$$\Delta p = k_t p (T_s - T_0) \quad (2.25)$$

Δp - korekcija izmjerenog tlaka

k_t - temperaturni koeficijent sloga

p - izmjereni tlak

T_s - stvarna temperatura za vrijeme mjerenja

T_0 - temperatura pri kojoj je manometar baždaren

Histereza je kod ovih slogova znatna. Očituje se kao negativna pogreška pri porastu, a kao pozitivna pri padu mjerenog tlaka.

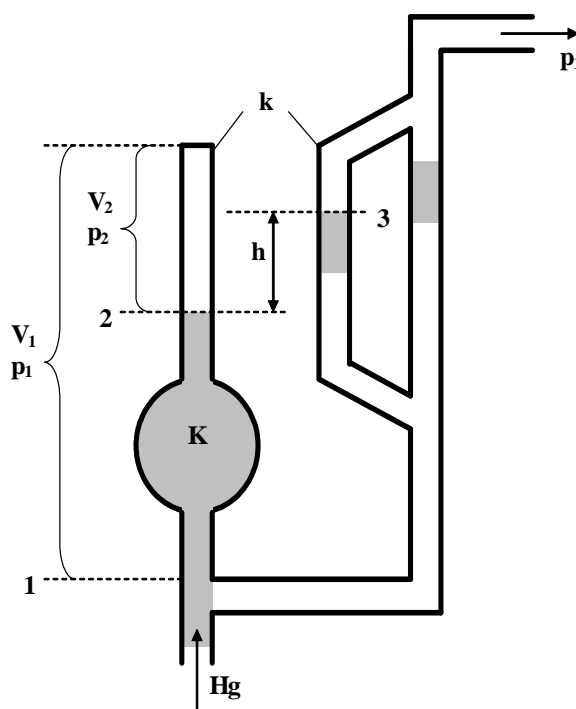
Klizanje nastaje radi "puzanja" materijala izazvanog naglom promjenom naprezanja. Pogreška zbog klizanja ovisi o trajanju i veličini naprezanja, te o temperaturi materijala. To znači da će deformacijski manometar pod stalnim tlakom postupno pokazivati sve više vrijednosti, a nakon rasterećenja neće mu kazaljka odmah pokazati nulu, nego tek nakon duljeg vremena. Umor materijala koji se javlja nakon duže upotrebe instrumenta djeluje na promjenu njegovih elastičnih svojstava, a može izazvati i nepredviđeni lom.

Deformacijski su manometri neprikladni za točnija mjerenja tlaka pa se radi svoje jednostavne izvedbe koriste pretežno kao pogonski instrumenti.

2.2.5. Mjerenje niskih tlakova (vakuum)

Vakuum je tlak koji je znatno niži od atmosferskog pa se za mjerenje upotrebljavaju manometri posebne izvedbe. Ti se instrumenti nazivaju **vakuummetri**. Za mjerenje vakuum do 1 mmHg mogu se načelno upotrebljavati gotovo svi dosada opisani manometri. Mjerenje visokog vakuum reda veličina 10^{-6} mmHg zahtijeva upotrebu posebnih instrumenata koji se po izvedbi i načinu rada znatno razlikuju od opisanih manometara.

2.2.5.1. McLeodeov vakuummetar



Slika 2.13. McLeodeov vakuummetar

McLeodov vakuummetar služi za baždarenje ostalih vakuummetara. Napravljen je od staklenih cijevi i kugle (K) velikog obujma. Kapilare (k) su istog presjeka. Mjeri se tako da se instrument priključi na vakuum instalaciju, a zatim u njega odozdo tlači živa. Kada živa dopre do oznake 1 uhvaćen je određeni obujam vakuuma V_1 , tlaka p_1 koji još uvijek predstavlja mjereni vakuum. Daljnjim tlačenjem žive sabija se mjereni vakuum u sve manji volumen pa mu tlak raste. Kada živa dopre do oznake 2 u kapilari, početni je volumen V_1 sabijen u V_2 pa vrijedi:

$$V_1 p_1 = V_2 p_2 \quad (2.26)$$

Gdje je p_2 tlak u volumenu V_2 . Mjereni vakuum je:

$$p_1 = \frac{V_2}{V_1} p_2 \quad (2.27)$$

Treba još odrediti tlak p_2 kako bi se mjereni vakuum mogao izračunati. To se radi mjerenjem toga tlaka na principu U-manometra. Živa se u desnoj kapilari instrumenta nalazi nešto više jer je tlak iznad njenog meniskusa p_1 , koji odgovara mjerenom vakuumu, niži od tlaka p_2 dobivenog opisanom kompresijom.

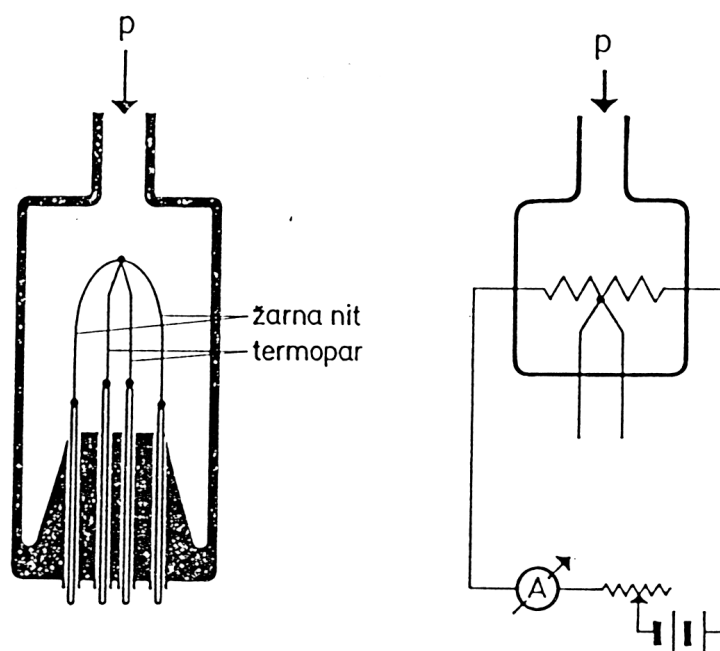
Tlak p_2 je prema tome $p_2 = h\rho g$ pa je mjereni vakuum

$$p_1 = \frac{h\rho g}{\frac{V_1}{V_2} - 1} \quad (2.28)$$

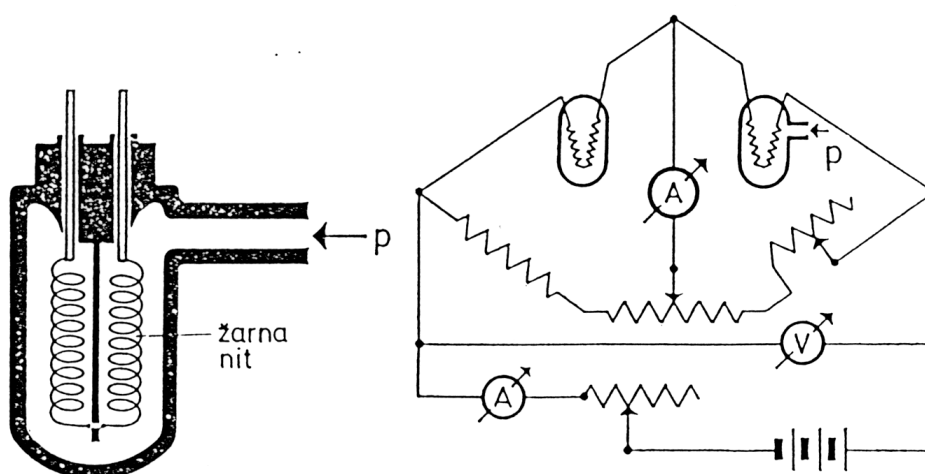
U stvarnim se izvedbama živa komprimira do točno određenih oznaka na kapilari iznad kugle, pa je time točno određen odnos V_1 / V_2 za svaku oznaku.

2.2.5.2. Pretvornici vakuuma s osjetilima na načelu toplinske vodljivosti

Ovi pretvornici mjere tlak u ovisnosti o toplini prenesenoj s električki grijane žice na plin u zatvorenoj komori. Količina prenesene topline proporcionalna je broju molekula plina u komori, dakle njihovu tlaku. Smanjuje li se broj molekula, prijenos topline bit će manji, a žica će biti toplija. Njena se toplina može mjeriti neposredno pomoću osjetila temperature ili mjerenjem promjene otpora žice u ovisnosti o temperaturi - **Piranijev pretvornik**. Upotrebljava se obično kao žica od volframa ili platine i žari na temperaturi oko 400 °C, ali se izvode i pretvornici s termistorima. Mjerno područje pretvornika vakuuma na načelu toplinske vodljivosti jest reda 0.01 do 10 Pa.



Slika 2.14. Mjerni pretvornik vakuuma s ugrijanom žicom i termoparom



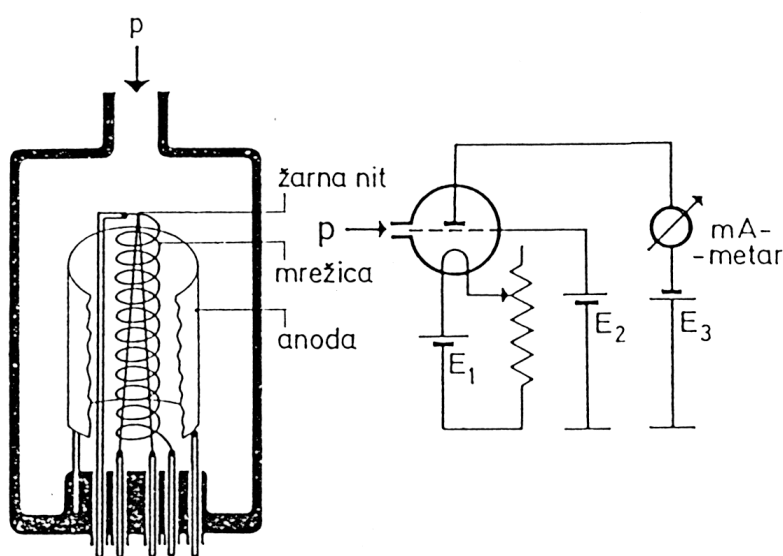
Slika 2.15. Piranijev pretvornik vakuuma

2.2.5.3. Ionizacijski pretvornici vakuuma

Njihov princip rada temelji se na ovisnosti struje iona između elektroda o gustoći plina u tom prostoru. Ta je struja razmjerna gustoći plina pa je time i mjera tlaka. Pretvornici se baždare za svaki plin posebno, a kao referentni plin obično se uzima dušik.

Osnovna izvedba ionizacijskog pretvornika vakuuma izvedena je na načelu triode. Unutar valjkaste anode smještena je žarna nit, a katoda je okružena s helikoidalno namotanom mrežicom. Pozitivni se ioni skupljaju na anodi, koja je na negativnom potencijalu prema katodi. Dobije se anodna struja razmjerna tlaku. Mjerno područje obuhvaća tlakove od 10^{-7} do 10^{-2} Pa.

Daljnja izvedba ionizacijskog pretvornika vakuuma je Bayard-Alpertov pretvornik u kojem je anoda izvedena u obliku žice i smještena u središte, a njoj koncentrično nalaze se mrežica i žarna nit. Donje područje je 10^{-9} Pa. Upotrebom posebnog sloga tzv. fotomultiplikatora umjesto anode razvijen je fotomultiplikatorski ionizacijski pretvornik vakuuma. Time je omogućeno mjerenje krajnje malih struja čak do 10^{-20} A, a time osjećanje tlakova reda 10^{-17} Pa.



Slika 2.16. Ionizacijski pretvornik vakuuma

3. MJERENJE TEMPERATURE

Temperatura je veličina kojom se izražava toplinsko stanje tijela i njihova sposobnost prijenosa topline na druga tijela. Toplina je energija koja se zbog razlike temperatura prenosi između tijela i okoline ili između dva tijela. Kad između dva tijela ili tijela i okoline ne postoji temperaturna razlika između njih neće biti ni prijenosa topline. Promjene toplinskog stanja tijela uzrok su različitim fizikalnim promjenama, pa su mnoge od tih promjena iskorištene kao osnova za osjećanje i pretvorbu temperature u mjerni signal. Najvažnije od tih promjena su:

- promjena obujma tijela
- promjena električnog otpora vodiča i poluvodiča
- promjena energije zračenja tijela
- promjena elektromotorne sile razvijene na spoju dvaju vodiča.

Postoji nekoliko temperaturnih skala: celzijusova ($^{\circ}\text{C}$), farenhajtova (F), rankineova (R), kelvinova(K).

Odnosi među stupnjevima u pojedinim skalama:

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$\text{F} = 1.8 \times ^{\circ}\text{C} + 32$$

$$\text{R} = 1.8 \times \text{K}$$

3.1. Dilatacijski mjerni pretvornici temperature

Ovi se pretvornici dijele u nekoliko skupina u ovisnosti o tvari koja mijenja obujam. Svaka skupina obuhvaća više vrsta i brojne različite izvedbe, a uz to se razlikuju prema primjeni, mjernom području i mjernim karakteristikama. Ovisnost obujma V o prirastu temperature ΔT određuje se eksperimentom za svaku tvar zasebno, pa se zatim traži matematički izraz koji najbolje opisuje tu ovisnost. Uzima se izraz u obliku polinoma:

$$V = V_o [1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots] \quad (3.1)$$

V - obujam kapljevine pri mjerenoj temperaturi T

V_o - obujam kapljevine pri temperaturi T_o

α, β, γ - temperaturni koeficijenti promjene obujma

Za štap ili žicu često ta se ovisnost piše za dužinu i pri tome zanemaruje poprečno širenje:

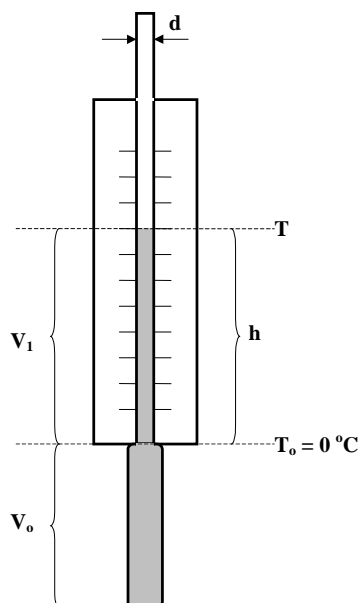
$$l = l_o [1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots] \quad (3.2)$$

l - dužina na temperaturi T

l_o - dužina na temperaturi T_o

U ovu skupinu spadaju: kapljevinski, mehanički i tlačni termometri.

3.1.1. Kapljevinski termometar



Slika 3.1. Stakleni kapljevinski termometar

Stakleni se kapljevinski termometar sastoji od lukovice sa kapljevinom, kapilare i skale. Neka je lukovica ispunjena kapljevinom pri temperaturi $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i neka ima obujam V_0 . Staklo je hermetički zataljeno, a iznad kapljevine je vakuum. Porastom temperature kapljevine u lukovici povećava se njen obujam pa prirast obujma kapljevine (ΔV) ulazi u kapilaru i dosiže visinu h u kapilari. Ako je površina presjeka kapilare svuda jednaka onda je očito visina stupca kapljevine u kapilari (h) mjera prirasta obujma (ΔV), a on je mjera temperature T jer je kod $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $h = 0$. Dakle:

$$\Delta V = \frac{d^2 \pi}{4} h \quad (3.3)$$

$$h = \frac{4\Delta V}{d^2 \pi} = \frac{4V_0 \alpha (T - T_0)}{d^2 \pi} \quad (3.4)$$

$$h = \alpha \frac{4V_o}{d^2 \pi} T = kT \quad (3.5)$$

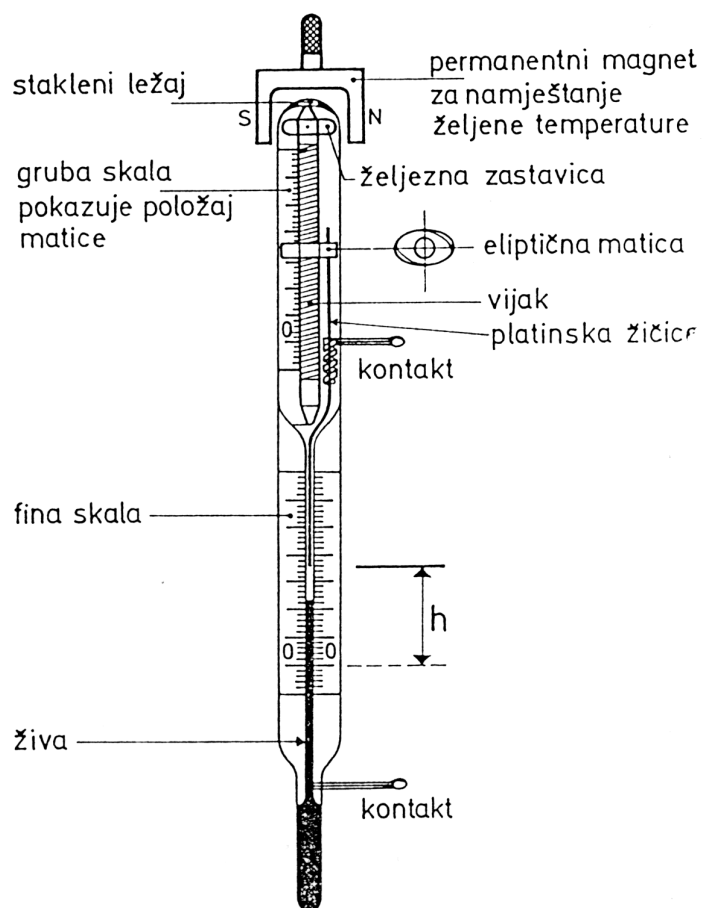
gdje je k konstanta termometra pa je $h = f(T)$. Konstanta u sebi sadrži dimenzije termometra (V_o i d), te svojstva širenja kapljevine (α). Vidi se da je za što bolju osjetljivost termometra tj. za što veću visinu (h) u kapilari potrebno da konstanta k bude što veća. To se postiže upotrebom kapljevine sa što većim α , te izvedbom termometra sa što većim obujmom lukovice i što tanjom kapilarom. No praktično se kapilara ne smije napraviti suviše tankom radi smetnji uslijed kapilarnih pojava, niti lukovica suviše velikom radi toplinske, a time i vremenske tromosti termometra.

Stakleni kapljevinski termometri proizvode se danas u vrlo mnogo različitih oblika za različite namjene. Poznata je izvedba staklenog termometra u obliku štapa u kome je smještena kapilara i lukovica. Tako su termometri obično punjeni živom i služe pretežno za laboratorijska mjerenja.

Industrijski se termometri često zaštićuju metalnim tuljcima s prorezom kroz koji se vidi skala. Sam se termometar polaže u tuljac na jastučić od vate, staklene vune ili azbesta radi dilatacije i zaštite od vibracija. Da se pospješi toplinski kontakt između lukovice i metalnog tuljca stavlja se u tuljac oko lukovice prikladna kapljevina ili metalni prah.

Jedna od brojnih verzija kapljevinskih termometara je i **kontaktni termometar**. Mehanizam za pomicanje platinske žičice smješten je u gornji prošireni dio kapilare eliptičnog oblika. U tome se prostoru nalazi metalni vijak s maticom postavljen u staklene ležajeve. Vijak ima pri vrhu navarenu željeznu zastavicu pa se može djelovanjem permanentnog magneta okretati oko svoje osi. U tu je svrhu potrebno okretati ručicu magneta tako da se zajedno s njom okreće i vijak. Matica se pri tom ne može okretati, jer je smještena u eliptični prostor proširenja kapilare. Ona se samo malo zakrene pa klizi gore ili dolje ovisno o smjeru zakretanja, te za sobom vuče gornji kraj kontaktne platinske žičice koja prolazi kroz klizni kontakt s utaljenim izvodom. Žičica se svojim donjim krajem uranja u pravu kapilaru termometra. Klizni je kontakt obično izveden u obliku male zavojnice s nekoliko zavoja gole žice kroz koju prolazi platinska žičica. Na taj se način postiže električni spoj pomične platinske žičice čiji kraj predstavlja pomični kontakt.

Gornja skala služi za grubo, a donja za fino namještanje visine kontakta. Permanentni magnet može služiti i kao "ključ" termometra jer se može lako skinuti, a bez njega nije moguće promijeniti namještenu temperaturu.

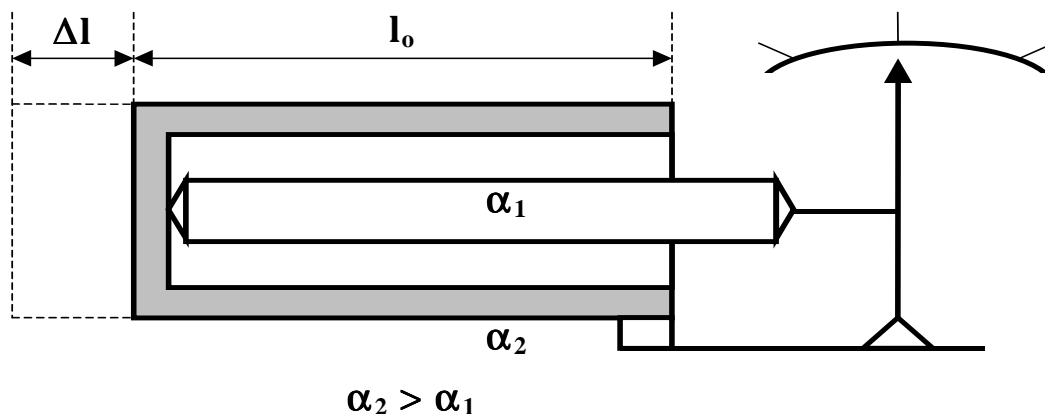


Slika 3.2. Kontaktni termometar

3.1.2. Mehanički termometri

U grupu mehaničkih termometara spadaju oni sustavi kod kojih se utjecaj temperature odražava kao mehanički pomak ili deformacija znatne sile. Ta se sila može iskoristiti za pomicanje kazaljke i izvršne sprave regulatora ili kao ulaz prikladnog pretvornika pomaka u svrhu mjerenja i prijenosa mjernog podatka na veće udaljenosti.

3.1.2.1. Štapni dilatacijski pretvornik



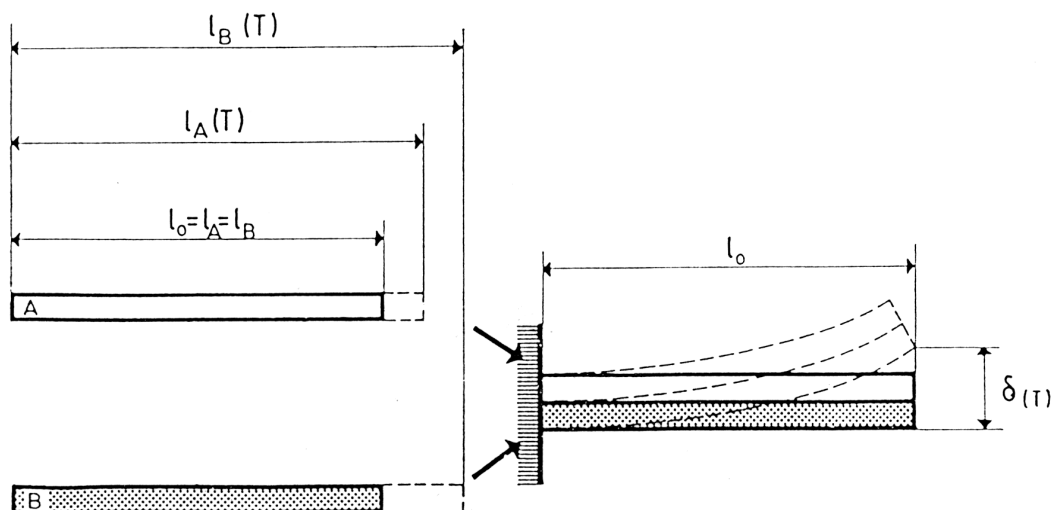
Slika 3.3. Štapni dilatacijski pretvornik

U cijev izrađenu od metala koji ima veliki temperaturni koeficijent rastezanja (α_2) smješten je uložak izrađen od metala sa vrlo malim temperaturnim koeficijentom rastezanja (α_1). Uložak je s lijeve strane čvrsto vezan za dno cijevi, a s desne pričvršćen na mehanizam za pomicanje kazaljke termometra. Ako se takav slog izloži porastu temperature, cijev će se produžiti na lijevu stranu gdje je slobodna i povući uložak. Budući da se uložak nije produžio, radi malog α_1 , povući će kazaljku. Pomak kazaljke mjera je porasta temperature.

Od materijala koji se koriste za izradu dilatacijskih termometara treba spomenuti bakar, aluminij, mjed. Za uložak se koriste invar (legura 64% Fe i 36% Ni), kvarc, porculan i slični materijali visokog tališta i malog temperaturnog koeficijenta rastezanja. Točnost ovih termometara je malena oko $\pm 1\%$. Tijekom upotrebe brzo ostare jer materijali od kojih je napravljen mijenjaju svojstva uslijed čestih temperaturnih promjena kojima su izloženi. Ovi termometri su jednostavni i jeftini pa često služe kao osjetila jednostavnih regulatora temperature gdje se ne zahtjeva velika točnost (npr. kod termičkih kućanskih aparata).

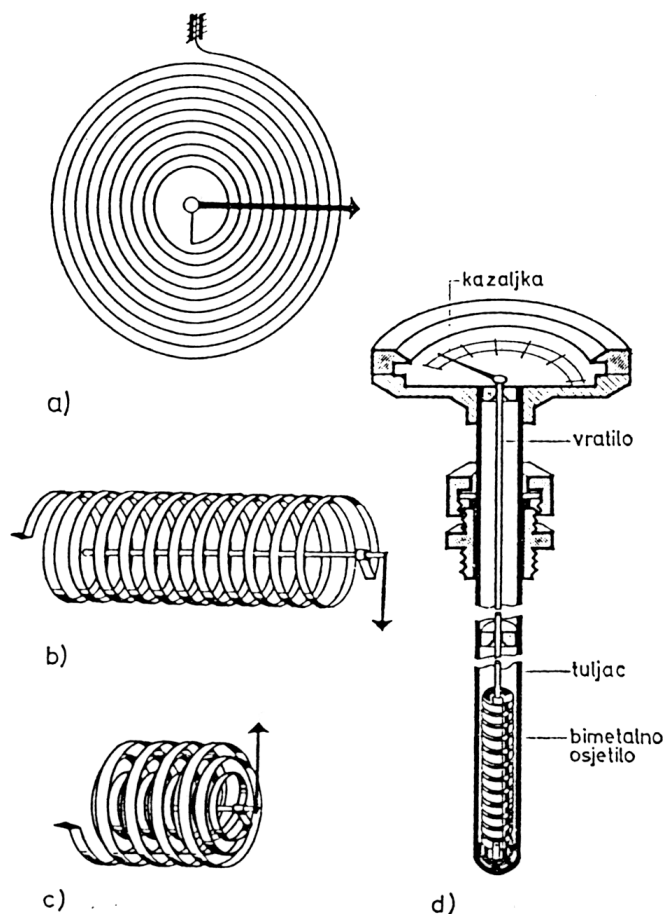
3.1.2.2. Bimetalni termometri

Osjetilo bimetalnog termometra sastoji se od dvije metalne trake zavarene ploštice po dužini. Jedna je traka izrađena od metala sa vrlo velikim temperaturnim koeficijentom rastezanja, a druga s vrlo malim. Izložili se bimetalna traka porastu temperature savijati će se u smjeru materijala s manjim temperaturnim koeficijentom rastezanja. Osnovna izvedba takvog termometra prikazana je na slici 3.4. To je tzv. konzolna izvedba.



Slika 3.4. Bimetalno osjetilo

Osim ove konzolne postoje još i spiralne, helikoidalne, bihelikoidalne izvedbe.

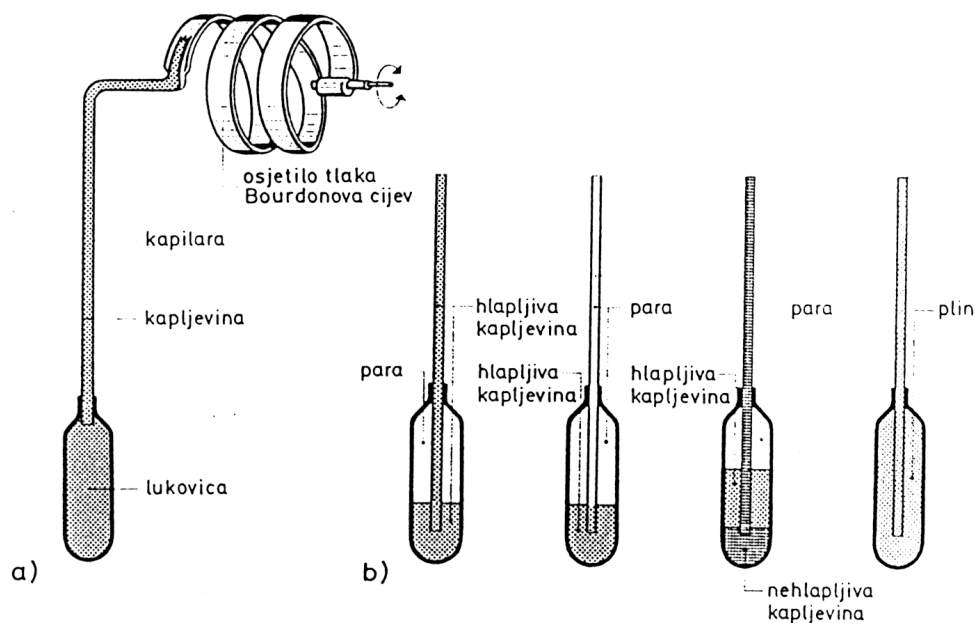


Slika 3.5. Različite izvedbe bimetalnih termometara: a. spiralna, b. helikoidalna, c. bihelikoidalna, d. termometar s bimetalnim osjetilom

Mjerno područje bimetalnih termometara ovisi o mehaničkim svojstvima materijala pri visokim temperaturama. U većini tvorničkih izvedbi mjerno područje je od $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Područje primjene im je u uređajima za zaštitu od toplinskih i strujnih preopterećenja (npr. kod automatskih osigurača električne mreže).

3.1.3. Tlačni termometri

Tlačni termometri mjere temperaturu pomoću tlaka koji nastaje u zatvorenom volumenu pod utjecajem temperature. Sastoje se od metalnog osjetila u obliku šupljeg valjka, savitljive metalne kapilare i deformacijskog manometra. Od deformacijskih manometara najčešće se koriste Bourdonove cijevi. Tlačni termometar je metalni hermetički zatvoreni sustav, ispunjen prikladnom kapljevnom, parom ili plinom čiji se tlak, ovisan o temperaturi njegovog osjetila, prenosi od mjernog mjesta kroz kapilaru do pokaznog instrumenta. Budući da je tlak u zatvorenom konstantnom obujmu proporcionalan temperaturi, može se uzeti da je on mjera temperature kojoj je izloženo osjetilo, a skala deformacijskog manometra može se izbaždariti u jedinicama temperature. Prikladnim je izvedbama moguće mjerenje temperature i na udaljenostima od 100 m od mjernog mjesta. Tlačni termometri mogu razvijati znatne mehaničke sile dovoljne za direktno pokretanje elemenata regulatora ili zapisne sprave. Kvar ovih termometara ne izaziva opasne posljedice pa se mogu primjenjivati i u najopasnijim uvjetima rada (npr. u tvornicama eksploziva u sklopu pneumatičkih ili hidrauličkih regulatora).



Slika 3.6. Tlačni termometar

3.1.3.1. Kapljevinski tlačni termometar

Slog ove izvedbe potpuno je ispunjen kapljevinom. Promjena temperature osjetila izaziva proporcionalnu promjenu tlaka Δp prema zakonu:

$$\Delta p = \frac{\alpha}{\mu} \Delta T \quad (3.6)$$

α - temperaturni koeficijent širenja kapljevine

μ - koeficijent stišljivosti (kompresibilnosti) kapljevine

Kod stvarnih se izvedbi ovih sustava pored kapljevine proširi nešto malo i osjetilo, pa je za točniji proračun potrebno poznavati i ovisnost relativne promjene obujma kapljevine o tlaku i temperaturi.

Pogreške koje se javljaju:

Temperaturna pogreška nastaje djelovanjem temperature okoline na kapilaru i deformacijski manometar jer se time stvara dodatni tlak u cijelom sustavu. Najjednostavniji način djelomične kompenzacije provodi se dodavanjem bimetalnog listića u prijenosni sustav kazaljke.

Promjena atmosferskog tlaka mijenja otklon deformacijskog manometra pa uzrokuje dodatnu pogrešku manometra. Djelomična kompenzacija ove pogreške postiže se stavljanjem kapljevine u sustavu pod znatan nadtlak, prema kojemu se relativno male promjene atmosferskog tlaka mogu zanemariti.

Hidrostatička pogreška nastaje radi različitih razina osjetila i manometra. Ona je karakteristična baš za kapljevinske termometre koji su u pogonu nepravilno postavljeni tako da je razina osjetila i manometra različita.

Mjerno područje kapljevinskih termometara ovisi o svojstvima upotrebene radne kapljevine i obično je u području od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kao radne kapljevine služe većinom organske kapljevine poput toluena, ksilena, petroleja itd.

3.1.3.2. Parni tlačni termometar

Ovi su slogovi građeni slično kao i kapljevinski. Razlika je u punjenju i izvedbi osjetila. Osjetilo je kod ovih termometara ispunjeno kapljevinom do $2/3$ svojeg volumena. U lako isparljivu kapljevinu uronjena je kapilara skoro do dna osjetila. Gornji prostor u osjetilu sadrži zasićenu paru radne kapljevine o čijem tlaku ovisi i ukupan tlak u slogu. Promjena temperature okoline neznatno utječe na točnost mjerenja jer tlak u slogu pretežno ovisi o temperaturi zasićenih para u osjetilu, a tek neznatno o širenju kapljevine. Zato je znatna pogreška zbog promjene atmosferskog tlaka naročito kod nižih temperatura kada je tlak u slogu istog reda veličine kao i atmosferski. Hidrostatička pogreška je ista kao i kod kapljevinskih tlačnih termometara. Prednost ovih termometara u odnosu na kapljevinski: povećana osjetljivost, manji obujam osjetila i neovisnost točnosti o promjenama temperature okoline. Tromost je nešto veća zbog utroška topline za isparavanje kapljevine. Mjerno područje je od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Radne kapljevine: aceton, eter, benzen, klorometil. Radni tlak kod ovih slogova može doseći do 150 at te treba biti oprezan pri rukovanju.

3.1.3.3. Plinski tlačni termometar

Izvedbe ovih slogova jednake su kao i kod ostalih s tom razlikom da su punjeni inertnim plinovima. Pogreške izazvane temperaturom okoline manje su izražene nego kod kapljevinskih termometara. Pogreška zbog promjenljivih uvjeta vanjskog tlaka uklanja se nadtlakom plina od 30 at. Hidrostatička greška im je zanemarljiva. Mjerno područje od -130 °C do + 550 °C. Pune se dušikom za više, a helijem za niže temperature. Specijalne izvedbe mjere i do -200 °C. Tromost im je malena.

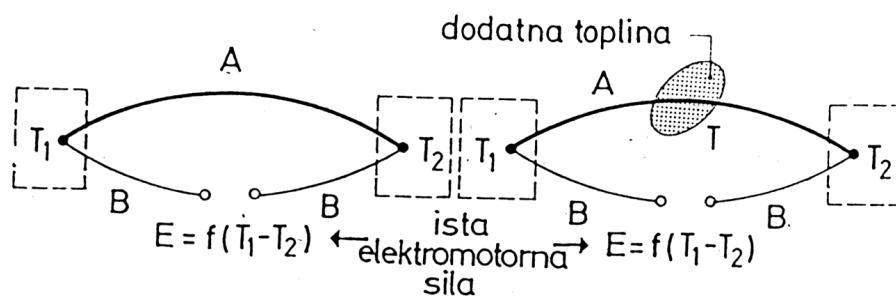
3.2. Električni termometri

3.2.1. Termoparovi

Njemački fizičar Thomas Johann Seebeck otkrio je 1821. god. termoelektrične struje u krugovima s bizmutom i bakrom, te bizmutom i antimonom. Uočio je da se u zatvorenom strujnom krugu što ga tvore dva metala inducira kontinuirana električna struja kad su spojevi ovih metala izloženi različitim temperaturama. Pomoću ampermetra beskonačno malog unutarašnjeg otpora motri se nastala termoelektrična struja I ili se mjeri termoelektromotorna sila E pomoću voltmetra beskonačno velikog unutrašnjeg otpora. Vrijednost razvijene elektromotorne sile ovisi o materijalu od kojeg je izrađena žica i razlici temperatura. Mjerni pretvornik temperature izveden kao spoj dva različita materijala priključenih na mjerni instrument zove se **termopar**.

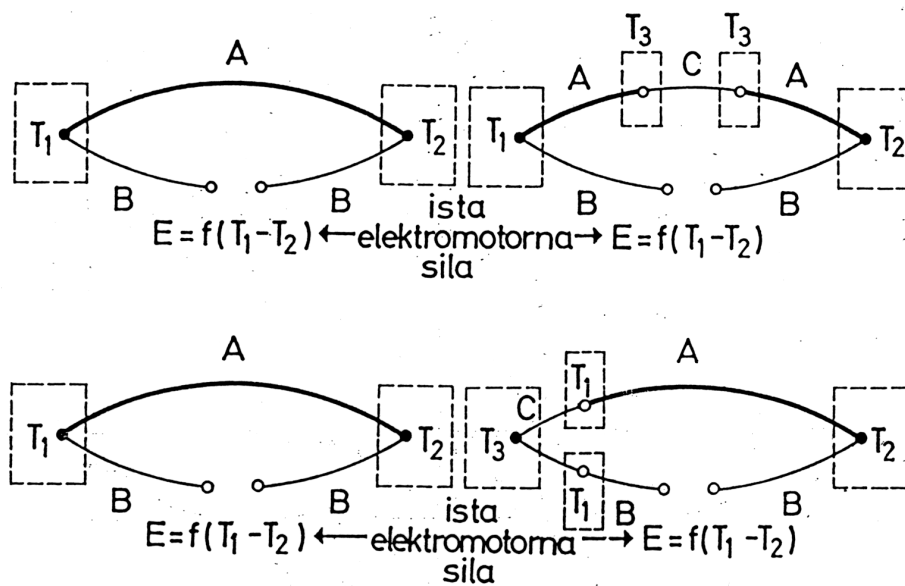
Podrobna istraživanja termoelektričnih krugova omogućila su postavljanje iskustvenih zakona važnih pri primjeni termoparova:

Zakon homogenih materijala - na termoelektromotornu silu što je daje termopar sa spojevima na temperaturama T_1 i T_2 ne može utjecati toplina, primjenjena bilo gdje u krugu, ako je materijal homogen.



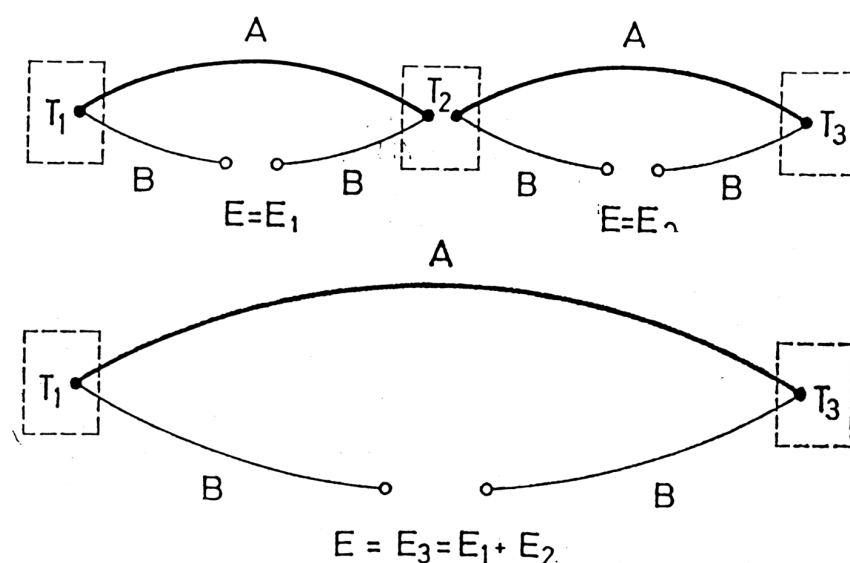
Slika 3.7. Tumačenje zakona homogenih materijala

Zakon međumaterijala - algebarski zbroj termoelektromotornih sila u krugu sastavljenom od po volji mnogo različitih materijala jednak je nuli ako je temperatura kruga ujednačena.



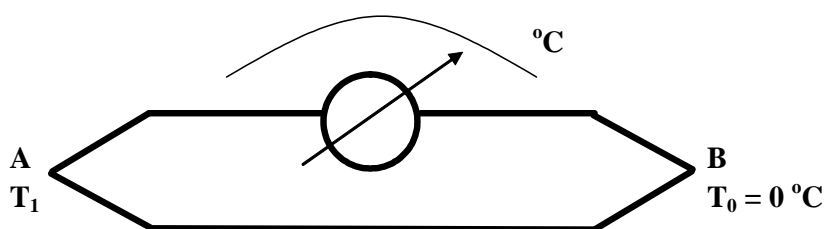
Slika 3.8. Tumačenje zakona međumaterijala

Zakon uzastopnih vrijednosti temperatura - ako termopar kojemu su spojevi na temperaturama T_1 i T_2 daje termoelektromotornu silu E_1 , a termoelektromotornu silu E_2 kada su mu spojevi na temperaturama T_2 i T_3 , tad će taj isti termopar davati pri temperaturama spojeva T_1 i T_3 termoelektromotornu silu E_3 jednaku zbroju termoelektromotornih sila E_1 i E_2 .



Slika 3.9. Tumačenje zakona uzastopnih vrijednosti temperatura

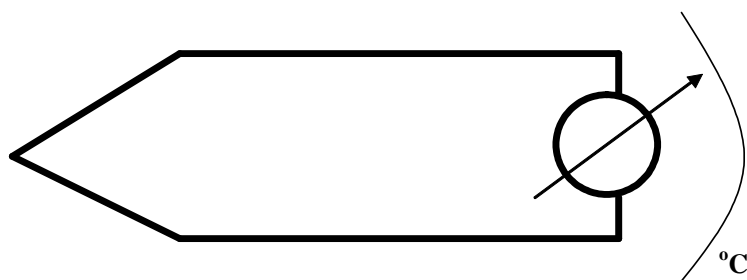
Obično se temperatura T_2 stabilizira termostatom na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa se točka B naziva **referentnim** ili "hladnim" spojem termopara, dok se točka A izlaže mjerenoj temperaturi T_1 . Točka A naziva se **radnim** ili "vrućim" spojem termopara. Sredinu kruga čine spojni ili kompenzacijski vodovi potrebne dužine u koje je spojen mjerni instrument, obično prikladan milivoltmetar, izbaždaren u $^{\circ}\text{C}$, za očitavanje ili zapisivanje izmjerene temperature, a katkada i komparator kontrolnog procesa. Navedeni spoj termopara naziva se **diferencijskim** zbog jednostavne mogućnosti mjerenja razlike temperatura. Referentni spoj tog termopara sveden je praktički samo na točku B, kojoj treba stabilizirati temperaturu. Čak i za točnija laboratorijska mjerenja dovoljno je u tu svrhu uzeti "termos-bocu" sa vodom i ledom u koju se uranja referentni (hladni) spoj termopara.



Slika 3.10. Diferencijalni termopar

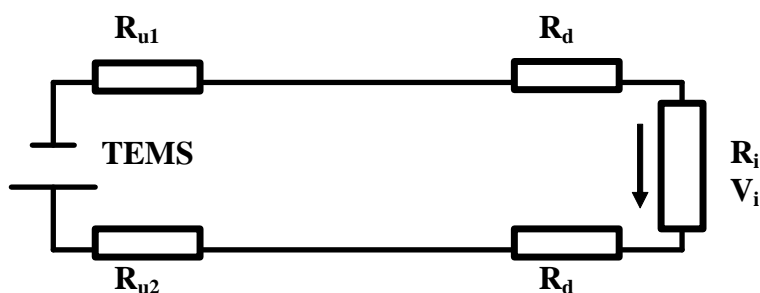
Ako se u jednu granu kruga ugradi mjerni instrument dodaje se krugu zapravo još jedna ili više grana. Instrument se kao dio kruga sastoji od različitih metala (npr mjedenih stezaljki, brončanih spiralnih opruga, bakrene zavojnice) koji čine dodatne spojeve metala. Da ne bi EMS ovih dodatnih spojeva utjecale na ukupnu TEMS termopara, potrebno je da budu zanemarive po iznosu ili pak suprotne po predznaku kako bi se kompenzirale. Praktički, jedini način uklanjanja ovih smetnji je zahtjev da svi metalni dijelovi instrumenta budu na jednoj temperaturi pa će dodatne EMS grane instrumenta biti jednake nuli.

Pored navedenog diferencijskog spoja termopara u praksi se primjenjuje i jednostavni spoj prikazan na slici 3.11:



Slika 3.11. Jednostavni termopar

Ovaj spoj nema izrazito referentno čvorište, već ga predstavlja cijeli mjerni instrument. Prema tome otpada praktički mogućnost stabilizacije referentne temperature termostatom, pa se ta izvedba primjenjuje za manje točna mjerenja. Pogreška pokazivanja ovisit će o promjenama temperature okoline. Obično su ovi instrumenti baždareni kod temperature okoline od 20 °C.



Slika 3.12. Nadomjesna električka shema

Općenito, promjena temperature okoline predstavlja za obje izvedbe termopara smetnju. Instrumentom prema slikama 3.11. i 3.12. u stvari se mjeri napon stezaljki, a ne TEMS termopara, jer pri konačnom otporu instrumenta krugom teče struja:

$$I = \frac{TEMS}{R_{u1} + R_{u2} + 2R_d + R_i} \quad (3.7)$$

- R_{u1} i R_{u2} - otpori žica termopara
- R_d - otpor spojnih vodova
- R_i - otpor instrumenta
- V_i - napon stezaljki instrumenta

Instrument pokazuje manju TEMS:

$$V_i = TEMS - I (R_{u1} + R_{u2} + 2R_d + R_i) \quad (3.8)$$

kao funkciju razlike temperatura za određeni termopar. Ukoliko se ne vodi računa o navedenome dobije se znatna negativna pogreška.

Može se izvršiti baždarenje instrumenta u °C, ali pri određenoj temperaturi okoline i pri konstantnom ukupnom otporu petlje, što se i događa kod tvorničkih izvedbi jednostavnih termometara s termoparom. Kod tako baždarenih termometara nije dopuštena nikakva promjena otpora kruga (npr. nestručno produžavanje ili skraćivanje spojnoga voda), a mjeriti treba pri temperaturi okoline na kojoj je termometar bio baždaren.

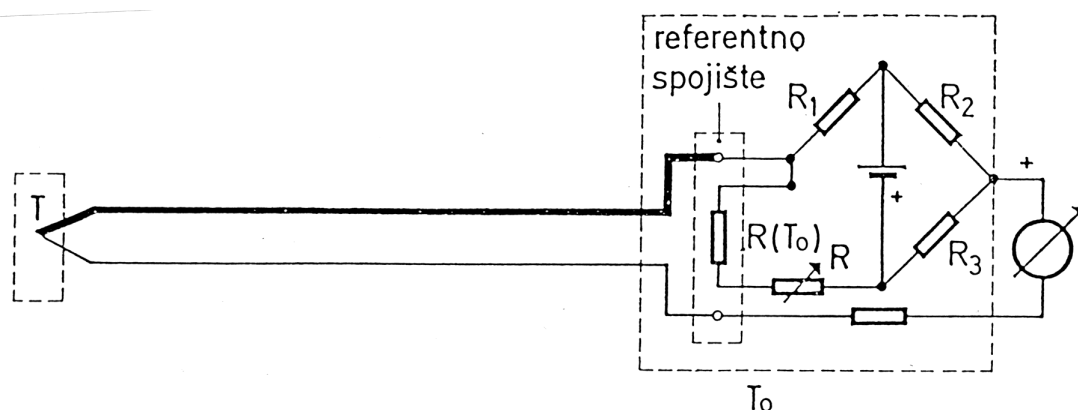
Postoje metode djelomične kompenzacije promjena temperature okoline, no njihovom se primjenom mogu samo ublažiti, a ne potpuno otkloniti navedene smetnje.

Jedini je ispravan način, kojim se u potpunosti mogu otkloniti smetnje izazvane promjenom temperature okoline, neposredno mjerenje "čiste" TEMS termopara metodom potpune kompenzacije, dakle primjenom kompenzatora za mjerenje EMS. Za vrijeme mjerenja metodom kompenzacije petljom ne teče nikakva struja pa je drugi član desne strane u jednadžbi (3.8) jednak nuli. Instrument pokazuje $V_i = \text{TEMS}$ bez obzira na veličinu otpora u petlji i njihovu ovisnost o bilo kojoj temperaturi.

Dakako, riječ je o automatskim kompenzatorima, složenim i preciznim instrumentima, koji se primjenjuju samo za mjerenje i regulaciju vrhunske točnosti.

Postoji čitav niz kompenzatora te namjene, poput potenciometrijskog kompenzatora s motornim pogonom, s fotoelementom, s induktivnom vezom, s magnetskim ili s elektroničkim pojačalom.

Napon kompenzatora treba da bude pomno stabiliziran i precizno određen. Kod vrlo točnih kompenzatora referentni napon daje posebno ugrađen Wheatstone-ov most.



Slika 3.13. Korekcijski most

Najvažniji termoparovi u široj primjeni su: željezo-konstatan (legura bakra, nikla i mangana), bakar-konstatan, platina/rodij-platina, nikal/krom-nikal. Svaki od ovih materijala pokazuje neka od svojstava koja ga čine prikladnim za određenu primjenu.

Važna je izvedba spojeva. Spojevi se izvode zavarivanjem, lemljenjem ili prešanjem.

Žice mogu biti izolirane prikladnim vatrostalnim materijalom. Pomoću zaštitnog tuljca štiti se mjerni spoj od okoline. Debljina žice za mjerni spoj prilagođava se primjeni. Pogreška mjerenja je znatno manja, a brzina odziva veća ako se koriste tanje žice.

Postoje i nemetalne termoparove koji služe za mjerenje vrlo visokih temperatura (npr. grafit-cirkonijev borid za mjerenja temperatura do 1800 °C, grafit-titanov karbid do 2500 °C). Uz sve svoje odlike nemetalni termoparovi se malo koriste jer su skupi, a postupak njihova baždarenja je složen. Isto tako jako su krhki, te je potrebno s njima postupati s posebnim oprezom.

3.2.2. Otpornički pretvornici temperature

Otpornički pretvornici temperature kao osjetilo imaju metalni ili poluvodički otpornik. Ovisnost otpora takva osjetila o prirastu temperature određuje se eksperimentom. Eksperimentalno dobivena ovisnost električnog otpora (R) o prirastu temperature (ΔT) opisuje se slijedećom jednadžbom:

$$R = R_0 \left[1 + \alpha \Delta T + \beta (\Delta T)^2 + \gamma (\Delta T)^3 + \dots \right] \quad (3.9)$$

Za većinu metala ta se ovisnost može prikazati slijedećim izrazom:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3.10)$$

gdje je:

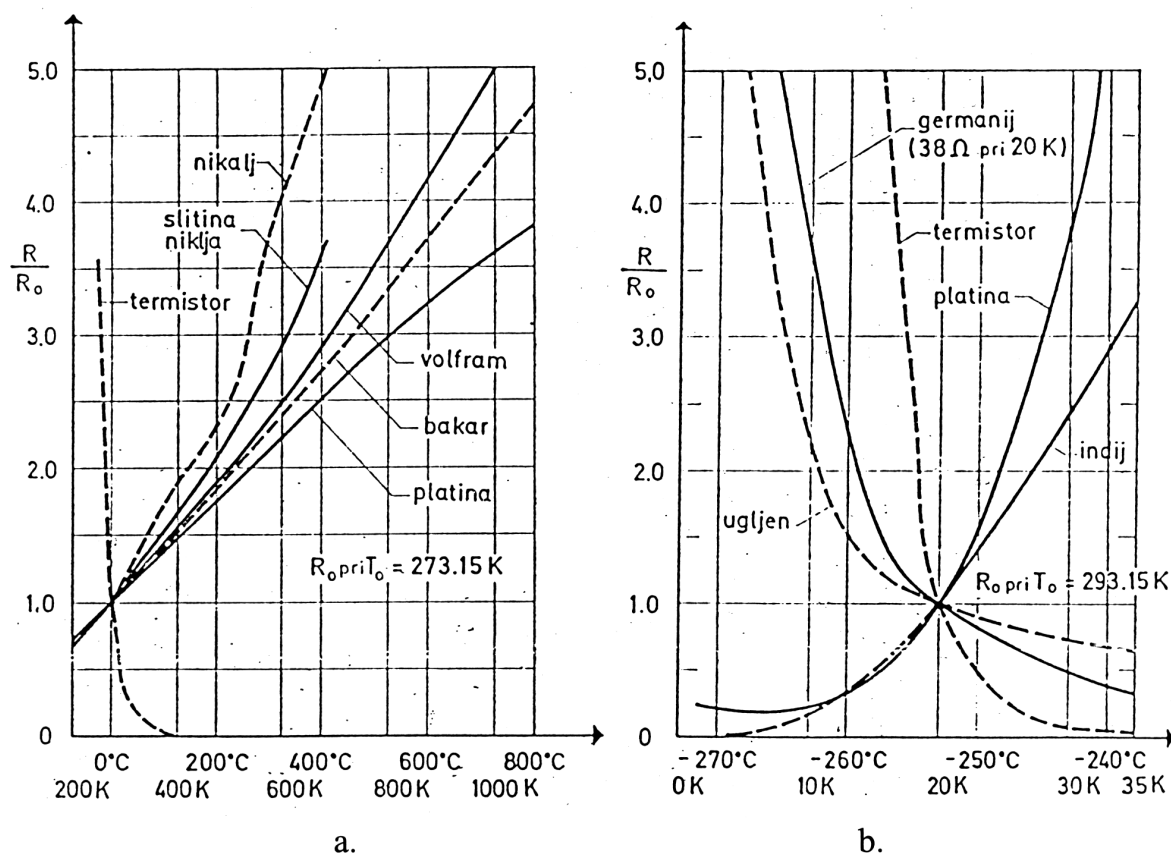
R_0 - otpor pri referentnoj temperaturi T_0

ΔT - $T - T_0$

T - mjerena temperatura

α, β, γ - temperaturni koeficijenti električnog otpora metala

Električni otpor poluvodičkih otporničkih osjetila (termistora, germanijevih i silicijskih kristala, ugljika) nelinearno opada s prirastom temperature.



Slika 3.14. Ovisnost električnog otpora o temperaturi: a. kod metala, b. kod poluvodiča

Promjena električnog otpora može se, dakle, smatrati mjerom temperature kojoj je otpornik izložen. Kao "pokazivalo" termootpornog termometra može poslužiti prikladni ohm-metar, baždaren u $^{\circ}\text{C}$. Termootporni termometri mogu mjeriti temperaturu na vrlo velike udaljenosti, no potreban im je poseban izvor za napajanje. Vrlo su prikladni za primjenu izmjerene vrijednosti u svrhu automatske regulacije.

S obzirom na mjerne metode električnog otpora, mogu se i termootporni termometri svrstati u pripadne grupe.

3.2.2.1. Slog neuravnoteženog Wheatstoneova mosta

Ova metoda ide u mjernu metodu direktnog otklona sa svim njenim nedostacima, pa se primjenjuje isključivo zbog jednostavnosti izvedbe. Slog je prikazan na slici 3.13. U jednu je granu mosta uključen otpornik R_t (osjetilo), koji se nalazi na mjernom mjestu, a spojen je preko dvožičnog voda na točke C i D mosta. Ovaj je otpornik specijalne izvedbe iz materijala sa znatnim temperaturnim koeficijentom otpora α , zaštićen metalnim ili keramičkim tuljcem protiv mehaničkih povreda i agresivnosti medija čiju temperaturu mjeri. Ostali su otpornici mosta temperaturno neovisni sa zanemarivim temperaturnim koeficijentom otpora (npr od konstanta).

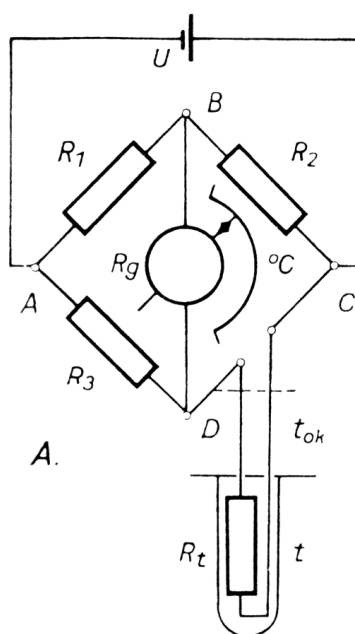
Ako je ispunjen uvjet ravnoteže mosta pri temperaturi osjetila (otpornika R_t), recimo od 0 °C tako da je:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_t \quad (3.11)$$

onda je struja kroz instrument $I_g = 0$. Ako je temperatura osjetila $T \neq 0$ °C. onda je R_t promijenio vrijednost po zakonu (3.7) koju je imao pri $T = T_0 = 0$ °C i narušio ravnotežu mosta, pa je sada:

$$I_g = U \frac{R_3 R_2 - R_1 R_t}{(R_1 + R_2) R_3 R_t + R_g R_3 + R_t + R_1 R_2 (R_3 + R_t)} \quad (3.12)$$

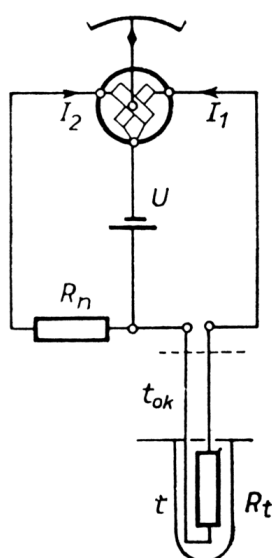
Struja koja teče tom prilikom kroz instrument ovisna je o otporu R_t osjetila. Kako se vidi iz izraza (3.10) ta je struja ovisna i o naponu napajanja mosta, pa ga je za tačnija mjerenja potrebno stabilizirati. Iz navedenih razloga ovaj spoj nema veliku praktičnu primjenu.



Slika 3.15. Slog neuravnoteženog Wheatstoneova mosta

Da bi se izbjegla kolebanja napona napajanja mosta treba primjeniti instrument s križnim svitcima čiji je otklon kazaljke α funkcija kvocijenta struja pojedinih svitaka. Kvocijent I_1/I_2 ostaje konstantan i uz kolebanja napona U jer je:

$$\alpha = f(I_1/I_2) \quad (3.13)$$

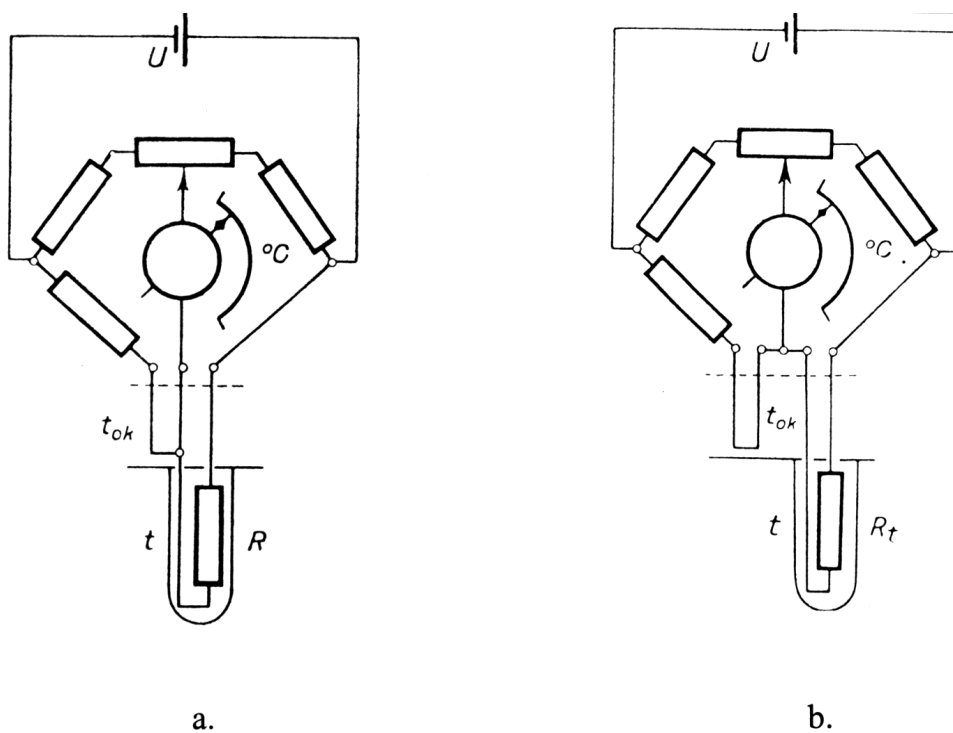


Slika 3.16. Mostni spoj s križnim svitcima

3.2.2.2. Spojni vodovi

Otpor spojnih vodova koji vežu osjetilo s mjernom granom mosta ubrajaju se u električnom smislu u ukupni otpor mjerne grane na koji most reagira. Ukoliko bi otpori ovih vodova bili zanemarivi prema otporu osjetila (praktički vrlo kratki) ili je zanemariva ovisnost njihovog otpora o temperaturi okoline, ne bi bilo nikakvih teškoća.

U praksi se to međutim ne događa, pa se valja pobrinuti da se navedene teškoće otklone. To se može postići trožičnim ili četverožičnim spojem osjetila s mostom. Bit zahvata je u tome da se otpori dovoda podjednako raspodijele u suprotne grane mosta, kako bi se njihov utjecaj kompenzirao.

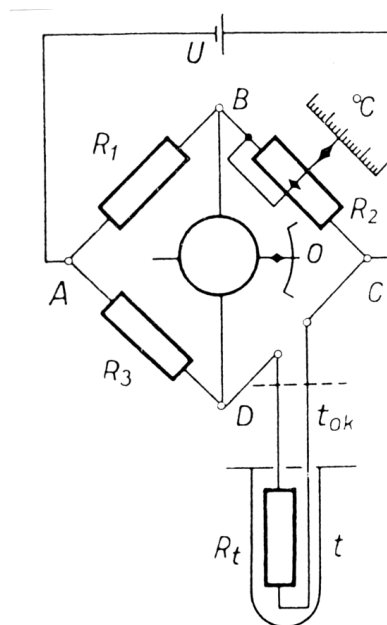


Slika 3.17. Spojevi termootpornih termometara: a. trožični, b. četverožični

3.2.2.3. Slog uravnoteženog Wheatstoneova mosta

Ovaj se slog odlikuje velikom točnošću mjerenja jer radi na principu mjerne metode kompenzacije (nul-metoda). Mjera je temperature pomak kliznika preciznog temperaturno neovisnog potencijometra R_2 u svrhu uravnoteženja mosta. Most je uravnotežen pri $T = T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, što se postiže sa $R_t = R_2$. Pri promjeni temperature osjetila mijenjat će se R_t . Da bi most i dalje ostao u ravnoteži potrebno je za iste iznose mijenjati i R_2 , dakako pomicanjem kliznika potencijometra, ručno ili automatski. Pošto je $R_t = f(T)$, a $R_t = R_2$ za slučaj ravnoteže, onda je $l = f(R_2)$ za slučaj linearnog potencijometra pa je u krajnjoj liniji $l = f_2(T)$, gdje je l pomak kliznog potencijometra.

Primjenom automatskog uravnoteženja mosta moguće je motorni pogon kliznika potencijometra koristiti za pomicanje pisaljke pisača ili pak za aktiviranje izvršne sprave regulatora.



Slika 3.18. Spoj uravnoteženog mosta

3.3. Pirometri zračenja

Poznato je da svako ugrijano tijelo neprestano zrači "toplinske zrake", u obliku elektromagnetskih valova, na račun svoje toplinske energije. Zračenje obuhvaća široki raspon infra-crvenog, vidljivog i ultra-ljubičastog spektra. Intenzitet zračenja na pojedinim valnim duljinama, kao i intenzitet ukupnog zračenja, na svim valnim duljinama, ovisi u prvom redu o temperaturi tijela, zatim o njegovom kemijskom sastavu, kao i o svojstvima površine tijela. Da se pojednostavi razmatranje tih pojava uvodi se pojam **apsolutno crnog tijela**. Pod tim se pojmom podrazumijeva tijelo čiji intenzitet zračenja ovisi samo o temperaturi tijela. Zakon raspodjele energije zračenja apsolutno crnih tijela u ovisnosti o valnoj duljini i temperaturi dao je Planck slijedećim izrazom:

$$M_{\lambda,T} = \frac{C_1}{\left(\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (3.14)$$

$M_{\lambda,T}$ - energija zračenja apsolutno crnog tijela na valnoj
dužini λ pri temperaturi T (W m^{-3})

C_1 - 1.191×10^{-16} (W m^2)

C_2 - 1.4388×10^{-2} (m K)

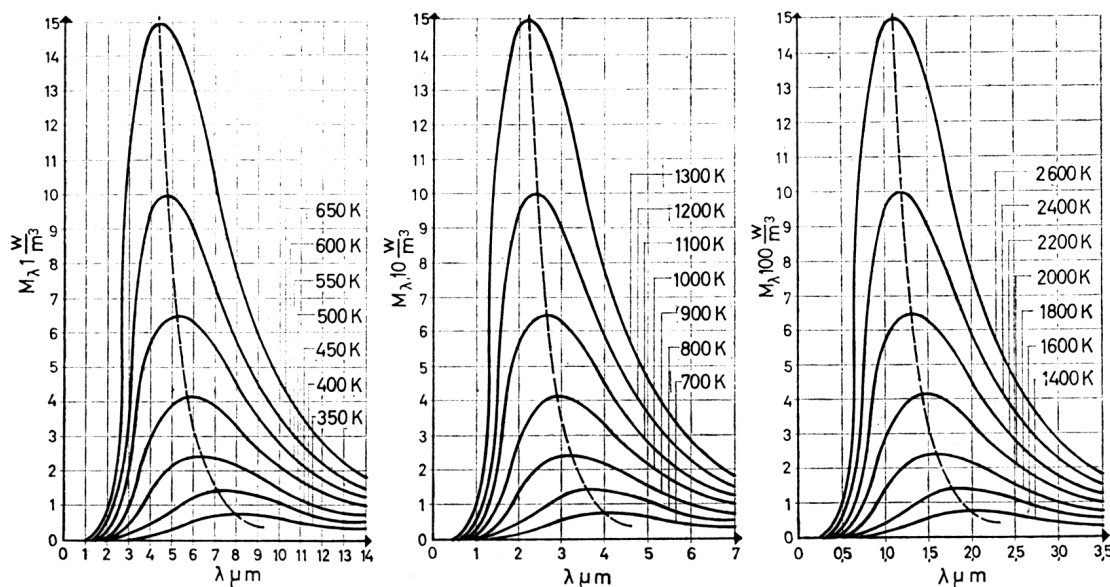
λ - valna dužina zračenja (m)

T - temperatura (K)

Raspodjela energije zračenja može se zorno prikazati prostornim modelom jer je ta energija funkcija dvaju promjenljivih veličina λ i T :

$$M_{\lambda,T} = f(\lambda, T) \quad (3.15)$$

Za grafički se prikaz zato uzimaju pojedine temperature kao parametri:



Slika 3.19. Krivulje ovisnosti energije zračenja crnog tijela o valnoj dužini pri različitim temperaturama

Može se vidjeti nagli porast intenziteta zračenja s porastom temperature, koji poprima maksimum samo za jednu određenu malu valnu dužinu. Ti se maksimumi pomiču k manjim valnim dužinama s porastom temperature. Porast intenziteta zračenja s porastom temperature odražava se i u vidljivom dijelu spektra. Okom se opaža da se tijelo jače osvijetli ako je na višoj temperaturi tj. da su mu sjaj ili jarkost veći ako je jače ugriano. Ova se pojava može zapaziti tek kod viših temperatura ($> 500^\circ\text{C}$).

Iz ovoga se može zaključiti da intenzitet zračenja na nekoj određenoj valnoj dužini u vidljivom spektru može biti mjera temperature. Na toj se pojavi osniva rad i konstrukcija optičkih pirometara. Oni mjere ili uspoređuju intenzitet zračenja ugrijanog tijela u području vidljivog spektra točno na valnoj dužini $0.65 \mu\text{m}$ koja odgovara crvenom svjetlu preko crvenog filtra. Integriranjem Plankova zakona po λ u granicama od 0 do ∞ dobije se Stefan-Boltzmannov zakon:

$$M_T = \sigma T^4$$

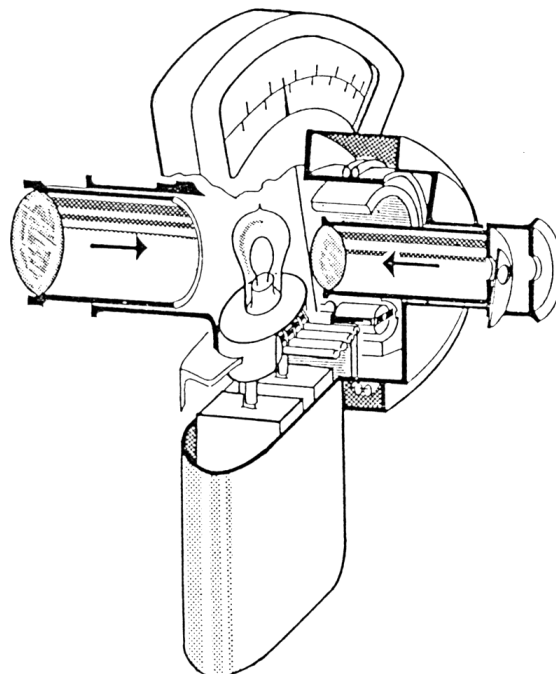
(3.16)

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-2}$

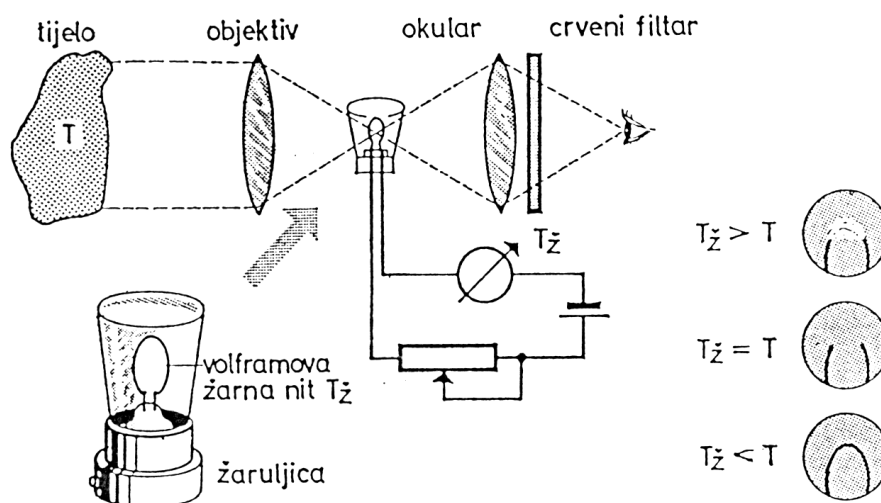
Vidi se da ukupna energija zračenja, na svim valnim dužinama koja raste sa četvrtom potencijom temperature tijela, može biti mjerom njegove temperature. Na ovom se zakonu temelji rad i konstrukcija radijacijskih pirometara.

3.4. Optički pirometri

Ako dva užarena tijela, promatrana kroz crveni filtar, imaju jednaki intenzitet sjaja onda su im i temperature jednake. To se dakako odnosi na apsolutno crna tijela. Na toj osnovi rade optički pirometri.



Slika 3.20. Optički pirometar



Slika 3.21. Načelo djelovanja optičkog pirometra

Promatranjem ugrijanog tijela, kroz optički sustav, sličan dalekozoru, uspoređuje se svjetlina niti žarulje sa svjetlinom užarenog tijela T . Ako je temperatura niti žarulje T_z niža od temperature tijela T onda se silueta niti ocrtava na slici tijela kao tamnija crta na svijetlijoj pozadini. Kada se izjednači temperatura niti sa temperaturom tijela onda se silueta stopi s pozadinom, nit se uopće ne primjećuje. Ako je temperatura niti viša od temperature predmeta onda se silueta niti ocrtava kao svjetlija crta na tamnoj pozadini. Mjerenje je dakle prilično subjektivno pa točnost ovisi o vještini onoga koji mjeri. Temperatura niti se može izračunati po struji koja ju žari. Ta je struja mjera temperature niti, a temperatura niti je mjera temperature tijela, kada je $T_z = T$. Struja se mjeri ampermetrom čija je skala označena u jedinicama temperature. Žarulja je specijalne izvedbe posebno baždarena za svaki pirometar. Promjena žarulje zahtijeva i korekciju skale.

3.5. Radijacijski pirometri

Ovi pirometri mjere ukupni intenzitet zračenja na svim valnim dužinama pa ne smiju imati nikakve selektivne filtere. Optičkim sustavom privede se jedan dio izzračene energije tijela u fokus pirometra pa se po temperaturi u fokusu na radnom čvorištu prikladnog termometra s termoparom zaključuje temperatura tijela. Ovdje se okom samo usmjerava pirometar prema tijelu a temperatura očitava na skali instrumenta baždarenoj u jedinicama temperature. Treba istaknuti da kod ovih termometara nije potrebno ostvariti fizički kontakt s tijelom čija se temperatura mjeri. Radijacijski pirometri mogu mjeriti i na velikim udaljenostima pa se u posebnim izvedbama upotrebljavaju kod mjerenja temperatura nebeskih tijela. Upotrebljavaju se i u metalurgiji. Područje primjene za optičke pirometre je od 500 °C do 2500 °C, a za radijacijske od - 80 °C do 5000 °C.

3.6. Pirometri boje

Poznati su i pod nazivom **kolor-pirometri** jer mjere "kolor-temperaturu" tijela. Ta je temperatura definirana odnosom intenziteta zračenja topline na dvije različite valne duljine. Taj odnos vrijedi i za realna tijela pa se mjerenje ne mora korigirati obzirom na stupanj crnine jer je takorekcija praktički zanemariva. Ovi se pirometri odlikuju većom točnošću, neovisnošću o dimenzijama i udaljenosti tijela, a u velikoj mjeri i o svojstvima tvari.

3.7. Indikatori temperature

- a. **segerovi stošci** - dok nisu bile razrađene točnije metode mjerenja visokih temperatura koristili su se stošci od raznih silikata pričvršćeni na tijelo čiju je temperaturu trebalo izmjeriti. Po omekšanju stošca zaključivalo se je o postignutoj temperaturi.

- b. boje osjetljive na temperaturu** - razne soli pojedinih metala mijenjaju boju u ovisnosti o temperaturi. Ova je pojava osnova **kontaktne termografije** tj. mjerenja temperaturnog polja raznih tijela koja su takvim bojama premazana.

3.8. Ostali mjerni pretvornici temperature

Akustični pretvornici temperature - rade na principu ovisnosti brzine širenja zvuka u plinovima o temperaturi ovisne gustoće plina

Pretvornik temperature s kvarcnim kristalom - kao osjetilo spojen u oscilacijski krug daje frekvenciju izlaznog signala ovisnu o temperaturi

Pretvornik temperature s titrajućom žicom - temelji se na ovisnosti frekvencije titranja žice o temperaturi

Elektrolitičko osjetilo temperature - temelji se na ovisnosti električnog otpora elektrolita o temperaturi

Induktivni pretvornik temperature

Kapacitivni pretvornik

4. MJERENJE PROTJECANJA

Protjecanje je gibanje fluida: kapljevina i plinova. Količina fluida što protječe u jedinici vremena je **protok**.

Volumni protok (q_v) - volumen tekućine što protječe u jedinici vremena.. Jedinica volumnog protoka je $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Maseni protok (q_m) - masa tekućine što protječe u jedinici vremena. Jedinica masenog protoka je kg s^{-1} .

Mjerni pretvornici protoka sadrže osjetila protoka koja djeluju na različitim principima.

4.1. Turbinski pretvornici protoka

Smjesti li se vijak s lopaticama (turbina) u cjevovod kojim protječe tekućina njegova brzina vrtnje (ω) ovisi o volumnom protoku:

$$\omega = \frac{\text{tg } \alpha}{(A_u + A_v)r} q \quad (4.1)$$

α - priklon lopatica s obzirom na smjer toka

r - srednji polumjer vijka s lopaticama

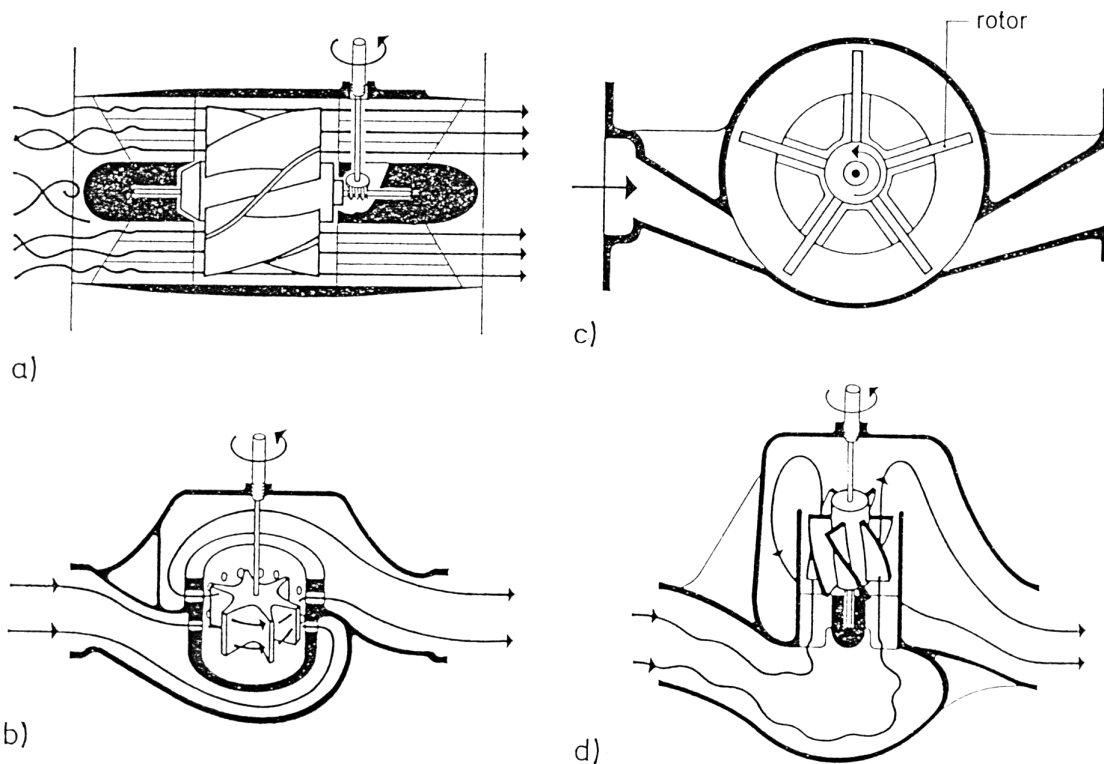
A_u - površina presjeka cijevi

A_v - najveća površina presjeka vijka

Praktički to je ovisnost: $\omega = k_d \times q$ pri čemu je k_d koeficijent koji cjelovito obuhvaća sve parametre što utječu na ovisnost brzine vrtnje vijka od protoka.

Vijak se smiješta u cijev od nemagnetskog materijala da bi se brzina vrtnje mogla mjeriti brojem prolaza lopatica kraj induktivnog osjetila ugrađenog u stijenku. Trenje, vrtloženje i poremećaji u brzinskom profilu unose znatnu pogrešku mjerenja, koju je moguće smanjiti

dobrom izvedbom i ugradnjom posebnog usmjernika toka. Usmjernici se izrađuju u obliku snopa cijevi ili u obliku prikladno raspoređenih rebara smještenih u cjevovod.



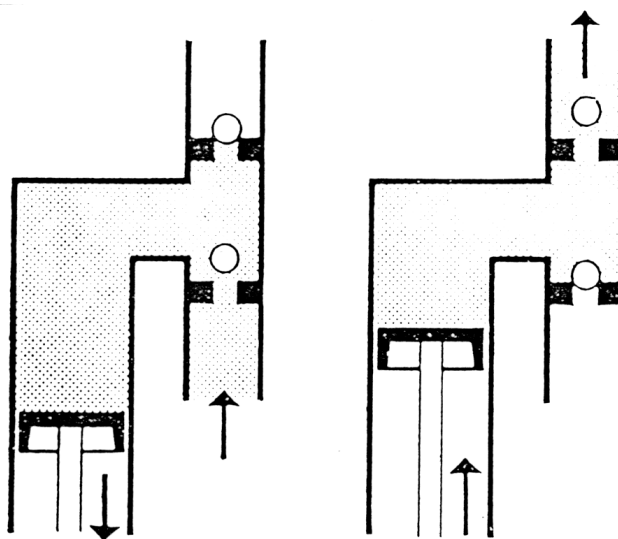
Slika 4.1. Turbinski pretvornici protoka

4.2. Potisni pretvornici protoka

Potisni pretvornici protoka djeluju kao pumpe pa se i izvode na sličan način pomoću stapa, vrtivih lopatica, dijafragme ili kao peristaltička pumpa. Pri djelovanju zahvaćaju s ulaznog dijela određeni obujam tekućine i ispuštaju ga na izlaznom dijelu, potiskujući ga. Pri tome se broji ukupna količina takvih radnih ciklusa i dobije se mjerni signal, koji je mjera ukupnog volumnog protoka. Taj se pretvornik često zove i **mjerna** ili **volumetrijska pumpa**.

Mogu se razlikovati dvije osnovne vrste potisnih pretvornika protoka prema tome da li su tjerani energijom mjerene tekućine ili pomoćnom energijom uz upotrebu električnog pneumatskog ili hidrauličkog motora.

4.2.1. Stapni potisni pretvornik protoka



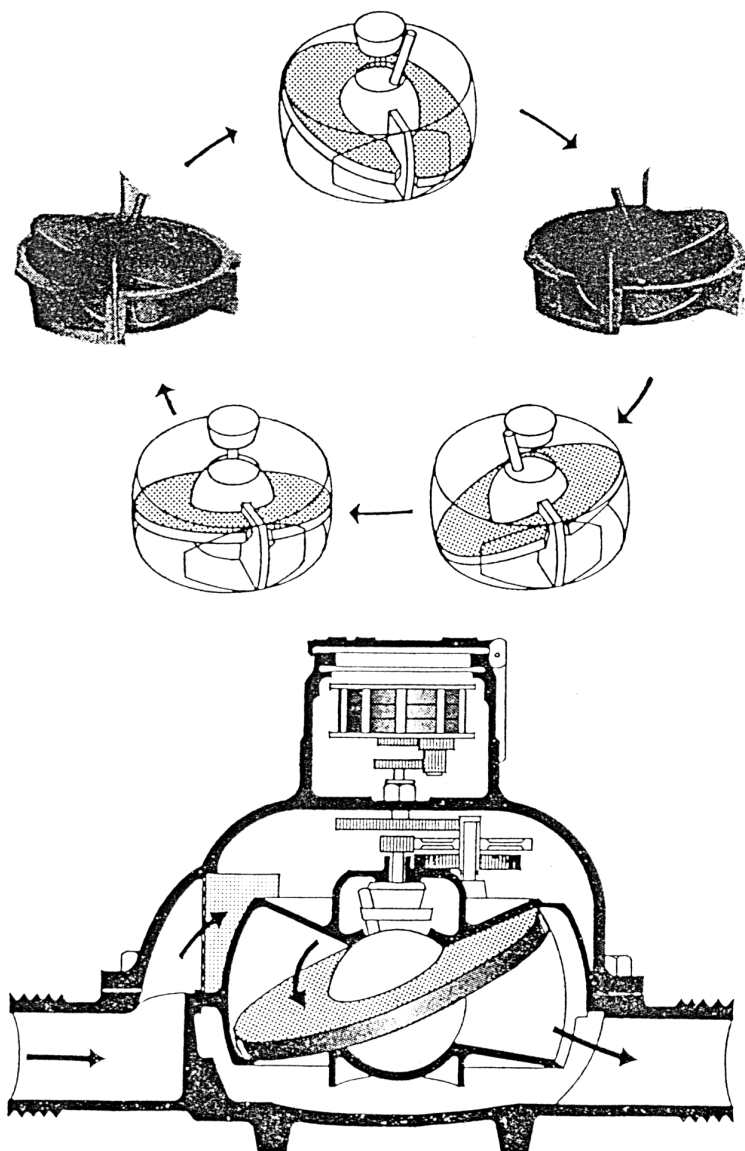
Slika 4.2. Stapni potisni pretvornik protoka

Pomicanjem stapa u jednom smjeru uvlači se tekućina iz ulaznog cjevovoda u stapni valjak, a zatim pri promjeni smjera gibanja stapa potiskuje u izlazni cjevovod. Pri tom se uvijek prenosi određeni obujam promjerom stapnog valjka i hodom stapa. Stapni potisni pretvornici protoka daju na izlazu pulzirajući protok i prikladni su za takve uvjete primjene u kojima treba potiskivati točno određenu količinu tekućine pod visokim tlakom.

4.2.2. Potisni pretvornik protoka s titrajućom pločom (Nutirajuća pumpa)

U kućištu ovog pretvornika nalazi se ploča koja se može gibati na točno predviđen način tako da tekućina koja dotječe ispunja prostor iznad ploče i prisiljava ploču na gibanje. Pri tom gibanju istiskuje se tekućina iz prostora ispod ploče u izlazni cjevovod, da bi ga zatim zauzela tekućina što je bila iznad ploče. Pri svakom se titraju ploče prenese određen

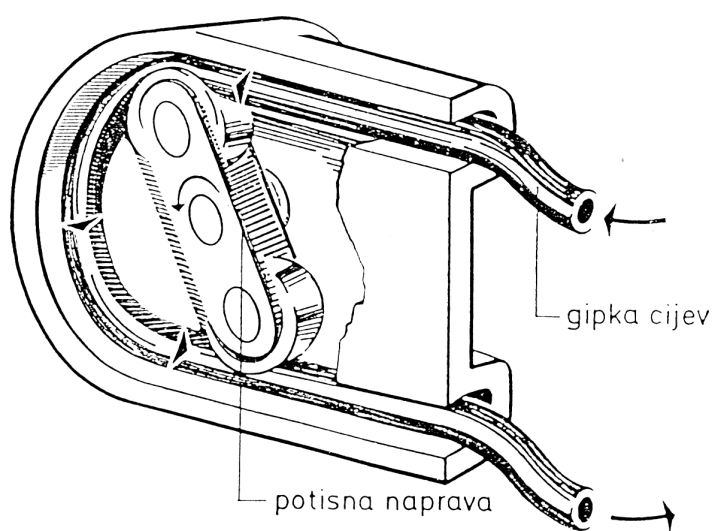
obujam tekućine, a broj titraja je mjera ukupnog protoka. Titrajno gibanje ploče je mirno i ne unosi pulsacije u izlazni tok.



Slika 4.3. Potisni pretvornik protoka s titrajućom pločom

4.2.3. Vrtivi potisni pretvornici protoka

Pri laboratorijskim mjerenjima protoka posebno je prikladna upotreba **peristaltičke pumpe**. Tekućina se obično tjera kroz plastičnu cijev i ne dolazi u dodir s potisnom napravom koja proizvodi mjereni protok. Ta se naprava izvodi na više različitih načina, a u svakoj se izvedbi tekućina potiskuje danom dužinom cijevi.



Slika 4.4. Peristaltička pumpa

4.3. Pretvornici protoka s osjetilima na osnovi svojstava tekućina

U ovu skupinu spadaju: toplinski pretvornik protoka, elektromagnetski pretvornik protoka, ionizacijski pretvornik protoka, ultrazvučni pretvornik protoka i dr.

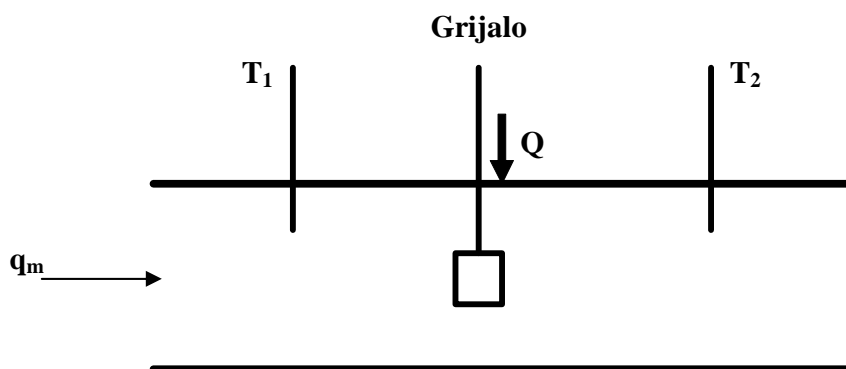
4.3.1. Toplinski pretvornici protoka

Razvrstavaju se u dvije osnovne skupine. Jedna se temelji na ovisnosti protoka i topline predane tekućini, a druga na ovisnosti koeficijenta prijenosa topline s grijala na tekućinu o protoku.

Pretvornik izveden na prvom načelu zove se **Thomasov pretvornik**. U cjevovod kojim protječe tekućina dovodi se konstantna količina topline Q . Mjeri se razlika temperature ispred i iza grijala. Maseni protok je dan izrazom:

$$q_m = \frac{Q}{c_p (T_2 - T_1)} \quad (4.2)$$

Za točan rad pretvornika važna je stalnost specifične topline mjerene tekućine, a također se pretpostavlja da su gubici topline zanemarivi.



Slika 4.5. Načelo djelovanja Thomasova pretvornika

Pretvornik izveden na drugom principu zove se **termoelektrični pretvornik protoka**. Ovisnost koeficijenta prijenosa topline s grijala na tekućinu složenija je nego kod predhodnih pretvornika. Nelinearna je i ovisi od toplinske vodljivosti, viskoznosti, specifične topline i načina protjecanja (laminarni ili turbulentni tok):

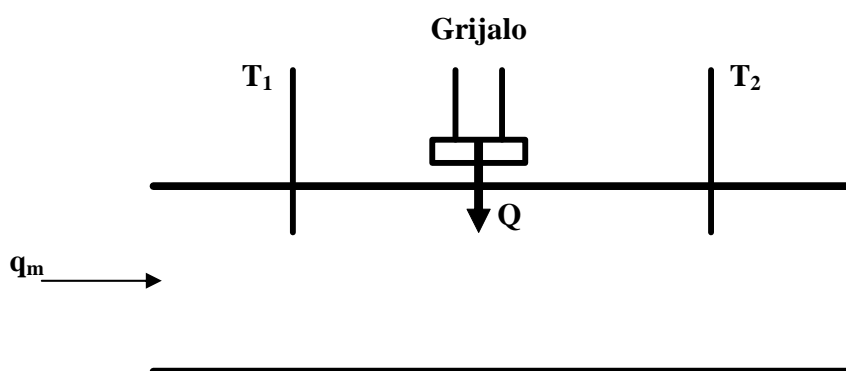
$$h = c_2 c_p^m k^m \mu^{m-n} q_m^2 (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

c_2 - konstanta ovisna o izvedbi

n - konstanta (za laminarni tok iznosi 0.33, a za turbulentni 0.8)

m - konstanta jednaka 0.03

- k - toplinska vodljivost tekućine
 c_p - specifična toplina tekućine
 μ - viskoznost tekućine



Slika 4.6. Načelo djelovanja termoelektričnog pretvornika protoka

4.3.2. Elektromagnetski pretvornik protoka

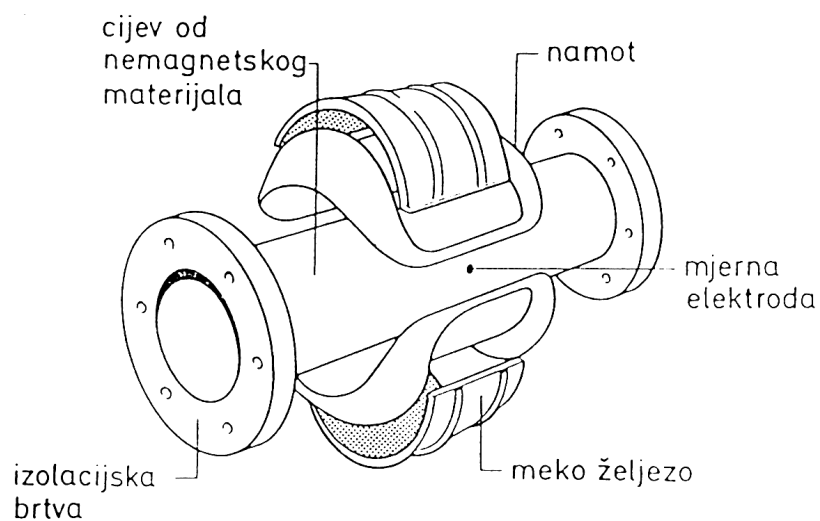
Služi za mjerenje protoka električkovodljivih kapljevina. Djeluje na načelu Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije prema kojemu je elektromotorna sila inducirana u vodiču što se giba kroz magnetsko polje razmjerna brzini promjene magnetskog toka. Sastoji se od para elektromagneta smještenih izvan cijevi i para elektroda što su u dodiru s kapljevnom. Elektromagnetsko polje proizvedeno elektromagnetima okomito je na smjer protjecanja kapljevine, a elektrode su smještene okomito na polje i na smjer protjecanja. Tako se na elektrodama javlja elektromotorna sila razmjerna brzini protjecanja kapljevine:

$$E = d \times B \times v \quad (4.4)$$

d - razmak između elektroda (unutrašnji promjer cijevi)

B - gustoća magnetskog toka

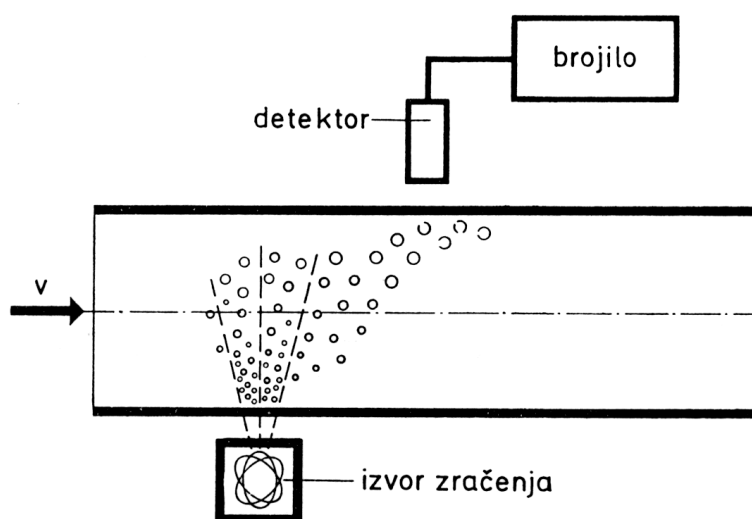
Elektromagnetski pretvornici protoka posebno su pogodni za mjerenje protoka talina, korozivnih kapljevina te kašastih i nečistih tvari.



Slika 4.7. Elektromagnetski pretvornik protoka

4.4. Ionizacijski pretvornik protoka

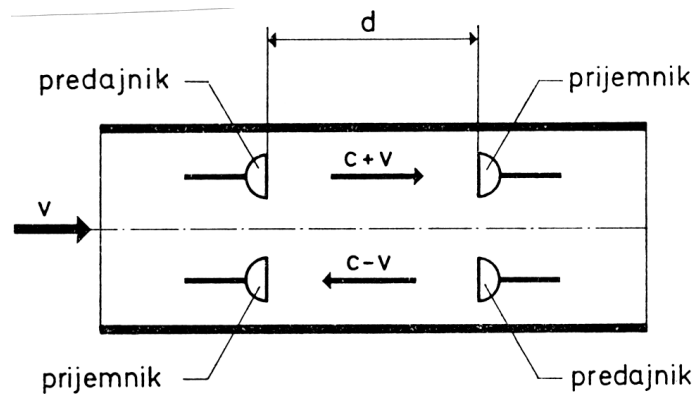
Ionizacijski pretvornik protoka sastoji se od izvora zračenja i detektora zračenja. Primjenjuje se za mjerenje protoka tekućina promjenljivog sastava, kašastih i nečistih tvari, te suspenzija.



Slika 4.8 Ionizacijski pretvornik protoka

4.5. Ultrazvučni pretvornik protoka

Načelo rada ultrazvučnog protoka prikazano je na slici 4.9. Dva para pretvornika, predajnik i prijamnik, smješteni su i razmaknuti na udaljenosti d u tekućinu koja struji brzinom v .



Slika 4.9 Načelo rada ultrazvučnog pretvornika protoka

Brzina emitiranog akustičnog vala je c , pa se trajanje putovanja akustičnog vala niz struju dobije kao omjer puta i zbroja brzina:

$$t_A = \frac{d}{c + v} \quad (4.5)$$

a uz struju kao omjer puta i razlike brzina:

$$t_B = \frac{d}{c - v} \quad (4.6)$$

Razlika trajanja je vrijeme:

$$\Delta t = t_B - t_A = \frac{2dv}{c^2 - v^2} \quad (4.7)$$

razmjerno brzini protjecanja. Ako je v mnogo manji po vrijednosti od c , tada se može približno uzeti $\Delta t \approx \frac{2dv}{c^2}$ i odatle:

$$v \approx \frac{c^2}{2d} \Delta t \quad (4.8)$$

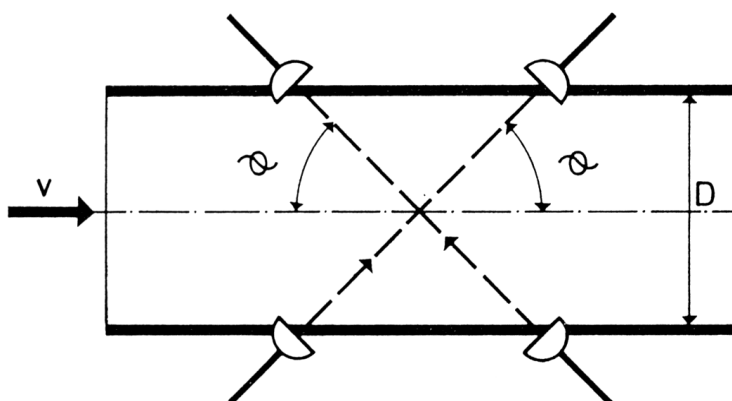
Prenosi li se sinusni zvučni val frekvencije ω , tada će između valova što se prenose u smjeru toka i suprotnom smeru nastati fazna razlika:

$$\varphi = \omega \Delta t \approx \frac{2dv}{c^2} \omega \quad (4.9)$$

Ova se pojava može iskoristiti kao osnova mjerenja.

U cjevovodima, u kojima se ne želi neposredan dodir pretvornika s tvari, postavljaju se pretvornici izvan cijevi križno prema slici 4.10. Tada je

$$\Delta t = \frac{2Dv \operatorname{ctg} \vartheta}{c^2 - v^2 \operatorname{ctg}^2 \vartheta} \quad (4.10)$$



Slika 4.10. Načelo rada ultrazvučnog pretvornika protoka s predajnikom i prijemnikom izvan cijevi

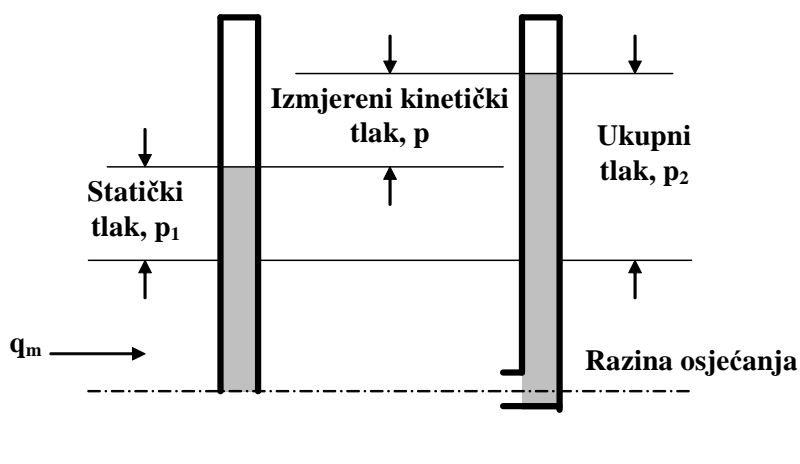
Postoje brojne izvedbe ultrazvučnih pretvornika i primjena im je različita i široka npr. u medicini za mjerenje protoka krvi u arteriji. Kao osobito dobra svojstva ističu se visoka točnost, brzi odziv, linearnost, prikladnost upotrebe za različite tekućine, mogućnost mjerenja dvosmjernij i pulsirajućih protoka.

4.6. Osjetila brzine protjecanja

Ova skupina posebno je važna za laboratorijska ispitivanja u hidrodinamici i aerodinamici.

4.6.1. Pitotova cijev

Brzina protjecanja tekućine mjeri se na temelju razlike statičkog i kinematičkog tlaka. To je razlika tlaka između nekog mjesta u cijevi u smjeru toka i tlaka uz stijenku cijevi okomito na tok.



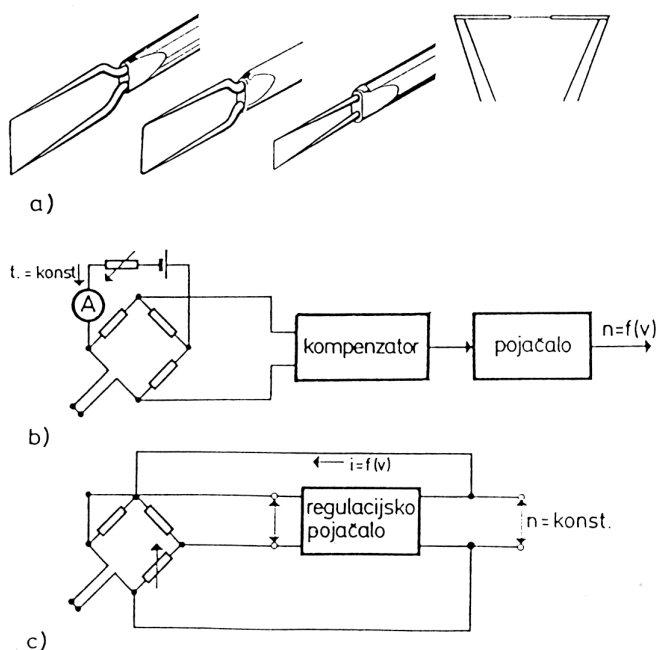
Slika 4.11. Načelo djelovanja Pitotove cijevi

4.6.2. Anemometar s vijkom

Za mjerenje brzine strujanja često se upotrebljava pretvornik s vijkom koji se zove **anemometar s vijkom**. Vijak se vrti brzinom proporcionalnoj brzini strujanja zraka (npr. vjetra) pa u slogu s prikladnim pretvornikom brzine vrtnje daje primjereni električni mjerni signal.

4.6.3. Otpornička osjetila brzine strujanja

Pri preciznim laboratorijskim mjerenjima posebnu važnost imaju **otpornička osjetila brzine strujanja** tzv. **anemometrijska osjetila s vrućom žicom**. To osjetilo je tanka žica pričvršćena tako da se njena toplina odvodi samo strujom mjerenog plina ili kapljevine. Ta odvedena toplina mjera je brzine strujanja. Žica osjetila grije se električnom strujom. Promjene njene topline uzrok su promjeni otpora, pa je kao mjerni spoj najprikladniji Wheatstoneov most. Most se može upotrijebiti tako da se u osjetilu održava konstantna struja ili konstantna temperatura.



Slika 4.12. Anemometrijska osjetila s vrućom žicom

5. MJERENJE RAZINE KAPLJEVINA, SIPINA I KRUTINA

Mjerenje razine kapljevina i krutina u spremnicima i posudama služi u osnovi kao mjera njihova volumena ili mase. Različite karakteristike tvari te različite posude i uvjeti u kojima se te tvari nalaze u ovim posudama čine katkada zadatak mjerenja razine vrlo složenim.

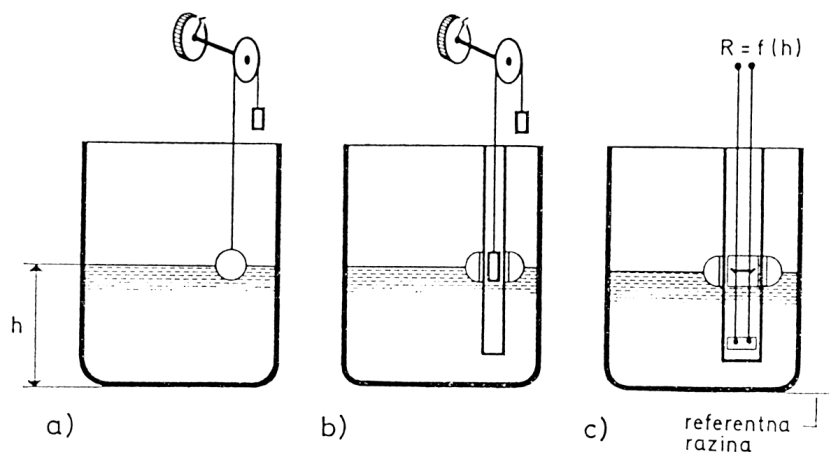
5.1. Mjerni pretvornici razine kapljevina

Upotrebljavaju se pretvornici za kontinuirano mjerenje razine i pretvornici što služe samo za dojavu određene razine. Obje ove vrste izvode se sa slijedećim vrstama osjetila:

- plovkom ili ronilom
- tlačnim osjetilom
- osjetilom sile
- električnim, kapacitivnim ili otporničkim osjetilom
- radioaktivnim osjetilima
- optičkim osjetilima
- toplinskim osjetilima
- zvučnim osjetilima

5.1.1. Mjerenje razine pomoću plovka i ronila

Plovak i **ronilo** su osjetila koja djeluju na načelu Arhimedova zakona. Plovak se izvodi od materijala manje gustoće od gustoće kapljevine pa pliva na površini slijedeći neprekidno njene promjene. Ronilo je izvedeno iz materijala veće gustoće od kapljevine pa je pri mjerenju uronjeno u kapljevinu. Ronilo ne slijedi neposredno pomake razine, već promjene razine djeluju na ravnotežu sila ronilo-pero. Pri tomu nastali pomaci ronila mjera su razine.



Slika 5.1. Pretvornici razine s plovkom

5.1.2. Mjerenje razine kapljevine pomoću hidrostatskog tlaka

Osnovna ovisnost na kojoj se temelji primjena ovih osjetila je:

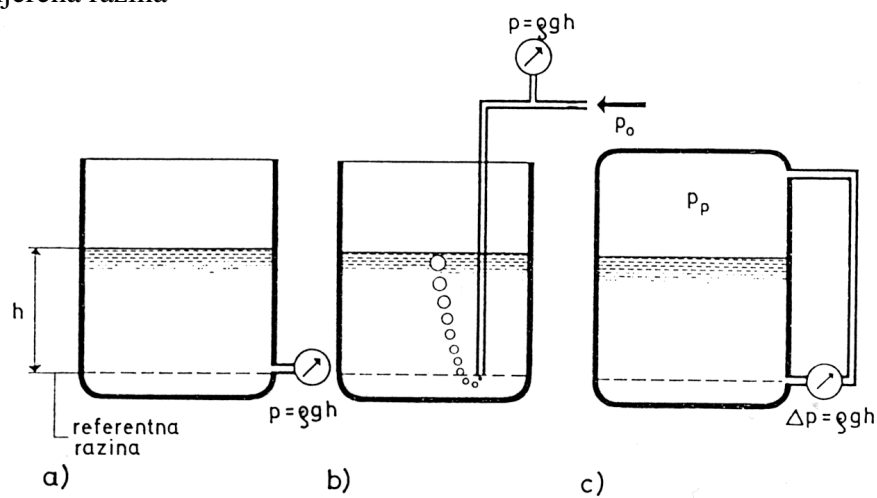
$$p = \rho g h \quad (5.1)$$

p - hidrostatski tlak na danoj referentnoj razini

ρ - gustoća kapljevine

g - ubrzanje Zemljine teže

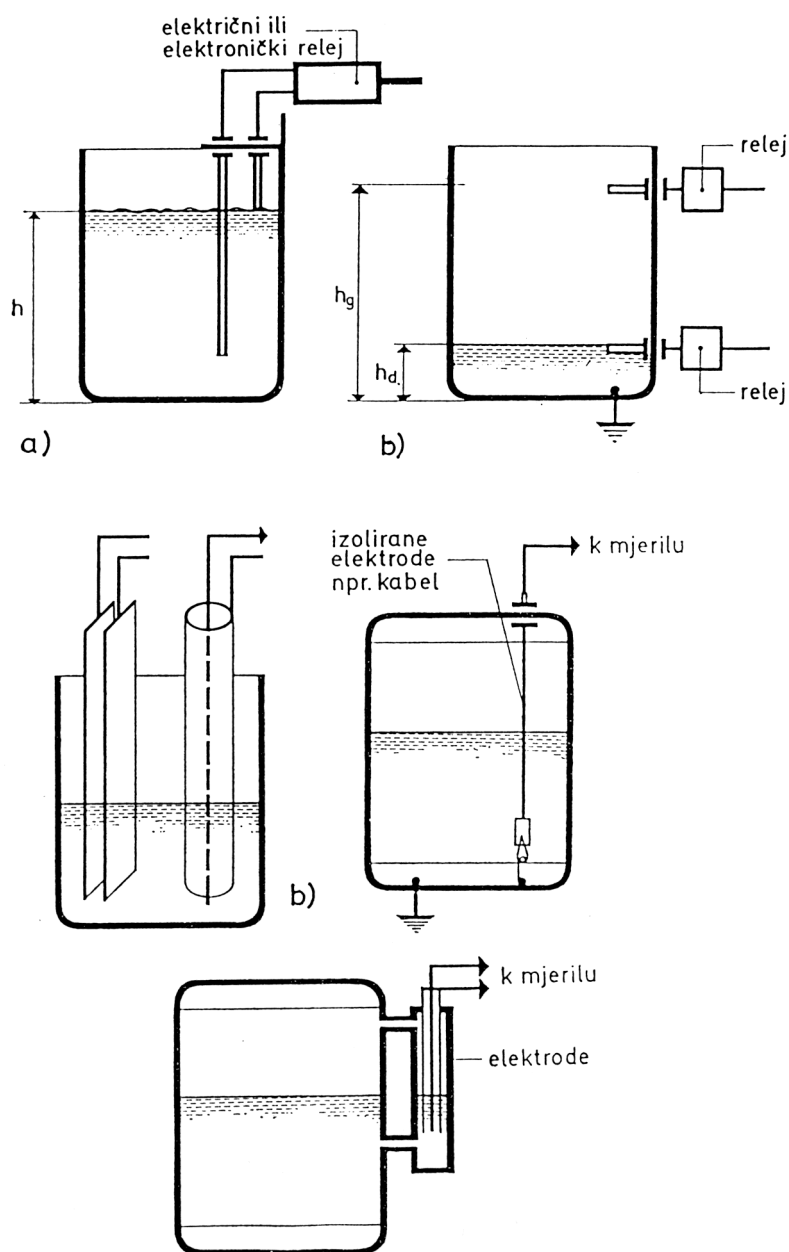
h - mjerena razina



Slika 5.2. Mjerenje razine kapljevine pomoću hidrostatskog tlaka

5.1.3. Električni pretvornici razine

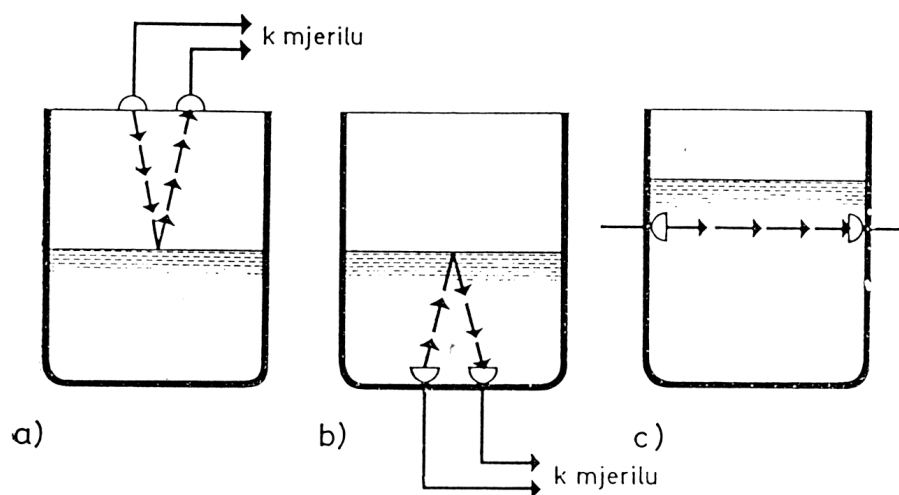
Izvide se na načelu promjene električnog otpora ili kapaciteta između elektroda uronjenih u kapljevinu.



Slika 5.3. Električni pretvornici razine

5.1.4. Ultrazvučni pretvornici razine

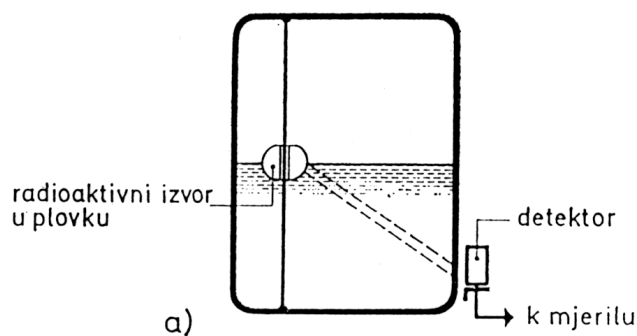
Potrebno je imati predajnik i prijamnik ultrazvuka. Trajanje putovanja zvučnog vala mjeri se razine.

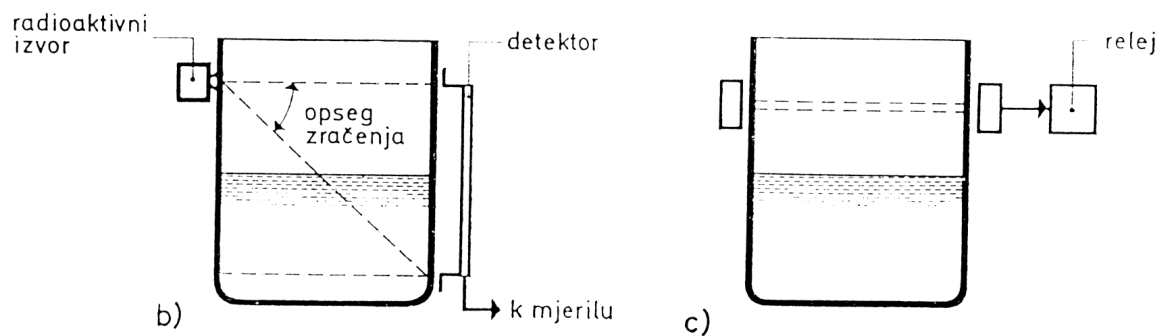


Slika 5.4. Ultrazvučni pretvornici razine

5.1.5. Radioaktivni pretvornici razine

Zrake iz prikladno smještenog izvora zračenja prolaze kroz posudu do detektora radioaktivnog zračenja. Što je razina viša, to je veća apsorpcija radioaktivnih zraka i signal na izlazu iz detektora je manji. Ovi pretvornici razine su prikladni za mjerenje različitih vrsta tvari i jedino se iz zdravstvenih razloga ne primjenjuju u prehrambenoj industriji.

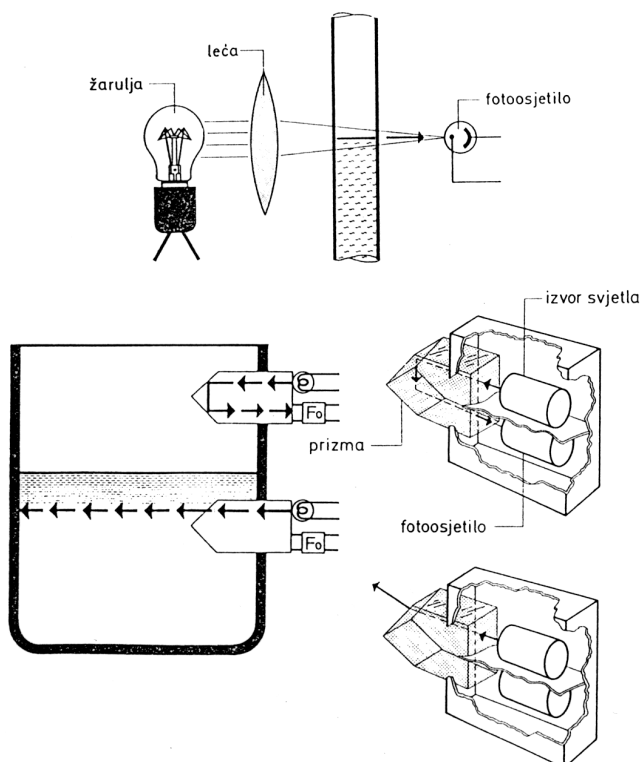




Slika 5.5. Radioaktivni pretvornici razine

5.1.6. Optički pretvornici razine

Princip rada se temelji na apsorpciji svjetlosnih zraka u kapljevini ili na refleksiji svjetlosnih zraka od površine kapljevine.

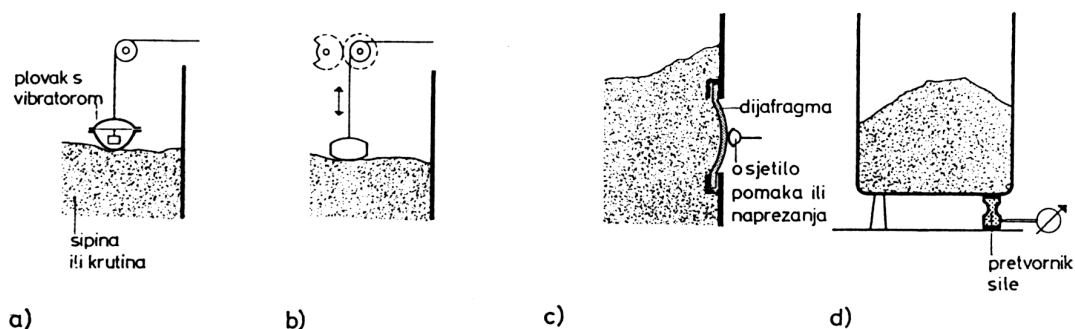


Slika 5.6. Optički pretvornici razine

5.1.7. Mjerni pretvornici razine sipina i krutina

Pri mjerenju razine sipina i krutina iskorištena su načela poznata pri mjerenju razine kapljevina, ali uz određene preinake ili usavršenja:

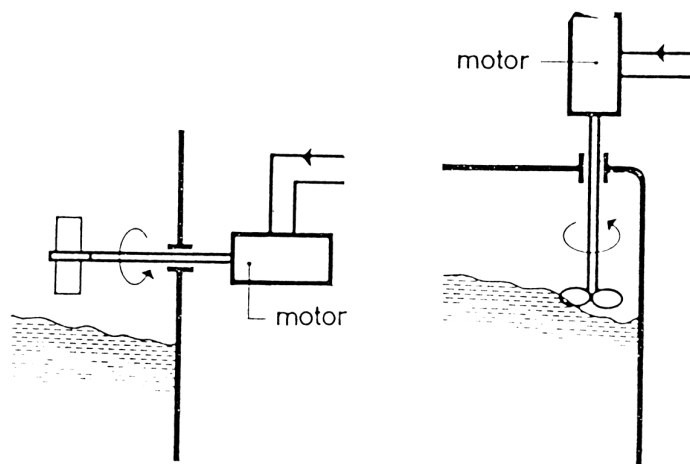
- u plovak se ugrađuje vibrator, pa neprekidne vibracije što ih proizvodi omogućuju plovku "plivanje" na površini materijala,
- plovak se može periodički dizati i spuštati do površine materijala,
- tlak materijala na metalnu dijafragmu ugrađenu u plašt spremnika ili posude kao osjetilo tlaka mjera je razine materijala,
- razina se može učiniti razmjerna težini, pa je spremnik oslonjen na pretvornik sile.



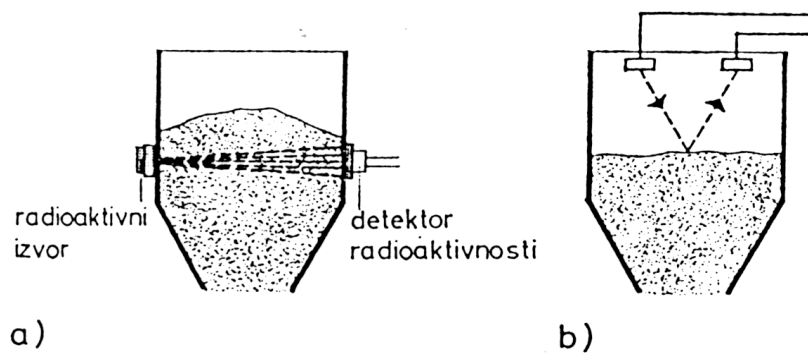
Slika 5.7. Pretvornici razine sipina i krutina

Razina sipina i krutina može se mjeriti uz pomoć vijka s lopaticama. Kada se vijak vrti u praznom prostoru snaga motora je mala. Raste li razina sipine i prekrije li vijak porasti će i potrebna snaga motora.

Pri mjerenju razine sipina i praškastih materijala u metalurgiji česta je i upotreba radioaktivnih i ultrazvučnih mjerila.



Slika 5.8. Pretvornik razine s vijkom



Slika 5.9. Mjerenje razine sipina i krutina uz pomoć radioaktivnog i ultrazvučnog pretvornika

LITERATURA

1. J. Božičević i surad., Tehnika mjerenja i automatskog reguliranja, Zavod za unapređenje stručnog obrazovanja SRH, Zagreb, 1969.
2. P.D. Eckman, Industrial Instrumentation, J. Wiley, New York, 1961.
3. P.J. O'Higgins, Basic Instrumentation, McGraw-Hill, New York, 1966.
4. J. Božičević, Temelji automatike 2, Mjerni pretvornici i mjerenje, Školska knjiga, Zagreb, 2000.
5. J.W. Dally, W.F. Riley, K.G. McConnell, Instrumentation for Engineering Measurements, J. Wiley, New York, 1993.
6. W. Altman, D. Macdonald, S. Mackay, Practical Process Control for Engineers and Technicians, Elsevier, London, 2005.