

FIZIKALNE MERITVE

M.I. Valič

VSEBINA PREDMETA 'FIZIKALNE MERITVE'

Osnove tehniških meritev:

- Pojmi in definicije: metrologija, veličine, enote
- Osnove merilnih naprav
- Napake in točnost merjenja

Osnove krmilne tehnike:

- Gradniki
- Odzivne funkcije
- Zaznamovanje veličin
- Krmilna zanka, krmilniki

Merjenje temperature:

- Definicija temperature, metode merjenja
- Tekočinski, plinski, bimetalni termometri
- Termoelementi, uporovni termometri
- Pirometri
- Merjenje toplotnega toka

Merjenje tlaka:

- Definicija tlaka
- Statični tlak, načini merjenja, kapljevinski in membranski barometri
- Dinamični tlak; načini merjenja, piezo-električna tipala

Merjenje pretoka in hitrosti fluidov:

- Osnove, pregled merilnih principov
- Pretočni merilniki: rotometri, anemometri
- Laserska anemometrija
- Merjenje hitrosti in prevožene poti na ladji
- Dopplerjev brzinomer

Merjenje slanosti:

Merjenje števila obratov:

- Osnove
- Tahometri

Zvok in hrup:

- Osnove, merjenja
- Izvori, slišno območje, proti-hrupna zaščita
- Veljavni predpisi

Vibracije:

- Osnove, izvori
- Merjenje vibracij
- Kontrola vibracij na ladji
- Veljavni predpisi

Merjenje moči - zavorni dinamometri:

- Osnove
- Absorpcijske zavore

Merjenje napetosti in sil v togih telesih:

- Merilni trakovi, princip meritve
- Primeri uporabe
- Optične meritve

Merjenje vlage:

- Definicije,
- Načini merjenja

Merjenje radioaktivnosti:

- Pojmi in definicije
- Merilci radioaktivnosti
- Veljavni predpisi

Analiza plinskih komponent:

- Merjenje koncentracij NO_x in SO_x
- Merjenje neizgorelih ogljikovodikov
- Merjenje koncentracij CO in CO_2
- Analizatorji O_2
- Merjenje koncentracij saj v dimnih plinih
- Merjenje koncentracije ozona

Izbrana poglavja iz senzorjev:

- Dajalniki pomika (lin. in rot. enkoderji)
- Laserski giroskop

LITERATURA

Dobovišek Ž.; Tehniške meritve v strojništvu

Likar M; Fizikalna merjenja

Kernev D; Ladijska elektrotehnika II

Prospektni material

JALIC M.: Fizikalne meritve (Skript. u pripravi)

Osnovni pojmi merilne tehnike

Merjenje

Če želimo dognati bistvo merjenja, poskušajmo odgovoriti na štiri načelna vprašanja:

1. Kaj je treba meriti?
2. Zakaj je treba meriti?
3. Čemu je treba meriti?
4. Kako je treba meriti?

Izhajamo iz nazornih in splošno znanih primerov vsakdanje rabe na različnih področjih.

Trgovina, oskrbovalni obrati:

Industrija, izdelovalni obrati:

Promet in transport:

Medicina, biotehnika:

Raziskovanje:

Odgovori na zastavljena vprašanja:

1. *Prvo vprašanje (po prednosti): Kaj je treba meriti?*

Določljive snovne lastnosti fizično obsoječega predmeta (objekta) po fizikalnih veličinah.

2. *Drugo vprašanje (po vzroku): Zakaj je treba meriti?*

Meriti je treba zato, ker potrebujemo o zanimajoči nas lastnosti merjenca kolikostne in objektivne podatke.

Drugače, da dobimo objektivni in ponovljiv podatek o velikosti, množini, jakosti fizikalnih veličin, kot so dolžina, čas, napetost, toki, moč ipd. **Izmerjena vrednost** naj bo dovolj blizu **resnične vrednosti**.

3. *Tretje vprašanje (po namenu): Čemu je treba meriti?*

Meriti je treba zato, da bi tako dobljene kolikostne in objektivne podatke o zanimajoči nas lastnosti merjenca lahko uporabili kot osnovo za pravilno odločitev.

Drugače povedano, največkrat zato, da imajo proizvodi ustrezno kvaliteto, da je poraba sredstev čim manjša in s tem finančni prihranek čim bolj velik, da dobimo podatke, ki jih potrebujemo za nadaljne odločitve, za pravilno ugotovitev cene posameznim proizvodom ipd.

4. *Četrto vprašanje (po načinu): Kako je treba meriti?*

Meriti je treba tako, da merjeno veličino postavimo kolikostno (kvantitativno) v razmerje z enoto veličine, ki ima enake fizikalne mere.

Glede na to, da prihaja pri vsaki meritvi do napake, moramo vedeti, kateri cilj želimo doseči in na kakšen način, še preden začnemo meriti. Pri tem je treba upoštevati: razpoložljivo opremo, zahtevano točnost, znanje izvajalcev meritev, potreben čas, vrsto merjene veličine, pogoje v katerih poteka meritve in druge posebne okoliščine.

Merjenje ni larpurlatizem ampak največkrat neizogiben člen za razvoj znanosti in tehnike. Avtomatizacije proizvodnih in drugih procesov si ni moč zamisliti brez merjenj. Merjenje je pravzaprav transformacija fizikalnih veličin v signale, ki nam omogočajo upravljanje. Zakonov narave ni mogoče odkriti brez sredstev za detekcijo in merjenja fizikalnih veličin. Znanstvene teorije niso sprejemljive brez zadržkov, dokler niso potrjene z meritvami.

Za pravilno odločanje med temi, večkrat nasprotujočimi se zahtevami, je potrebno razumeti, kaj se pri merjenju dogaja. Je merjena veličina stalna; želimo spoznati trenutne ali efektivne vrednosti; kakšno je območje merjene veličine? Skicirajmo vezje in razmislimo o vplivu priključitve instrumentov na merjeni objekt. Ne pozabimo na pogoje v katerih se nahaja merilna oprema. Ali še vedno veljajo deklarirani podatki pri dani temperaturi, vlagi, magnetnem polju, frekvenci ipd.?

Inženir ima pravzaprav več dela z meritvami še predno priključi prvi instrument. Zato je potrebno analitično mišljenje in temeljito poznavanje nekaterih elementarnih principov merjenja.

Merjenje je postopek, pri katerem primerjamo neznano vrednost neke fizikalne veličine z znano količino istovrstne veličine, ki se imenuje (merska) enota in nato ugotovimo, kolikokrat je izmerjena vrednost večja oz. manjša od enote. Recimo, da merimo padec napetosti U na nekem elementu in je izmerjena vrednost na primer

$$U = \{U\} [U] = 5 \text{ V}$$

U = vrednost električne napetosti

5 = mersko število

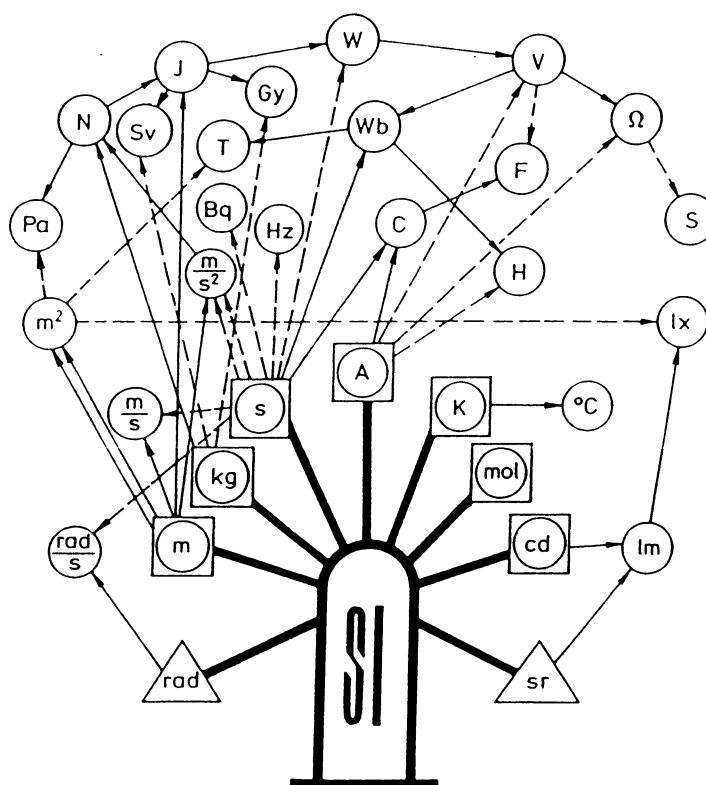
V (volt) = enota za električno napetost

Uporabljeni simbol (U) pomeni, da je efektivna vrednost napetosti 5-krat večja od volta. Včasih nas namreč zanimajo tudi kakšne druge vrednosti; trenutne (u), temenske (\mathcal{E}), srednje (\bar{U}) itn. Zato je treba izbrati iskani vrednosti ustrezen merilni instrument, ker en sam v splošnem ne omogoča ugotavljanje različnih parametrov merjene veličine.

Ob opravljeni meritvi efektivne napetosti z merilnim instrumentom se postavlja vprašanje ali je **izmerjena vrednost**, ki jo kaže instrument, res enaka dejanski vrednosti. Pri merjenju se ni mogoče znebiti pogreška, zato se izmerjena vrednost razlikuje od **resnične vrednosti** napetosti, to je tiste vrednosti, ki obstaja še predno smo priključili voltmeter v vezje. Če je merilna naprava dobra, lahko dosežemo, da izmerjena vrednost zelo malo odstopa od resnične vrednosti. Glede na prej omenjeni voltmeter rečemo, da je 5V **prava vrednost** izmerjene veličine. Resnične vrednosti se ne da ugotoviti. Za razumevanje, zakaj se izmerjena vrednost razlikuje od resnične, je na sliki 1 prikazana osnovna shema merjenja, ki je značilna za vsako merjenje.

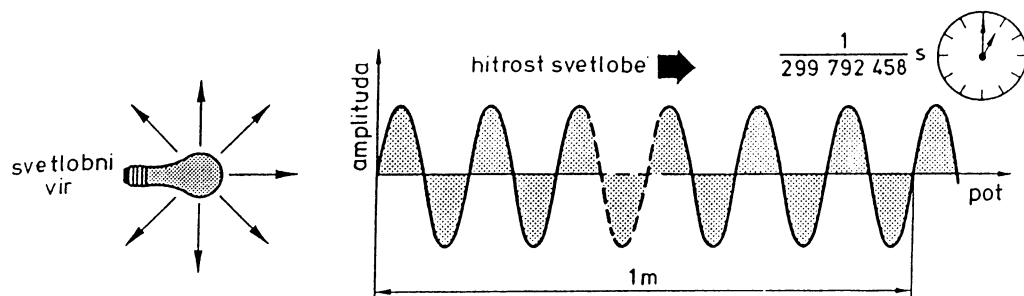
Osnovne enote

	fizikalne veličine		osnovna enota SI	
	ime	znak	ime	znak
1.	dolžina	$l, (L)$	meter	m
2.	masa	m	kilogram	kg
3.	čas	t	sekunda	s
4.	električni tok	I	amper	A
5.	termodinamična temperatura	T	kelvin	K
6.	svetilnost	I, I_v	candela	cd
7.	množina snovi	n	mol	mol

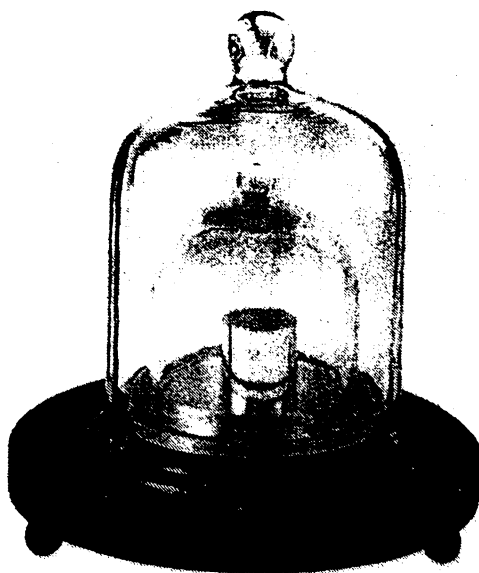


Drevo enot

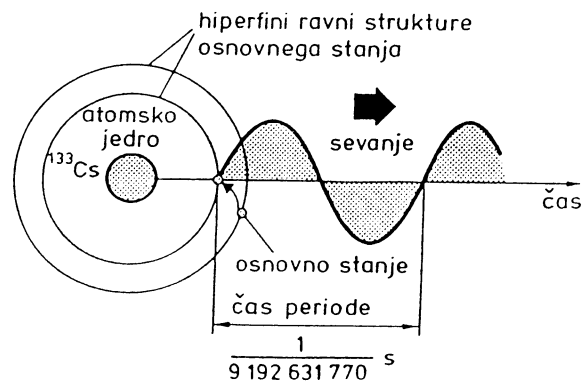
Definicije osnovnih enot



Določitev dolžinske enote



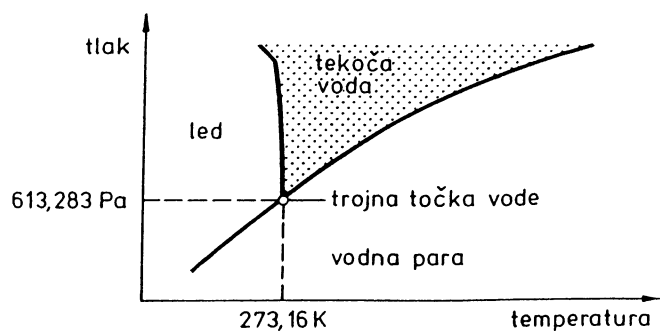
Mednarodni prototip kilograma za določitev mase



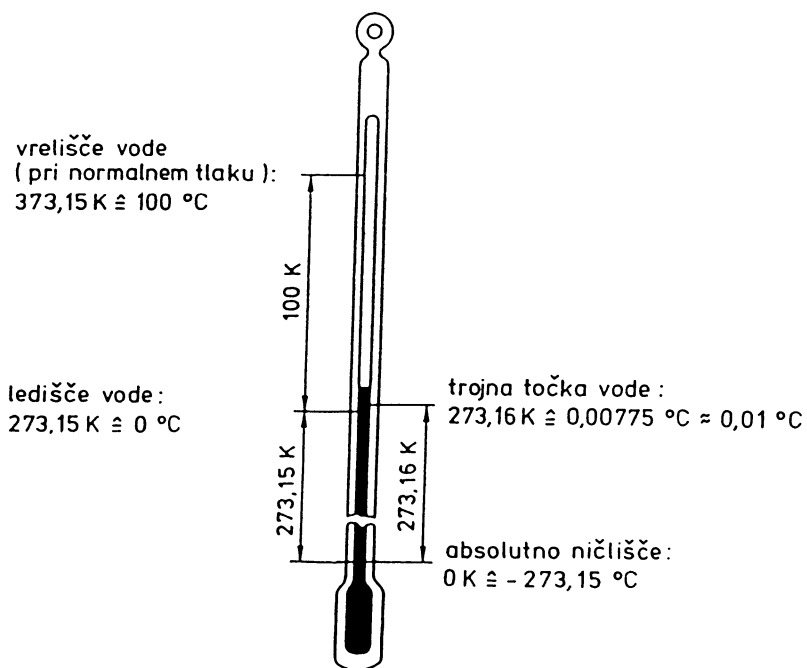
Določitev časovne enote 1 sekunda



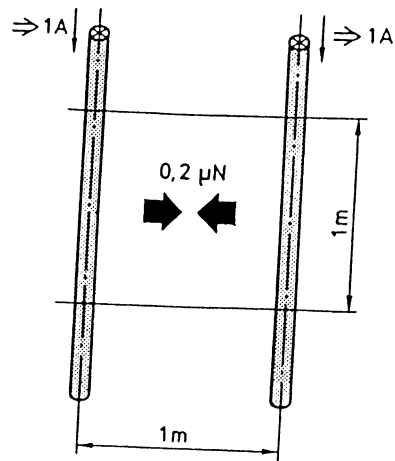
**Atomski uri CS 1 (levo) in CS 2 (desno) na
Fizikalno-tehniškem državnem zavodu v Braunschweigu (Nemčija)
za reprodukcijo časovne enote 1 sekunda**



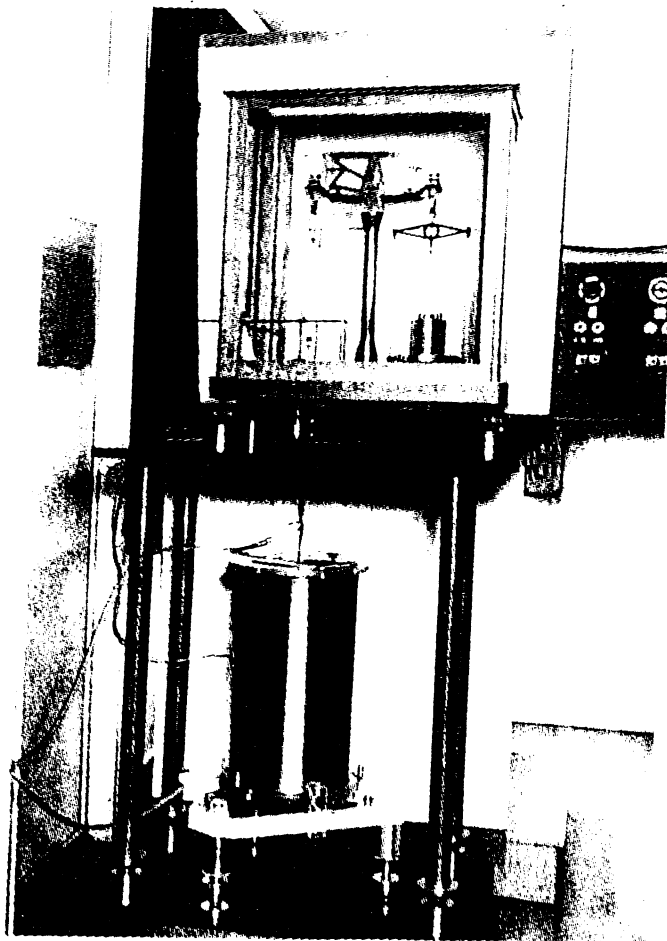
Določitev enote za (absolutno) temperaturo 1 kelvin



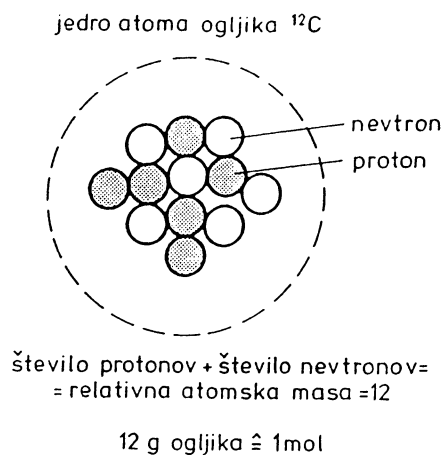
Absoultna temperaturna skala po Kelvinu



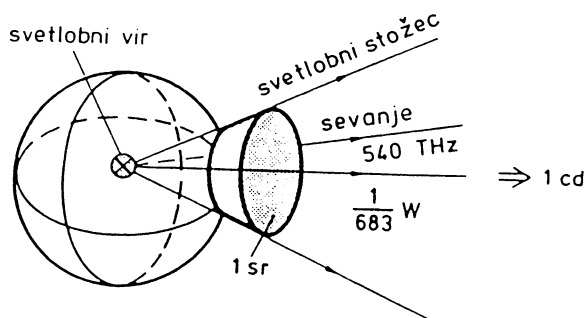
Določitev enote za električni tok 1 amper



'Tokovna tehtnica' na Fizikalno-tehniškem državnem zavodu v Braunschweigu (Nemčija) za reprodukcijo časovne enote za jakost električnega toka 1 amper



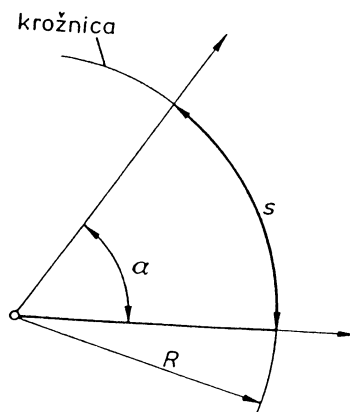
Določitev enote za množino snovi 1 mol



Določitev enote za svetilnost 1 kandela

$$\alpha = \frac{s}{R} = \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 1 \text{ rad}$$

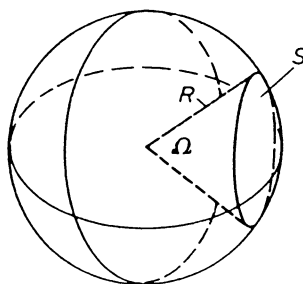
$$\dim \alpha = 1$$



Določitev enote za ravninski kot 1 radian

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ sr}$$

$$\dim \Omega = 1$$



Določitev enote za prostorninski kot 1 steradian

Merilni mostiči:

Na sliki 1 so prikazane različne variante Wheatstone-ovih mostičev. Varianta 1a je najbolj splošna. Z uporabo Kirchhoffovega drugega zakona za zanke $R_0 R_3 R_4$, $R_1 R_g R_3$ in $R_2 R_4 R_g$ dobimo:

$$E = (I_1 - I_2)R_3 + (I_1 - I_3)R_4 + I_1 R_0 \quad (1)$$

$$0 = I_2 R_1 + (I_2 - I_3)R_g + (I_2 - I_1)R_3 \quad (2)$$

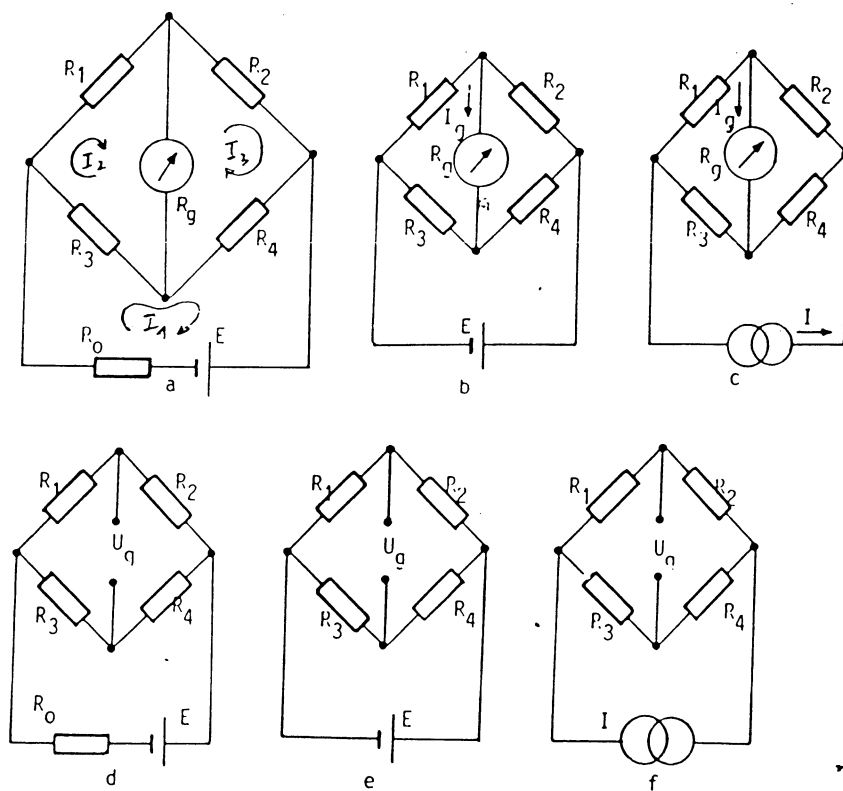
$$0 = I_3 R_2 + (I_3 - I_1)R_4 + (I_3 - I_2)R_g \quad (3)$$

Te enačbe se lahko uredi na naslednji način:

$$I_1(R_3 + R_4 + R_0) - I_2 R_3 - I_3 R_4 = E \quad (4)$$

$$I_1 R_3 - I_2(R_1 + R_3 + R_g) + I_3 R_g = 0 \quad (5)$$

$$I_1 R_4 + I_2 R_g - I_3(R_2 + R_4 + R_g) = 0 \quad (6)$$



Slika 1: Variante neuravnoteženih Wheatstone-ovih mostičev

Iz treh enačb (4,5,6) dobimo rešitev za tri neznane tokove I_1 , I_2 in I_3 (ki niso navedene). Iskani tok I_g skozi indikator v diagonali je:

$$I_g = I_2 - I_3 \quad (7)$$

in podan z enačbo:

$$I_g = \frac{E(R_1R_4 - R_2R_3)}{(R_1 + R_2)[R_3R_4 + R_g(R_3 + R_4)] + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_0[(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + R_g) + R_g(R_2 + R_4)]} \quad (8)$$

V praksi se večkrat koristijo razne variante neuravnoteženih mostov od katerih je nekaj variant prikazanih na slikah 1b-f.

Pri majhni notranji upornosti izvora, tj. pri uporabi napetostnega generatorja (slika 1b), kjer v enačbi (8) vstavimo $R_0 = 0$, je tok instrumenta:

$$I_g = \frac{E(R_1R_4 - R_2R_3)}{(R_1 + R_2)[R_3R_4 + R_g(R_3 + R_4)] + R_1R_2(R_3 + R_4)} \quad (9)$$

Drugi ekstremni slučaj v pogledu notranje upornosti izvora je napajanje mosta s tokovnim generatorjem (slika 1c). Če v enačbo (8) vnesemo tok generatorja $I = E/R_0$, dobimo, pri pogoju $R_0 \rightarrow \infty$, za tok I_g :

$$I_g = \frac{I(R_1R_4 - R_2R_3)}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + R_g) + R_g(R_2 + R_4)} \quad (10)$$

Če se kot indikator koristi visokoomski instrument, tj., če je upornost R_g mnogo večja od ostalih upornosti (slika 1d), je izhodna napetost:

$$U_g = \frac{E(R_1R_4 - R_2R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_0(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \quad (11)$$

Če se napajanje izvaja iz napetostnega izvora, $R_0 \approx 0$, (slika 1e), kar je v praksi pogost primer, dobimo:

$$U_g = E \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (12)$$

Pri napajanju s tokovnim generatorjem (slika 1f) je izhodna napetost mosta z visokoomskim instrumentom:

$$U_g = I_0 \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (13)$$

V vseh navedenih primerih je pogoj ravnovesja mosta enak:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (14)$$

Izrazi za izhodne signale (enačbe 8 do 13) so v vseh primerih nelinearne funkcije upornosti R_1 do R_4 , ker se upornosti R_1 do R_4 v vseh enačbah nahajajo tako v števcu kot v imenovalcu. Samo v primeru zelo majhnih sprememb upornosti se lahko izhodni signal smatra kot približno linearna funkcija.

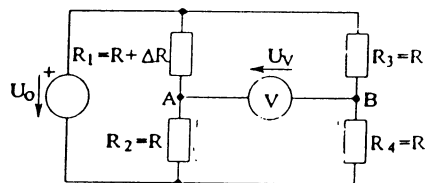
Vzemimo pogosto uporabljen primer (enačba 12). Pri meritvah se največkrat izbere enake upore: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ s čemer je most na začetku v ravnovesju in $U_g = 0$. Dajmo v eno vejo upor, ki se zaradi določenega vpliva (temperature, tlaka, obremenitve) malo spremeni, recimo $R_1 = R + \Delta R$ (slika 2, 1/4 most!).

Če to vrednost vstavimo v enačbo (12), dobimo

$$U_g = E \frac{R \Delta R}{(2R + \Delta R)(2R)}$$

ki se pri pogoju $\Delta R \ll R$ reducira na

$$U_g \doteq \frac{1}{4} E \frac{\Delta R}{R}$$



Slika 2: 1/4 W. most

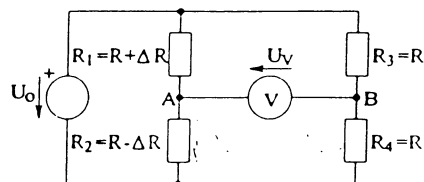
Pri pogoju $\Delta R \ll R$ je torej karakteristika 1/4 mosta linearna, tj. $U_g \propto \Delta R$.

Pri 1/2 polovičnem mostu se spreminjata upornosti sosednjih vej, npr. R_1 in R_2 vendar tako, da je vsota njunih uporov stalna (slika 3):

$$R_1 = R + \Delta R \text{ in } R_2 = R - \Delta R$$

Dobimo

$$U_g = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R}{R}$$



Slika 3: 1/2 W. most

Karakteristika je linearna, občutljivost 2x večja kot pri 1/4 mostu.

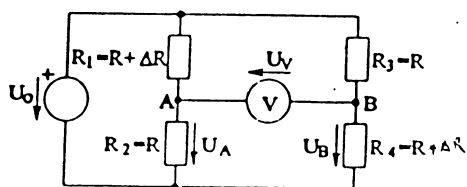
Pri 2/4 mostu se spreminjata upornosti v dveh nasprotnih vejah, npr. R_1 in R_4 vendar v istem smislu (slika 4).

$$R_1 = R + \Delta R \text{ in } R_4 = R + \Delta R$$

$$U_g = E \frac{2R \Delta R}{(2R + \Delta R)(2R + \Delta R)}$$

in pri $\Delta R \ll R$

$$U_g \doteq \frac{1}{2} E \frac{\Delta R}{R}$$

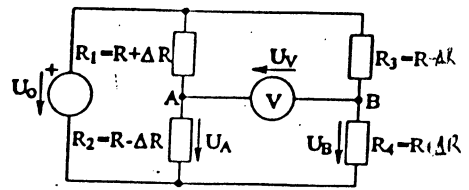


Slika 4: 2/4 W. most

Pri polnem 1/1 mostu se spreminjajo upornosti v vseh vejah vendar tako, da je (slika 5)

$R_1 = R + \Delta R$ in $R_4 = R + \Delta R$ ter $R_2 = R - \Delta R$ in $R_3 = R - \Delta R$

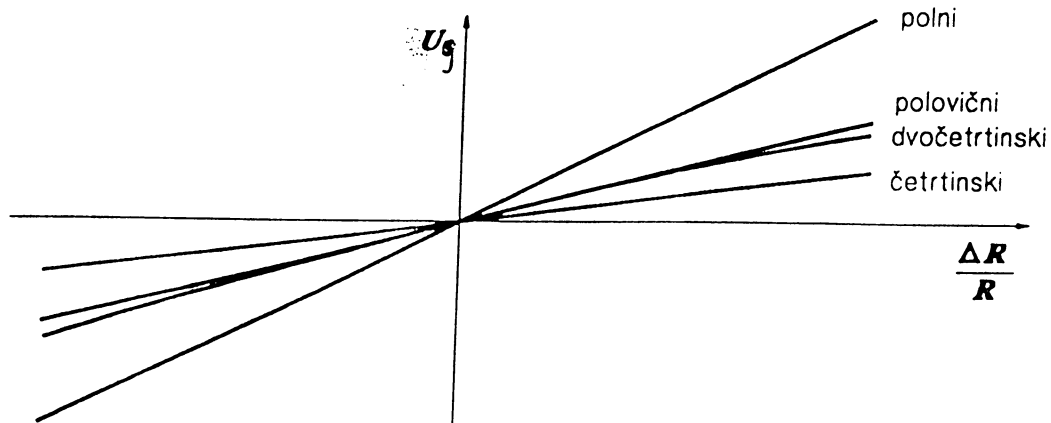
$$U_g = E \frac{\Delta R}{R}$$



Slika 5: 1/1 W. most

Karakteristika je linearna, občutljivost 4x večja kot pri 1/4 mostu.

Karakteristika za štiri primere je prikazana na sliki 6.



Slika 6: Karakteristika za četrtinski, dvočetrtinski, polovični in polni W. most

Merjenje temperature

1. Uvod

Definicija temperature ni enostavna. Predstavlja merilo energetskega stanja (kinetične energije) atomov in molekul v danem telesu. Temperatura T pri kateri bi vsi ti delci mirovali, se definira kot absolutna nula (0 K). Za definicijo temperaturne skale (in primerjavo energetskih stanj različnih teles) potrebujemo še eno fiksno temperaturo. Po mednarodnem dogovoru je to trojna točka vode, ki ima po definiciji vrednost 273.16 K. S tem je enota za temperaturo Kelvin (K), ki predstavlja 273.16-ti del termodinamične (TD) temperature trojne točke vode.

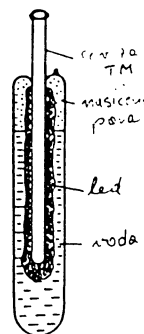
Po tej definiciji je Celzijeva stopinja ($^{\circ}\text{C}$) enaka Kelvinovi (K). Med njima pa obstaja zveza:

$$T = T - 273.15 \text{ K}$$

Temperatura trojne točke vode je izbrana za fiksno točko, ker se jo lahko realizira z veliko ponovljivostjo in brez težav.

Opomba 1: Prejšnji definiciji T-skale sta botrovali dve fiksni materialni točki; temperatura leda 0°C in temperatura vrelišča vode 100°C . Definicija te skale je vezana na lastnosti snovi in ne moreta služiti kot univerzalna enota. Ti dve temperaturi sta močno odvisni od zračnega tlaka, vlage in nečistoč in jih je praktično zelo težko realizirati. Po novi metodi je vrelišče vode za 0.026°C nižje od 100°C , trojna točka vode pa 0.01°C višja od 0°C .

Trojno točko vode se doseže s pomočjo zaprte steklene celice prikazane na sliki 1. Voda v posodi je kemijsko izredno čista in se dobi z večkratnim destiliranjem. Izotopski sestav mora ustrezati sestavu oceanske vode. V celico je aksialno postavljena cev v katero se vstavi termometer (TM), ki se ga umeri (kalibrira). Pred zaprtjem celice se s črpalko odstrani ves zrak, vodo privede do vrelišča in zapre. Pri neki ustaljeni temperaturi se vzpostavi ravnotežno stanje, kjer je para nad tekočino zasičena, njen tlak pa določen s T vode (in ne od drugih faktorjev, kot npr. atmosferski tlak).



Slika 1: Celica za realizacijo trojne točke vode

Za doseg trojne točke vode je potrebno, da se del vode zaledi. To se doseže tako, da se vnese v cevko suhi led (zamrznjen CO_2) za toliko časa, da del vode okrog cevke zamrzne. Suhi led se nato odstrani, v cevko pa postavi termometer, ki se ga kalibrira. Za boljši toplotni kontakt se v cevko ulije neka tekočina, običajno voda. Posodo s trojno točko se da v termostat z navadnim ledom, v katerem se trojna točka lahko vzdržuje cele mesece. V celotnem obdobju temperatura celice ne varira za več kot 0.0001 K . Z uporabo različnih celic se doseže ponovljivost 0.0002 K , kar predstavlja fiksno temperaturo v naravi z največjo ponovljivostjo. Z natančnimi meritvami se je dognalo, da temperatura trojne točke leda znaša 0.01°C odnosno 273.16 K .

2. Metode merjenja temperature:

- A. Kontaktne metode;
- B. Brezkontaktne metode.

Fizikalni procesi za kontaktne metode;

1. širjenje plinov
2. raztezanje kapljevih
3. širjenje pare
4. raztezanje togih teles
5. sprememba električnega upora
6. termoelektrični efekt

Fizikalni procesi za brezkontaktne metode;

1. emisija ali absorbcija toplotnega sevanja
2. sprememba gostote plina

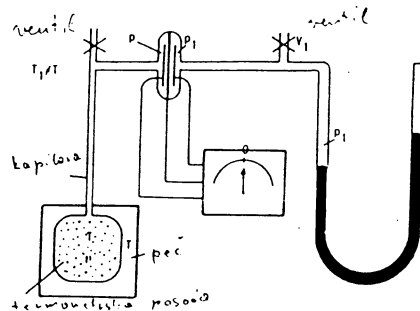
3. Termometri na principu širjenja plinov

3.1 Plinski termometer

Osnova: enačba plinskega stanja za realne pline

$$pV_m = RT + b(T)p + c(T)p^2 + \dots \quad V_m = V / n = \text{molarni volumen}$$

možnosti: termometer $V = \text{konst.}$ ali termometer $p = \text{konst.}$



Slika 2: Shema plinskega termometra konstantnega volumna

Področje merjenja: (3 do 1400) K

Posode: kvarc (do 1100 °C); zlitine Pt, Rh, Ir za vrhunske meritve

Plini: He (za nizke T), sicer N₂ ali Ar

Osnovne napake izvirajo iz merjenja p in V .

Sistematske napake:

- plin levo od pretvornika do posode je na drugi temperaturi;
- toplotno raztezanje in elastične deformacije posode;
- difuzija plinov skozi stene;
- adsorbcija plinov na stene.

Vse sistematske napake se lahko korigira in tako doseže vrhunska točnost. Primer uporabe v praksi so termoregulatorji v hladilnikih.

4. Termometri na principu raztezanja kapljev

Danes po številu in pogostosti uporabe še vedno na vodilnem mestu.

Osnova: volumski raztezek tekočine

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta l = \frac{\gamma V_0}{A_k} \Delta T = S \Delta T$$

kjer je $S = \frac{\gamma V_0}{A_k}$

A_k = presek kapilare

V_0 = volumen rezervoarja

γ = volumski koeficient širjenja ($^{\circ}\text{C}^{-1}$); ($\gamma_{\text{Hg}} = 18$, $\gamma_{\text{stek}} = 2$, $\gamma_{\text{alk}} = 110$) $\times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

S = občutljivost

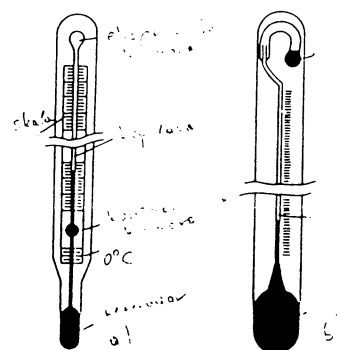
Skala TM je linearna. Iz gornje enačbe lahko izračunamo kako 'dolga' je $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Najprimernejša tekočina: Hg ($T_i = -38.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_v = +357 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Obseg uporabe: $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (z dodatkom 8% Ta do $-59 \text{ }^{\circ}\text{C}$) do $+280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (pod tlakom $\approx 80 \text{ bar}$ inertnega plina do $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

Za nižje temperature:

toluol	(+100 do -70) $^{\circ}\text{C}$
etil alkohol	(+50 do -110) $^{\circ}\text{C}$
propan+propilen	(+20 do -217) $^{\circ}\text{C}$



Slika 3: Tekočinski termometri: a) navaden, b) Beckman-ov

Ekspanzijska komora služi za zbiranje Hg v primeru prekoračitve T_{max} (slika 3a). Precizni TM pri katerih se $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ne nahaja v okviru merilnega obsega so lahko opremljeni s kontrakcijsko komoro na spodnjem delu kapilare (slika 3a), ki omogoča kontrolo s kalibracijo na točki leda.

Sistematske napake nastopijo zaradi:

1. depresije nule (za 0.1 do 0.05) $^{\circ}\text{C}$ pri hitrih, velikih ΔT spremembah (ker raztezki stekla ne sledijo enako hitro);
2. nepopolnega potapljanja termometra;
TM so običajno umerjeni tako, da so popolnoma potopljeni. Zato je prava temperatura T nekoliko višja od izmerjene temperature T_i ;

$$T = T_i + \Delta T$$

kjer je,

$$\Delta T = n [(T_i - 273) - (T_0 - 273)] 16 \times 10^{-5}$$

n = št. delitev na skali tistega dela TM, ki ni v stiku z merjencem
 T_0 = temperatura okolice.

3. neenakosti v preseku kapilare.

Največja preciznost Hg TM: $1 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$

Beckman-ov TM (slika 3b):

Prednosti: Velika občutljivost v relativno majhnem obsegu temperatur (5 do 6 $^\circ\text{C}$), ki se ga lahko nastavlja. Vgravirana skala je zato brez številskih oznak;

Preciznost: 0.01 $^\circ\text{C}$.

Uporaba: kalorimetrijske meritve specifične toplote

Hg termometri se uporabljajo tudi kot kontaktni v termostatih in za T-regulacijo v industriji.

Princip: Hg nitka sklence kontakt z ustrežno elektrodo, nastavljeno na določeni temperaturi (višini), s čemer se (preko ustreznega releja) vklaplja ali izklaplja npr. grelec.

5. Termometri na principu raztezanja pare

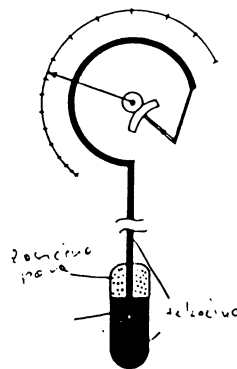
Osnova: Termodinamsko (TD) ravnovesje sistema tekoča faza + plinska faza nekega plina

V zaprti posodi je tlak plina podan z enačbo:

$$\ln p = A - \frac{B}{T} + C \ln T ,$$

kjer so A, B, C = konstante. Tlak v posodi predstavlja torej mero temperature tekočine.

Delovni plin: za nizke temperature; ^3He , ^4He , H_2 , Ne, O_2
za tehnične TM; etan (-70 do +30) $^\circ\text{C}$; etil klorid (+5 do +150) $^\circ\text{C}$;
eter, toluol, propan



Slika 4: Tehnični TM na osnovi tlaka pare

Primer takega TM je prikazan na sliki 4. V posodi nad izparljivo tekočino je para, ki je v stacionarnem stanju vedno nasičena. To se doseže tako, da se prostor nad paro predhodno evakuira. Pri povečanju temperature del tekočine izpari, s čemer se tlak p v Bourdonovi

cevi poveča. Pri hlajenju se del plina kondenzira s čemer se p zmanjša. Skala je nelinearna (logaritemska)

Delovni tlaki v TM: 10 do 50 bar

Točnost: 0.5% do 1.5%

Uporaba: mehanski registratorji T (ustvarijo se velike sile za pogon), termoregulatorji
Lahko je napolnjen s Hg. V tem primeru je skala linearna. Območje: (- 60 do + 500) °C, delovni tlaki (50 do 150) bar.

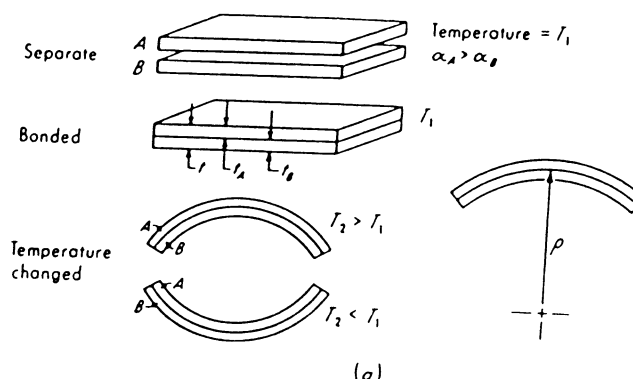
6. Termometri na principu raztezanje togih teles

6.1 Bimetalni termometri

Osnova: upogib dveh trakov kovin z različnimi linearnimi temperaturnimi koeficienti.

Princip je prikazan na sliki 5. Material z večjim α_1 se nahaja na zunanji strani ukrivljenega traka. Pri povečanju T se radij spirale zmanjša, posledica je odklon kazalca. Občutljivost je sorazmerna številu navitkov. Skala je linearna, kalibracija pa empirična.

$$\rho \approx \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)}$$



Slika 5: Princip bimetalnega TM

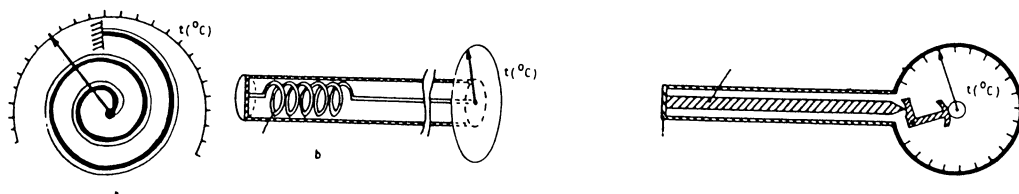
Materiali: invar (zlitina Fe-Ni z nizkim $\alpha_{\text{invar}} = 1.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

bron (do 150 °C); zlitina Ni-Cr (do 400 °C)

Občutljivost S je večja, če so debeline traka manjše. Če je potrebna večja sila na prostem koncu (kontaktna regulacija), se koristijo debelejši materiali pri čemer se S poveča z mehanskim prenosom.

Lastnosti: poceni, zanesljivi

Uporaba: velika, zlasti za T-regulacijo.



Slika 6: Pogosto uporabljene oblike bimetalnih TM; a) spiralni, b) helikoidni, c) paličasti

Pogosto uporabljene oblike bimetalnih TM so prikazane na sliki 6.

- spiralni; v stanovanjskih prostorih, vozilih, hladilniki, ker so majhni;
- helikoidalni; za višje T, senzor in spojna palica se nahajata v kovinskem ohišju;
- paličasti; veliko uporabljajo v gospodinjstvu in industriji; cev ($l = 20$ do 30) cm je element z večjim α ; razlika v širjenju cevi in palice je < 1 mm zato se uporablja mehanski prenos za povečanje S; točnost (1 do 2) %; upoštevati je treba, da kažejo srednjo temperaturo po celi svoji dolžini (če so gradienti po dolžini veliki, niso uporabni).

7. Termometri na principu sprememba električnega upora

Osnova: spreminjanje upornosti zaradi spreminjanja temperature

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_R \Delta T$$

α_R = linearni temperaturni koeficient upornosti.

Materiali:

- Platina (Pt); Pt-TM se odlikujejo z veliko točnostjo in preciznostjo, odlično stabilnostjo, in izredno širokim temperaturnim obsegom; uporaba velika;
- polprevodniki: termistorji (NTC, v manjši meri PTC in Ge uporovni elementi).

Karakteristično za uporovne TM je, da dajo velik izhodni signal, kar pomeni, da ne potrebujejo kompliciranih vezij (npr. Wheatstone-ovega mosta) za njihovo merjenje ali za prenos na daljavo.

7.1 Pt uporovni TM

Lastnosti Pt kot TM material:

- velika obstojnost (kemijsko ne reagira z drugimi materiali)
- visoko tališče (1769 °C)
- velika specifična upornost α_R .

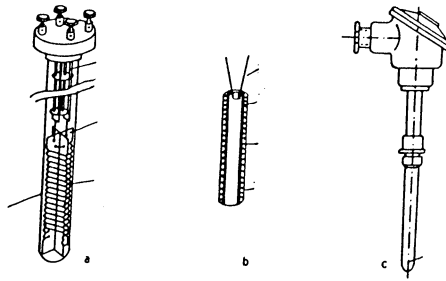
Kvaliteta Pt-TM je odvisna od kemijske čistoče, namreč linearni temperaturni koeficient upornosti α_R raste s čistočo.

teoretično: $R(100\text{ °C})/R(0\text{ °C}) = 1.3928$
za tehnično uporabo = 1.385 do 1.390

Odvisnost upornosti od temperature (empirična relacija):

$$\frac{R(T)}{R(0\text{ °C})} = 1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3 \quad ; \quad A, B, C = \text{konstante}$$

T_{\max} za Pt-TM je 1064 °C (tališče Au). Pri hitrem hlajenju s $T \approx 1000$ °C na 0 °C se javlja sprememba v $R(0\text{ °C})$ ekvivalentna napaki 0.5 °C. S ponovnim segretjem in počasnim hlajenjem se vzpostavi prvotna nominalna vrednost. Karakterizira jih izredno velika stabilnost (pri dolgem obratovanju na 631 °C nastanejo spremembe pri trojni točki vode ekvivalentne napaki 1 mK). Stabilnost pri uporabi do 1000 °C je ≈ 10 -x boljše od Pt-PtRh termočlena (zato se uporabljajo kot standard).



Slika 7: Pt TM; a) precizni, b) industrijski, zalit v steklo, c) industrijski - zunanji izgled

Materiali za izolacijsko telo morajo imeti veliko specifično upornost pri visokih T (alumina keramika, kvarc, sintetični safir). Da je vpliv izolacijske upornosti čim manjši, je nominalna upornost za visoko-temperaturne TM; (10, 1 ali 0.25) Ω . Pt-TM za precizne meritve imajo 4 priključne žice s čemer se izogne merjenju lastne upornosti sensorja. Zaprti so v zaščitni cevi, običajno iz kvarca.

Industrijski Pt-TM (slika 7b):

- nominalna upornost je 100 Ω (Pt-100) ali 25 Ω ;
- temperaturno območje uporabe do 500 $^{\circ}\text{C}$;
- niso tako točni kot precizni TM, zato samo z dvema vodnikoma;
- pri delu na okrog 650 $^{\circ}\text{C}$ v času enega leta pride do sprememba upornosti ekvivalentni napaki (0.1 do 0.2) $^{\circ}\text{C}$ na točki leda.

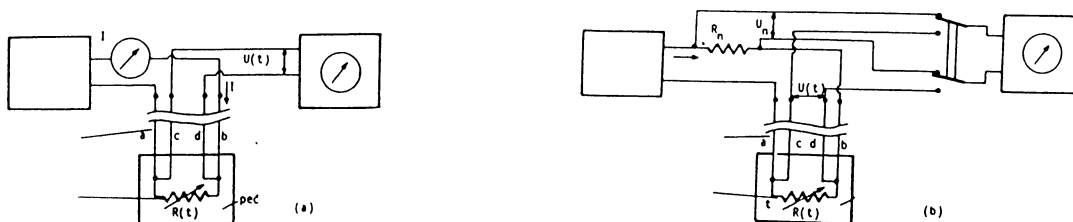
7.2 Ostali kovinski uporovni termometri

V primerjavi s Pt veliko manjša uporaba. Ne plemenite kovine se ne koristijo za precizne meritve ampak samo za tehnična merjenja v ožjem obsegu temperatur in manjšo točnostjo.

Kovine v uporabi; Ni (-60 do +150) $^{\circ}\text{C}$,
 Cu (0 do +120) $^{\circ}\text{C}$,
 Pb in In za nizke T (okrog 10 K).

7.3 Vezja za merjenje temperature z uporovnim TM

a. Merjenje upornosti s pomočjo tokovnega izvora in voltmetra



Slika 8: Merjenja upornosti uporovnega TM s pomočjo tokovnega generatorja in visoko impedančnega voltmetra; a) enostavna metoda, b) izboljšana metoda z referenčnim uporom R_n .

Opomba: Uporovni element ima 4 enake priključne žice, katerih upornost r_a, r_b, r_c, r_d v primerjavi z $R(T)$ ni zanemarljiva.

$$R(T) = U(T) / I \quad I = \text{konst.} \quad ; \quad R_v \gg R(T)$$

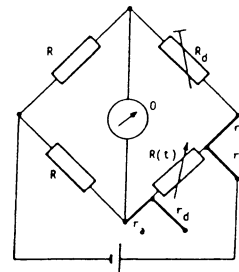
Točnost merjenja po metodi 8a določajo napake meritve toka I tokovnega izvora, zlasti zaradi T -sprememb. Te vrste napake se odpravi z metodo 8b. V serijo s termo-uporom $R(T)$ je vezan znani upor R_n stalne vrednosti tako, da je tok skozi R_n in $R(T)$ enak. V postopku se meri padeč napetosti $U_n = I R_n$ in $U(T) = I R(T)$ od koder sledi;

$$R(T) = R_n \frac{U(T)}{U_n}$$

- Opomba: 1. Ni nujno, da se pozna točna vrednost toka I . Potrebno je le, da je I v času odčitavanja U_n in $U(T)$ konstanten.
2. Pri merjenju z enosmernim tokom se v tokokrogu lahko pojavijo termonapetosti (Seebeck-ova napetost). Zaradi tega se zamenja polariteta vezave tokovnega izvora in v kolikor se dobe različne absolutne vrednosti napetosti, se izbere srednja vrednost.
3. Za precizna merjenja $U(T)$ se poleg visoko-impedančnih voltmetrov uporablja tudi kompenzatorje.

Vprašanje: V tem primeru merimo upornost tako, da pošljemo skozi njega tok. Prevelikega toka ne smemo dovoliti, ker bi prišlo do samosegrevanja Pt elementa. Kako bi to ocenili?

b. Mostično merjenje upornosti



Slika 9: Wheatstone-ov most za merjenje upornosti Pt-TM s 4-mi priključnimi žicami;
 r_a, r_b, r_c, r_d = upori (približno enaki) priključnih žic

Upornost $R(T)$ se določi na osnovi dveh neodvisnih meritev pri katerih so v most vključeni trije kabli, četrti je prost. V prvi meritvi so žice priključene kot prikazano na sliki 9. S spreminjanjem dekadno nastavljivega upora R_d se vzpostavi ravnovesje (0-odklon galvanometra). Pogoj ravnovesja je:

$$R(T) + r_a = R_d + r_b .$$

V drugi meritvi se žice povežejo tako, da se napajanje ustvari preko r_d , medtem ko upora r_a in r_b zamenjata vlogi. Zaradi neizbežnih razlik v uporih kablov, most ne bo popolnoma uravnovešen. 0-odklon se zato dobi pri neki drugi vrednosti R'_d . V tem primeru velja

$$R(T) + r_b = R'_d + r_a .$$

Iz obeh enačb se dobi:

$$R(T) = (R_d + R'_d) / 2$$

Opomba: Upornosti priključnih žic, ki niso popolnoma enake in, ki jih je tudi težko določiti, ne vplivajo na merjenje $R(T)$. V obeh meritvah upornost r_c in r_d sta vezani zaporedno z izvorom napajanja in ne

vplivata na pogoje ravnovesja mostu.

7.4 Polprevodniški termometri

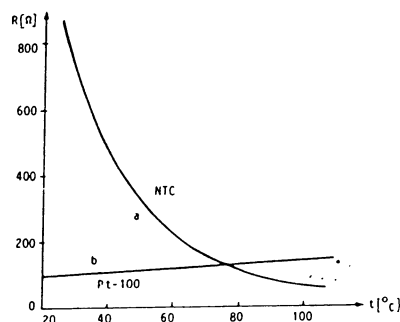
7.4.1 NTC termistorji

Osnova: upornost NTC termistorja je nelinearna funkcija T:

$$R(T) = A e^{B/T}$$

A, B = konstante za določen termistor
 termistor = *thermally sensitive resistor*
 NTC = Negative Temperature Coefficient

Slika 10: R-T karakteristika; a) tipičnega NTC termistorja, b) Pt uporovnega elementa



Občutljivost termistorja:

$$S = \frac{dR}{dT} = -R \frac{B}{T^2}$$

Opomba: Občutljivost pada s porastom temperature. Vrednost konstante B je (3000 do 4000) K. S pri sobni temperaturi je tako (3 do 5) %/°C, kar je ~ 10-krat več kot pri kovinskih uporih.

Temperaturni koeficient upornosti:

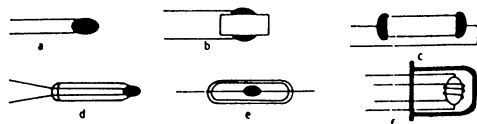
$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Lastnosti: velika občutljivost

Uporaba: medicina, biologija, geologija, oceanografija, in vse več v industriji.

Opomba: Uporabo so omejevali; velika nestabilnost upornosti vis-a-vis temperature in velika toleranca pri izdelavi. Z razvojem polprevodniške tehnologije so te pomanjkljivosti premagane.

NTC termistorji se izdelujejo se iz praha oksidov (Fe, Cr, Mn, Co, Ni) z dodatkom polprevodniškega materiala (tipa n ali p) in sintranjem pri temperaturah nad 1000 °C s čemer se oblikujejo upori oblike žoge, diska ali valja (slika 11).



Slika 11: Oblike NTC termistorjev; a) žoga, b) disk, c) valj, d) termistor kot steklena sonda, e) termistor v vakuumu, f) indirektno segrevani termistor

Delovni obseg:

T_{\max} : do 350 °C ; posebne izvedbe do 1000 °C
 T_{\min} : do \approx 10 K

Nazivna upornost termistorja pri sobni temperaturi je lahko zelo različna (nekaj 10 Ω do nekaj M Ω). Določa jo sestava materiala in pogoji sintranja, lahko pa se še naknadno prilagaja. Dobijo se termistorji tudi z ozkimi tolerancami, tako da je napaka merjenja temperature pri zamenjavi le (0.1 do 0.2) °C. Visoka nominalna upornost NTC-ja pomeni tudi večjo občutljivost merjenja temperature. Zaradi večje upornosti lahko uporabne mostiče napajamo z večjo napetostjo kot tiste s kovinskimi upori pri istem samosegrevanju senzorja. Ker je S neuravnovešenih mostičev direktno sorazmerna napetosti napajanja, je S termistorja \sim 50-krat večja od S mostičev s kovinskimi upori.

NTC termistorji v režimu povečane disipacije:

Temperatura T_u uporovnih TM v stacionarnem režimu je vedno večja od temperaturi okolice T_o zaradi pretvarjanja električne energije v toploto. Če se v upor pri konstantni T_o razvija moč P , je razlika

$$\Delta T = T_u - T_o = P / K ,$$

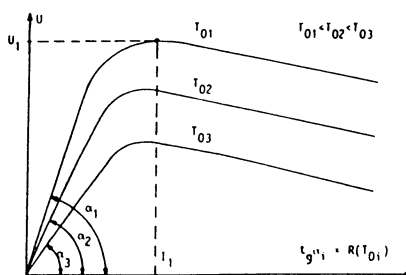
kjer je $K = \alpha_p A_s$

K = konstanta disipacije; v [W / °C]

α_p = koeficient prestopa toplote senzor-fluid; v [W / °Cm²]

A_s = površina senzorja

Vrednosti za K so \approx 10 μ W/ °C za miniaturne \approx 50 mW/ °C za masivne elemente s hladilnimi površinami. Velikost konstante K je v tekočinah veliko večja kot v plinih (npr. v vodi je 5-krat večja kot v mirnem zraku). Njena vrednost se povečuje s porastom hitrosti fluida, kar je zelo izrazito pri plinih. Na tem principu delujejo termistorski anemometri, vakuummetri in analizatorji plinov. Na sliki 12 so prikazane U-I karakteristike za tri temperature okolice, $T_{o1} < T_{o2} < T_{o3}$.



Slika 12: Statične U-I karakteristike NTC-jev pri različnih temperaturah okolice T_o .

V začetnem delu, ki ustreza majhnim disipacijam (I majhen), so karakteristike linearne. Samosegrevanje se lahko zanemari. T termistorja je konstantna in blizu T_o . Naklonski kot linearnega dela je upornost termistorja, ki ustreza T_o ;

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = R(T_{oi})$$

Pri merjenju temperatur se vedno dela v režimu nizkih disipacij, tj., v linearnem delu U–I karakteristike.

Nasprotno, v primeru velikih disipacij in samosegrevanja, pride do velikih sistematskih napak. Termometer kaže preveč, velikost razlike pa zavisi od medija v katerem se meri in od hitrosti fluida. Namreč, koeficient prestopa α_p in disipacijska konstanta K zavisita od vrste in hitrosti fluida, npr., pri isti T je samosegrevanje senzorja v plinih večje kot v tekočinah (TM pokaže zato večjo vrednost). Poleg tega, povečana disipacija senzorja izzove tudi določeno segretje okolice, kar je posebej pomembno, če je masa merjenca majhna. Zato mora biti samosegrevanje pri termistorskih in uporovnih TM pod 0.1 °C, pri preciznih Pt-termometrih pa < 0.01 °C. Kontrola samosegrevanja se vrši z izborom ustreznega maksimalno dovoljenega toka oz. napetosti za napajanje mostiča. S tem v zvezi je potrebno poznati konstanto K senzorja v fluidih v katerih se meri.

7.4.2 PTC termistorji

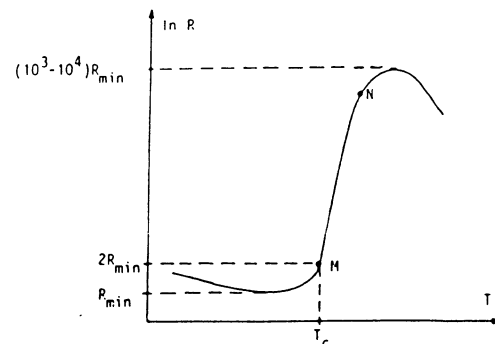
Osnova: upornost PTC termistorja je nelinearna (naraščajoča) funkcija T (slika 13):

$$R(T) = A e^{B(T-T_c)}$$

A, B = karakteristike danega termistorja

T_c = Curiejeva temperatura

PTC - Positive Temperature Coefficient



Slika 13: R–T karakteristika PTC termistorja

Na sliki 13 je prikazana tipična statična R–T karakteristika PTC termistorja pri enosmernem toku. V širokem pasu pod T_c (za čisti BaTiO₃: $T_c = +123$ °C) se upornost le neznatno spreminja s porastom temperature $R(T) = R(T-T_c) \approx 2 R_{min}$, blizu T_c pa močno narašča v obsegu med točkama M in N, v skladu z gornjo enačbo. Nad točko N upornost raste počasneje do maksimuma, nato upada, podobno kot pri polprevodnikih. Hitrost eksponencialnega porasta je (40 do 50) %/°C, pri čemer se upornost poveča za faktor (10³ do 10⁴) $\times R_{min}$ (slika 13).

Uporaba: prvenstveno kot senzorji, ki pri določeni T dajo diskreten signal, redko za merjenje temperature, niz aplikacij v režimu velikega samosegrevanja;

Merilni obseg: ozek

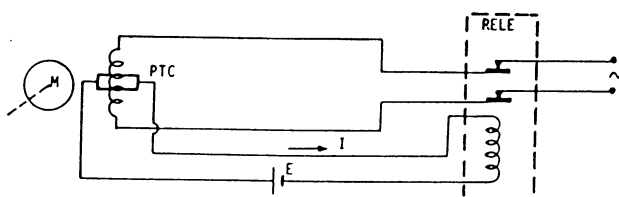
Občutljivost: ~10-krat večja od NTC

Material: feroelektrik BaTiO₃

Čisti titanat je izolator. Z dopiranjem se njegova upornost zmanjša in se obnaša kot polprevodnik. Uporaben material v obliki keramične ploščice ali valja se pridobiva s sintranjem prahu pri $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z dopiranjem BaTiO_3 se lahko spreminja T_C (z zamenjavo Ba atomov s Sr atomi, se znižuje, s Pb atomi pa zvišuje). Na ta način dobimo PTC termistorje za delo v obsegu (-100 do $+300$) $^{\circ}\text{C}$.

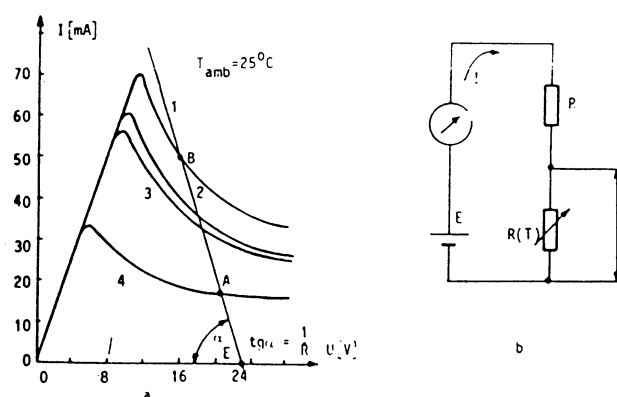
PTC termistorji kažejo tudi varistorski efekt, t.j., pri povečanju napetosti se upornost zmanjša. Ker ta vpliva na občutljivost, se pri karakteristikah PTC termistorjev navaja tudi napetost pri kateri se meritve temperature opravlja.

Na sliki 14 je prikazan primer uporabe PTC termistorja za temperaturno zaščito elektromotorja. V navitkih elektromotorja se nahaja PTC termistor tako, da je T termistorja enaka temperaturi navitkov. V serijo z navitki se nahaja rele preko katerega se motor napaja. Pri normalnih temperaturah je PTC upornost majhna, tok je dovolj velik, da je rele aktiviran in s tem motor priključen na omrežje. Če se temperatura poveča nad T_C , PTC upornost hitro naraste, tok se zmanjša in rele prekine napajanje.



Slika 14: Uporaba PTC termistorja za temperaturno zaščito elektromotorja

Na sliki 15 je prikazana $U-I$ karakteristika PTC termistorja. Prvi, linearni del ustreza manjši disipaciji pri kateri je $T < T_C$. Drugi, nelinearen del ustreza večji disipaciji $T > T_C$ in spominja na hiperbolo, t.j., pri porastu napetosti se moč relativno malo poveča.



Slika 15: a) $U - I$ karakteristika PTC termistorja pri konstantni temperaturi ambienta v vodi (1), bencinu (2), olju (3) in zraku (4); b) vezje s PTC termistorjem katerega izhodni signal določa delovna premica s slike a).

Največji tokovni maksimum se dobi v vodi, t.j., v fluidu z največjim toplotnim prestopom. Samosegreti termistor torej 'razlikuje' fluide na osnovi toplotnih lastnosti (kontaktno določevanje nivoja tekočin). Družina $U-I$ podobnih karakteristik se dobi v istem fluidu pri različnih hitrostih (merjenje hitrosti fluida s PTC termistorjem).

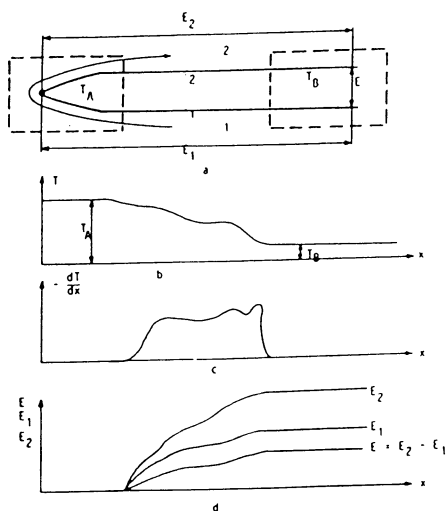
Na sliki 15b je prikazano vezje s PTC termistorjem v režimu velike disipacije. Delovna premica gre skozi točko $U = E$ in ima nagib $\tan \alpha = R^{-1}$. Delovna točka (in s tem tok I) se dobi s presekom delovne premice in pripadajoče $U-I$ karakteristike. Na ta način se določuje tudi delovno točko pri anemometrih.

8. Termometri na principu termoelektričnega pojava

Princip delovanja termočlena (TČ) je prikazan na modelu dveh kovinskih žic različnega sestava spojenih v točko (slika 16). V splošnem, na odprtem koncu se pojavi potencialna razlika E katere velikost je odvisna od temperatur T_A in T_B . Za primer dveh žic homogenega sestava, katerih prosta konca sta na enaki temperaturi T_B velja:

$$E = (S_A - S_B) (T_A - T_B),$$

kjer sta S_A in S_B tzv. Seebeckova koeficienta. Vzrok za nastanek termonapetosti je v elektronski strukturi kovin in sipanje elektronov v kovini.



Slika 16: Princip delovanja TČ; a) TČ, b) temperaturno polje, c) temperaturni gradient, d) termoelektrična napetost

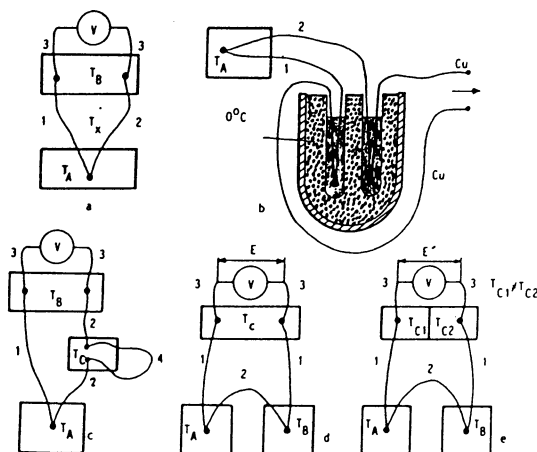
Na sliki 16b je prikazan potek temperature, na sliki 16c pa potek temperaturnega gradienta dT/dx . Termonapetost v žicah 1 in 2 dejansko nastane zaradi temperaturnega gradienta. Spoj in prosta konca se nahajata v homogenem temperaturnem polju in je zato v teh delih žice generirana termonapetost $E = 0$. Direktno merjenje termonapetosti E_1 in E_2 , ki se pojavljajo v posameznih žicah ni mogoče meriti, ker priključne žice voltmetra tvorijo dodatni termopar.

Za merjenje T se pomočjo TČ se uporabljajo instrumenti z veliko notranjo upornostjo tako, da se tok in padci napetosti zaradi nje lahko zanemarijo (slika 17a). Instrument se v splošnem priključuje z dvema Cu žicama, ki predstavlja tretji material, ki se razlikuje od elementov TČ. Priključevanje Cu žic ne spremeni termonapetosti, če sta oba priključka na isti temperaturi T_B .

Za precizna merjenja se kot referenčna temperatura na kateri se spajajo vodniki instrumenta, koristi točka leda (slika 17b). Način kako se termospoj naredi (lotanje, varjenje), v kolikor v območju spoja ni T-gradienta, ni pomemben (v njem se, brez ozira na material, ne generira nobena dodatna termonapetost). Podobno, vključevanje dodatne, druge žice (slika 17c) ne spremeni lastnosti TČ (v kolikor sta oba spoja na isti temperaturi T_C). Za merjenje razlik v temperaturi $T_A - T_B$ se koristi shema na sliki 17d. Priključne točke voltmetra morajo biti na isti T_C , ki se realizira ali s točko leda, pusti na sobni temperaturi ali na podlogi z dobro toplotno prevodnostjo. Na sliki 17e je prikazan primer, ko spoja nista na enakih temperaturah. V tem primeru je izhodna napetost

$$E' = (S_1 - S_2) (T_A - T_B) + (S_1 - S_3) (T_{C1} - T_{C2})$$

Drugi člen predstavlja napako, ki je sorazmerna razliki temperatur spojev.



Slika 17: a) Osnovna shema TC z instrumentom spojenim na referenčni temperaturi, b) praktična shema s točko leda kot referenco, c) 'zakon' dodatnega materiala, d) TČ za merjenje temperaturnih razlik z instrumentom na izotermnih točkah, e) na neizotermnih točkah.

Merilni obseg za TČ: 1 K (kriogene temperature) do 2600°C

Prednosti pred ostalimi TM: enostavna konstrukcija, relativno nizka cena, velikost (točkasta oblika senzorja), enostavnost vgradnje, dobre lastnosti za dinamična merjenja.

Slabe lastnosti: nizek nivo izhodnega signala, omejena življenska doba.

(Zaradi teh lastnosti se ne uporabljajo za precizne meritve, kar pa ne zmanjša njihovo številčno uporabo pri industrijskih in laboratorijskih merjenjih.)

8.1 Vrste in razdelitev TČ

Za veliko kovin in zlitin so termonapetosti s standardno kovino (Pt) podane v literaturi s hladnim spojem na 0°C in toplim na 100°C (tabela 1).

Opomba: TČ se obeležuje s komercialnimi imeni (kromel, konstantan, alumel, ki so zaščitena s patenti) proizvajalcev. Zaradi težav z uporabo teh nazivov, se TČ grupira v skupine s podobnimi lastnostmi. Ta način obeleževanja je bil najprej prizvet v ZDA, in je danes tudi mednarodno priznan.

Za praktične TČ morajo materiali zadoščati naslednjim zahtevam:

- možnost izdelave v obliki žice
- velika občutljivost in linearnost
- obstojnost električnih in mehanskih lastnosti v določenih medijih
- sprejemljiva cena.

Tabela 1: Velikost termonapetosti za različne kovine v spoju s Pt

material	E pri 100 °C (mV)	material	E pri 100 °C (mV)
konstantan	-3.47	Ag	0.71
Ni	-1.64	Au	0.73
Co	-1.52	Zn	0.75
alumel	-1.29	Cu	0.76
Rh	-0.64	W	0.8
Pa	-0.57	Mo	1.2
Ta	0.33	Fe	1.9
Sn	0.42	NiCr	2.2
Pb	0.44	kromel	2.8
90%Pt/10%Rh	0.64	Sb	4.7

Obstaja več kot 300 vrst TČ z uporabo v različnih vejah znanosti in tehnike. Našteli bomo samo tiste, ki se pogosto uporabljajo v industriji in termometriji (tabela 2).

Tabela 2: Tabela pogosto uporabljenih standardiziranih tipov TČ z ustreznimi temperaturnimi obsegi

Oznaka TČ	Komercialni naziv	Temperaturni obseg (°C)	Max. temperatura (°C) (kratkotrajno segrevanje)
T	Cu-konstantan	-200 do 400	600
J	Fe-konstantan	-200 do 700	900
E	kromel-konstantan	-100 do 700	900
K	kromel-alumel	-200 do 1000	1300
S	PtRh(10%)-Pt	0 do 1200	1600
R	PtRh(13%)-Pt	0 do 1200	1600
B	PtRh(30%)-PtRh(6%)	0 do 1200	1800

a) TČ z neplemenitimi kovinami (T, J, E, K);

Uporaba: industrija, tehnika in druga rutinska merjenja v obsegu pod 1000 °C (ko je potrebna velika občutljivost z relativno majhno točnostjo in majhno ceno).

Tip T karakterizira največja občutljivost $S \approx 40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (nekoliko večja, $\approx 60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, pri višji T) med vsemi TČ. Prednost je še majhna upornost Cu elementa in majhna sprememba upornosti konstantana, zaradi česar se kot indikatorji lahko uporabljajo μA -metri namesto kompenzatorjev.

Tip J se masovno uporablja v industriji in metalurgiji

Tip K ima najboljše karakteristike v pogledu delovnega obsega, stabilnosti in linearnosti od vseh neplemenitih TČ-jev. Uporaba: za pogonske in laboratorijske meritve. Obstojajo tabele temperatura-napetost s korakom 0.1 °C. Tip K kažejo majhne spremembe v karakteristiki v atmosferi bogati s O₂. Neugodno vplivajo tudi CO in CO₂. Priporočljivo je, da se jih zaščiti s cevjo napolnjeno z izolacijskim materialom. Vzroki nestabilnosti karakteristik TČ so predvsem sprememba velikosti in oblike zrn v strukturi žice in spremembe zaradi oksidacije in drugih kemijskih reakcijah posameznih komponent zlitin. Občutljive so torej na mehansko obdelavo (zvijanje) in medij v katerem potekajo meritve.

b) TČ s plemenitimi kovinami (S,R,B);

TČ-e na osnovi Pt karakterizira visoka stabilnost karakteristik, možnost uporabe pri visokih temperaturah (1600 °C) zaradi visokega tališča in velika odpornost Pt na oksidacijo in druge kemijske spremembe. Cena teh parov je veliko večja kot za pare z ne-plemenitimi kovinami. Če je razdalja med merjencem in instrumentom velika, se uporabljajo podaljški iz žice izdelane iz ne-plemenitih kovin. Pomanjkljivost je tudi majhna občutljivost $\approx 10\text{-}13 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

c) TČ za visoke temperature;

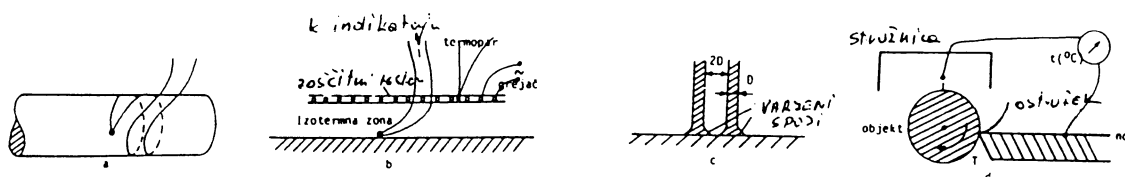
Obstoja zelo malo členov za temperature nad 1800 °C. Pri visokih temperaturah obstoja več pojavov, ki skrajšajo življensko dobo člana in povečajo merilno negotovost. Poleg oksidacije in kemijskih reakcij, v upoštevanje pride predvsem padec upornosti izolatorja, ki deluje kot paralelni 'šunt' izhodnemu signalu, termoionska emisija in sublimacija materiala. Najboljši TČ za T do 2600 °C je W/Re par. Pod 2100 °C lahko dela več 1000 h, pri čemer spremembe karakteristike ne presegajo 5 °C, medtem ko pri delu na 2600 °C že po 15 h nastanejo spremembe velikosti 50 °C. Zaradi oksidacije se TČ morajo nahajati v zaščitni cevi iz specialne keramike (BeO, MgO).

8.2 Posebne oblike in načini sklapljanja TČ

TČ-ni se v primerjavi z drugimi kontaktnimi merilci temperature odlikujejo po zelo hitrem odzivu (npr. za par Fe-konstantan z žico $\phi = 0.125 \text{ mm}$ je odzivni čas $\tau \approx 1 \text{ ms}$) in so zato primerni za sledenje hitrih T-sprememb.

Merjenje T površin togih teles je v principu zapleten proces, ker je toplotni kontakt med senzorjem in površino praviloma slab. Napake so tem večje, čim večji je grad T na površini telesa in obdajajočem fluidu. Čim se dotaknemo merjenca, se T okrog njega spremeni, še posebej če jemejenec toplotni izolator ali plastika. Zaradi majhnih dimenzij ima v tem pogledu TČ prednost pred drugimi senzorji.

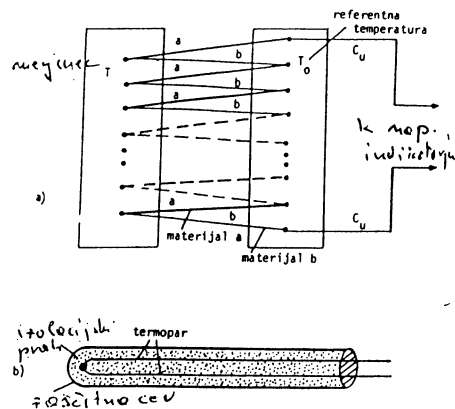
Za dosego čim boljšega stika se uporablja več postopkov.



Slika 18: Merjenje temperatur površin: a) povečana dolžina stika, b) zaščitni zaslon z grelcem za dosego izotermne zone, c) indirektni TČ z varjenjem posameznih žic na podlago, d) merjenje T kontakta noža in dela, ki se struži.

Komentar: V primeru na sliki 18a se žica naleže na površino z določeno dolžino (dobijo se že prirejeni za površinsko naleganje). Z načinom na sliki 18c se lahko doseže odzivne konstante $\tau \approx 10 \mu\text{s}$. V primeru na sliki 18d spoj predstavlja kontakt obdelovanec-nož. S tem se dobi podatke o optimalnih pogojih obdelave za različna orodja oz. materiale, ki se obdelujejo.

Občutljivost S nekega TČ-a se poveča s serijsko vezavo TČ-a v baterijo (termopile, slika 19a). TČ baterija z N členi (običajno 20 do 30) ima N-krat večjo občutljivost. Za industrijsko uporabo se na veliko uporablja tz. zaščiteni TČ (slika 19b).



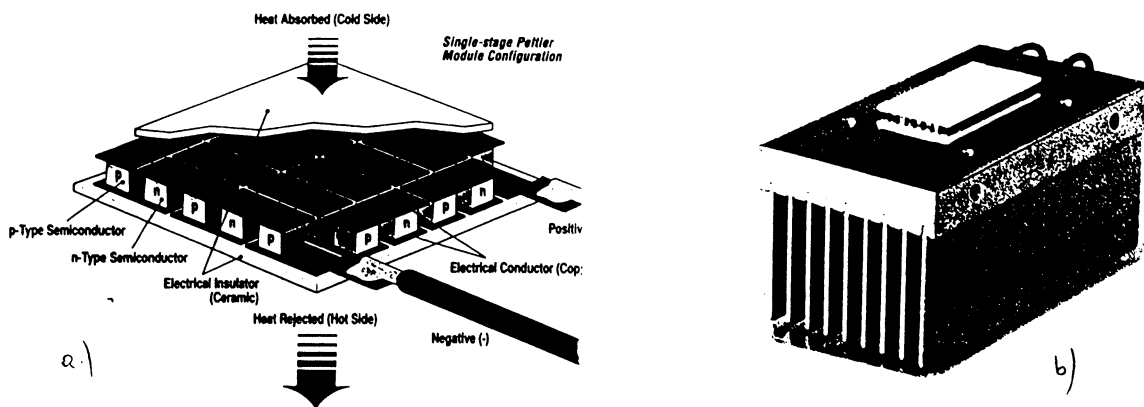
Slika 19: a) TČ baterija, b) zaščiteni TČ

Komentar: V primeru na sliki 19a so TČ vezani serijsko tako, da so občutljivi konci vezani (med seboj električno izolirani) na del, katerega T se meri, referenčni spoji (tudi el. izolirani med seboj) pa so na konstantni temperaturi (običajno temperatura ledu). V primeru na sliki 19b so žice oklopljene s kovinsko cevjo (debelina 0.5 do 3 mm), ki je napolnjena z Al_2O_3 prašom. Žice so lahko izolirane od ohišja ali spojene tako, da se spoj zavari na ohišje.

Peltier-jev pojav:

Če pošljemo tok skozi spoj dveh različnih prevodnikov, pride pri tem do spremembe temperature (Peltier pojav, odkrit l. 1834). Praktične aplikacije tega koncepta za termoelektrične hladilnike (TEH) so se lahko realizirale le z razvojem polprevodnikov, ki so dobri električni prevodniki in slabi prevodniki toplote. Danes se v te namene uporablja polprevodnik bizmut telurid (BiTe).

TE hladilnik je sestavljen iz večjega števila parov spojev p- in n-tipa, električno serijsko povezanih, in vgrajenih med dvema keramičnima ploščicama v obliki sendviča (slika 20a). Če ta element ('sendvič') priključimo na dc (istosmerni) napajalnik, bo tok povzročil prehod toplote z ene na drugo stran hladilnika. Jasno, s tem nastane hladna in topla stran na hladilniku. V tipični aplikaciji je hladna stran hladilnika izpostavljena predmetu, ki se hladi, topla stran pa hladilnemu telesu (slika 20b), ki disipira nastalo toploto v okolico. V ta namen se priporoča uporaba toplotnega izmenjevalca z ventilacijo (zrak) ali kroženjem vode. (TEH element toplote ne more pojesti ampak zgolj prenašati!) Če se smer toka obrne, se toplota prenaša v nasprotni smeri. Z drugimi besedami, kar je bilo prej vroča stran je sedaj hladna in obratno. Količina toplote, ki jo lahko največji posamični TEH element prenese (črpa), je 125 W. V kombinaciji z več elementi je možno odvajati ustrezno več. Za temperaturne razlike do 60 °C zadošča en element, za večje razlike (do 132 °C) je potrebna kaskadna vgradnja (en element na vrh drugega).

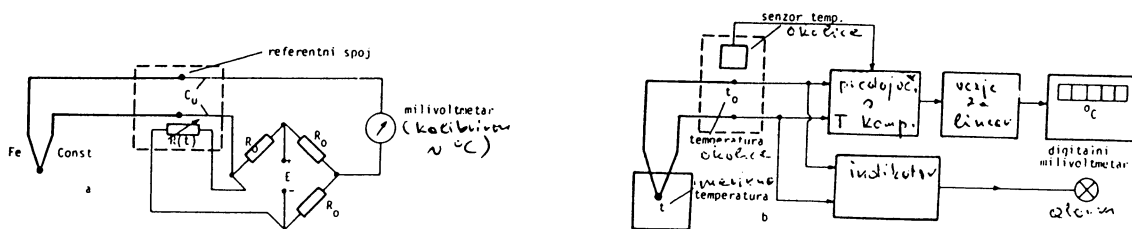


Slika 20: Shema termo-električnega hladilnika (a), TEH element na hladilnem rebru (b)

Uporaba: prenosni hladilniki, hlajenje elektronskih sklopov (računalniki, tiskana vezja), medicinska in farmacevtska oprema, fiber-optične in elektro-optične naprave, vojaške in aeronavtične aplikacije.

8.3 Kompenzacija sprememb temperature referenčnega spoja

Za grobe meritve je referenčni spoj običajno na sobni T . Spremembe T okolice povzročajo na izhodu napake iste velikosti toda nasprotnega predznaka. Pri TČ je treba kompenzirati T variacije okolice. Klasičen primer kompenzacije je s pomočjo uporovnega senzorja (slika 21).



Slika 21: Kompenzacija temperature referenčnega spoja, a) z uporovnim senzorjem, b) blok shema elektronskega termometra s TČ.

Komentar:

Slika 21a: Uporovni senzor je nameščen ob referenčnem spoju in sledi njegovim T spremembam. Izhodni signal mostiča je enak, toda nasprotnega predznaka od napetosti zaradi nestabilnosti referenčnega spoja. S tem se doseže kompenzacija v določenem obsegu. Če je pri $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostič uravnotežen, je izhodni signal $1/4$ mostiča:

$$U_s = \frac{1}{4} U_o \frac{\Delta R}{R}$$

Pri spremembi T okolice za ΔT je ta signal:

$$U_s = \Delta U_m(T) = U_o \alpha_R \Delta T / 4.$$

Napake zaradi spremembe referenčne temperature znašajo $\Delta U_T(T) = S \Delta T$ (S -občutljivost TČ). Z izenačenjem $\Delta U_m(T) = \Delta U_T(T)$ dobimo potrebno napetost napajanja:

$$U_o = 4 S / \alpha_R.$$

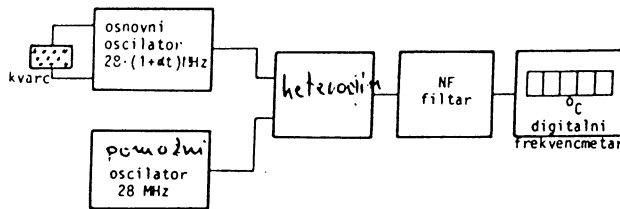
S tako kompenzacijo lahko pri počasnih spremembah temperature okolice od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosežemo napake meritev v iznosu (1 do 2) $^{\circ}\text{C}$.

Slika 21b: Na vohodu, poleg referenčnega spoja se nahaja senzor (uporovni ali diode), ki zaznava T okolice. Senzor vpliva na izhodni signal predojačevalca, ki kompenzira ΔT okolice. Izhodni signal TČ ni linearna funkcija T . Signal se s predojačevalca vodi na vezje za linearizacijo, katerega izhod je $\propto T$. Vezje za linearizacijo ima strukturo nelinearnega ojačevalca, katerega karakteristika 'popravlja' nelinearnost TČ. V sodobnih instrumentih se linearizacijo realizira digitalno s pomočjo mikroprocesorja. Izhodni signal vezja za linearizacijo se priredi tako, da je številčno enak z merjeno T (skala mV-metra se kalibrira v $^{\circ}\text{C}$). Pri meritvah zlasti na visokih T obstaja možnost, da pride do prekinitve tokokroga (pregorettje TČ ali mehanski lom). Izhod iz TČ je tedaj nič. Posledica so znatne napake v merjenju. To se preprečuje s pomočjo indikatorja prekinitve tokokroga, ki reagira na spremembo upornosti TČ in daje ustrezní alarm na skali instrumenta.

9. Kvarčni termometer

Kvarčni kristali se veliko uporabljajo za stabilizacijo frekvence f elektronskih oscilatorjev. V ta namen se monokristali kvarca režejo vzdolž osi, ki daje minimalno spremembo frekvence kvarca v odvisnosti od T . V primeru, da so zahteve za stabilnost frekvence velike, se kvarčni kristal termostatira.

Obstajajo tudi take smeri rezanja kvarca, ki kažejo relativno veliko odvisnost $f(T)$. Tako naprimer, če je optična os kristala pod kotom 5° v odnosu na površino ploščice (rez Y, Z, $\phi = 5^\circ$), je linearni temperaturni koeficient frekvence $\alpha_f = 80 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Pri tem se doseže linearnost $\Delta f / f = \alpha_f \Delta T$ v razponu $(-30 \text{ do } +150) \text{ }^\circ\text{C}$. Na sliki 22 je prikazana principiela shema digitalnega termometra s kvarčnim senzorjem.



Slika 22: Shema digitalnega termometra s kvarčnim senzorjem

Komentar: Oscilator kateremu je priključen kvarčni senzor je prirejen za delo pri 28.2 MHz (3-ji harmonik). Kvarc je rezan tako, da je njegova $\alpha_f = 34 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Torej, pri $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, je $\Delta f = 1000 \text{ Hz}$. Na stopnjo za mešanje se privede signal spremenljive frekvence in signal konstantne frekvence (28.2 MHz) lokalnega oscilatorja (heterodinska detekcija). Iz niza spektralnih komponent, ki jih daje heterodin, se s pomočjo LF filtra loči signal, katerega frekvenca je razlika frekvenc kvarčnega in pomožnega oscilatorja. Ta frekvenca se meri s pomočjo digitalnega merilca frekvence umerjenega v $^\circ\text{C}$. Razpon je $(-40 \text{ do } +230) \text{ }^\circ\text{C}$, resolucija $0.0001 \text{ }^\circ\text{C}$, nelinearnost v mejah $\pm 0.5 \%$.

Slaba stran kvarčnega TM je njegova občutljivost na tresenje in udarce, ker je kvarčna ploščica precej tanka. Zaradi velikih dimenzij ohišja za zaščito kristala, je odzivni čas velik in se tak TM za dinamične meritve T ne uporabljajo. Njegova cena je relativno visoka. Po drugi strani pa je kvaliteten in precizen TM.

10. Tranzistorski senzor temperature

Osnova: temperaturna sprememba napetosti baza-emitor U_{be}

Kolektorski tok tranzistorja (iz analize delovanja tranzistorja) je:

$$I_c = \alpha T^r e^{-\frac{qV_g}{kT}} \left(e^{\frac{qV_g}{kT}} - 1 \right)$$

α = konstanta, odvisna od geometrije

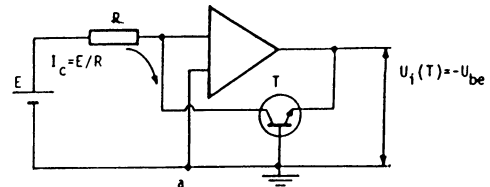
r = konstanta določena s temperaturno odvisnostjo gibljivosti manjšinskih nosilcev naboja v bazi

V_g = energijska špranja; k = Boltzmanova konstanta; T = temperatura

Pri srednjih temperaturah in direktni polarizaciji (forward bias) tranzistorja je $qU_{be} / kT \gg 1$ iz česar sledi:

$$U_{be} = V_g - \frac{kT}{q} \ln \frac{\alpha T^r}{I_c}$$

Iz enačbe sledi, da se s porastom T zmanjša U_{be} in v splošnem U_{be} ni linearna funkcija T . V omejenem razponu temperatur, npr. pri $T = (0 \text{ do } 100) \text{ } ^\circ\text{C}$ in $I_c = \text{konst.}$, se logaritem zelo malo spreminja in U_{be} je približno linearna funkcija T . Za Si tranzistorje je $\Delta U_{be} / \Delta T \approx 2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$. Na sliki 23 je prikazano osnovno vezje tranzistorskega TM



Slika 23: Osnovno vezje tranzistorskega termometra

11. Termometrija s sevanjem

Radiacijski TM se uporabljajo v primeru ko uporaba kontaktnih TM bodisi ni možna ali pa ni primerna. To je predvsem v področju visokih T nad tališčem Au, gotovo pa nad $1500 \text{ } ^\circ\text{C}$, ko praktično nobeden od kontaktnih TM ne vzdrži brez škodljivih posledic na svoje karakteristike. Pri radiacijskih TM je senzor oddaljen od merjenca in sprejema le del energije, ki jo merjenec seva. V vseh radiacijskih TM (razen opt. pir. na nitko) se sevanje iz merjenega telesa fokusira na tak ali drugačen detektor sevanja, ki producira električni signal. Pri tem se T sensorja zaradi absorbirane energije le neznatno spremeni in tako ostane blizu sobne T oz. temperature T_0 okolice.

Uporaba: V metalurgiji pri taljenju in valjanju kovin, proizvodnja jekel, v steklarski in keramični industriji. Predstavljajo najprimernejše instrumente za merjenje T površin materialov, zlasti dobrih toplotnih izolatorjev, ker pri merjenju ne vplivajo na prvotno T -porazdelitev.

Obstaja tudi niz specialnih primerov radiacijskih TM:

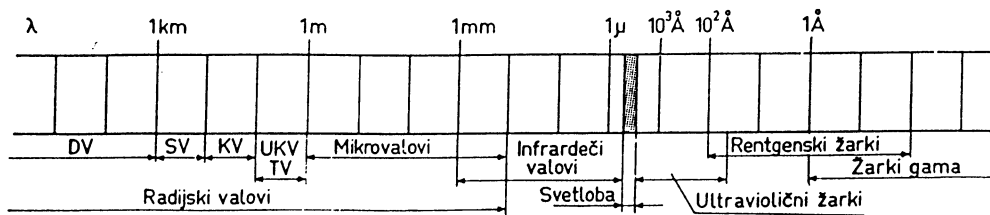
- merjenje T gibajočih se vozil, živih bitij, nebesna telesa v astronomiji;
- merjenje T iz aviona ali helikopterja za odkrivanje neželjena segrevanja s strani industrijskih objektov ali toplotnih izgub zgradb, hiš in podobno;
- odkrivanje preveč segretyh mest na daljnovodih in drugih elektroenergetskih objektih;
- precizno določanje T -porazdelitve na človeškem telesu za diagnostične namene (tomografija).

Tehnološki razvoj radiacijskih senzorjev, izpopolnjevanje tehnike snemanja in obdelave merilnih signalov je v zadnjih dveh desetletjih privedlo do novih radiacijskih metod merjenja T zlasti na IR področju (termovizija) z vse širšo uporabo v industriji, da o vojski ne govorimo.

11.1 Osnovni zakoni sevanja

Elektromagnetni (EM) spekter zajema EM valove vseh valovnih dolžin (slika 24). Učinek EM valov na snov je močno odvisen od njihove valovne dolžine λ oz. frekvence f . EM valovi različnih območij valovnih dolžin zelo različno učinkujejo na snov in se navidezno tako razlikujejo med seboj, kot da ne bi pripadali isti družini. Ker je tudi generiranje in

zaznavanje (detekcija) različno za različna območja valovnih dolžin, imajo posamezne skupine valovnih dolžin različna imena.



Slika 24: Elektromagnetni spekter

EM valove, ki jih sevajo segreta telesa imenujemo toplotne valove (infrardeči žarki- IR). Energijski tok, ki ga snov seva v obliki toplotnih EM valov, ter razdelitev sevane energije po valovnih dolžinah (t.j., spektralna sestava) sta odvisna od vrste in velikosti snovi, od kvalitete površine ter predvsem od temperature. Pri dani temperaturi najmočneje sevajo snovi s črno površino. Energijski tok EM valov vseh valovnih dolžin, ki jih enota površine seva v polprostor (t.j., v prostorski kot 2π), je premo sorazmeren četrti potenci absolutne temperature T sevalne površine:

$$j^* = P / S = \sigma T^4 \quad (\text{Štefanov zakon sevanja črnih teles})$$

P = celotni energijski tok EM valov, ki jih seva površina S ;

j^* = energijski tok na enoto sevalne površine (W/m^2)

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (Štefan-ova konstanta)

Nečrna telesa sevajo pri enakih pogojih manj EM energije kot črna telesa. Čim bolj je telo svetlo, tem manjši je energijski tok valov, ki jih telo pri določeni temperaturi seva. Za taka telesa velja

$$j^* = P / S = \varepsilon \sigma T^4$$

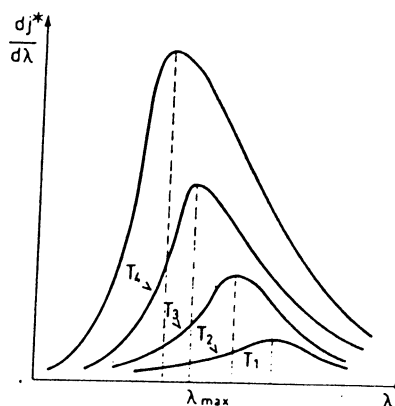
Sorazmernostni faktor ε je emisivnost sevalne površine ($\varepsilon \leq 1$), ki je odvisen od T in svetlosti površine (Tabela 3).

Tabela 3: Emisivnost za različne materiale

snov	ε (pri 20 °C)
Srebro (dobro polirana površina)	0.02
Aluminij (dobro polirana površina)	0.08
Baker (dobro polirana površina)	0.15
Lito železo (dobro polirana površina)	0.25
Jeklo (oksidirana površina)	0.79
Saje	0.95
Absolutno črno telo	1.00

Štefanov zakon izraža odvisnost celotnega energijskega toka valovanja, ki ga seva črno telo, od temperature sevalca. Sevana EM energija je razdeljena po valovnih dolžinah. Sestava spektra je odvisna od temperature sevalca. Energijski tok na enoto valovne dolžine $dj^*/d\lambda$ pri valovni dolžini λ v odvisnosti od λ , je prikazan na sliki 25 za štiri vrednosti temperature.

Slika 25: Spekter sevanja črnega telesa



Iz slike 25 je razvidno, da je:

- spekter zvezen;
- ploščina pod določeno krivuljo je \propto celotnemu energijskemu toku vseh sevanih valov;
- v spektru ni valov z izredno majhno ali z izredno veliko valovno dolžino;
- maksimum krivulje se pomika h krajšim valovnim dolžinam, če se temperatura sevalca povišuje. Velja, da je produkt temperature sevalca T in valovne dolžine λ_{\max} , pri kateri ima krivulja maksimum, stalen (neodvisen od T):

$$\lambda_{\max} T = \text{konst.} = 0.290 \text{ cm K} \quad (\text{Wien-ov zakon})$$

Spektralno porazdelitev na sliki 25 popiše Planck-ov zakon sevanja črnega telesa:

$$\frac{dj^*}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}$$

- $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ (Planckova konstanta)
 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (Boltzmanova konstanta)
 $c =$ hitrost EM valov v okolici sevajoče površine

Vsako telo je izvor toplotnih valov. Najmočnejši izvor je seveda Sonce, ki oddaja Zemlji okrog $1.8 \times 10^{11} \text{ MW}$ moči. Različni stroji in naprave, ki se zaradi trenja ali izgorevalnih procesov močno segrejejo, so močni izvori toplotnih valov. Motor velikega letala npr. seva toplotne valove moči več kW. Človeško telo oddaja okrog 2 W toplotne moči.

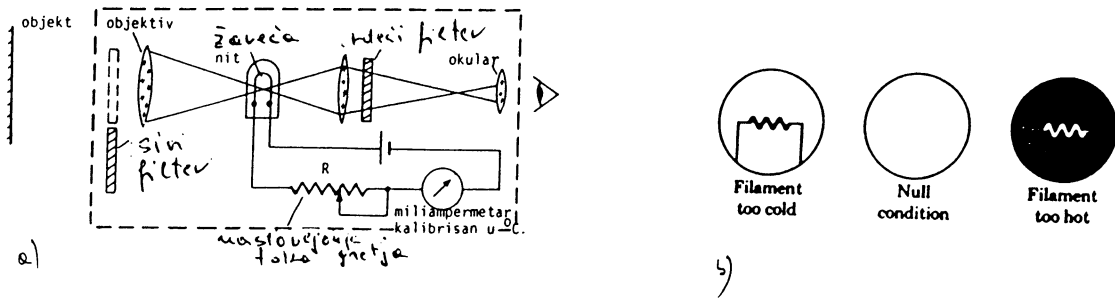
11.2 Principi in razdelitev radiacijskih TM

Izhajajoč iz veličin, ki jih merimo, da pridemo do T objekta, razlikujemo:

- a) TM na osnovi merjenja intenzitete sevanja;
 - spektralni pirometri;
 - pirometri za določen spektralni obseg;
 - integralni pirometri (bolometri) oz. pirometri za celotno sevanje.
- b) TM na osnovi določanja barve

11.2.1 Spektralni pirometri

Spektralni pirometri merijo spektralno gostoto sevanja $dj^*/d\lambda$ v zelo ozkem pasu valovnih dolžin, običajno blizu 650 nm. V glavnem so to drage, relativno komplicirane naprave za precizna merjenja (metrološki laboratoriji). Primer take naprave je optični spektralni pirometer na nitko prikazan na sliki 26.



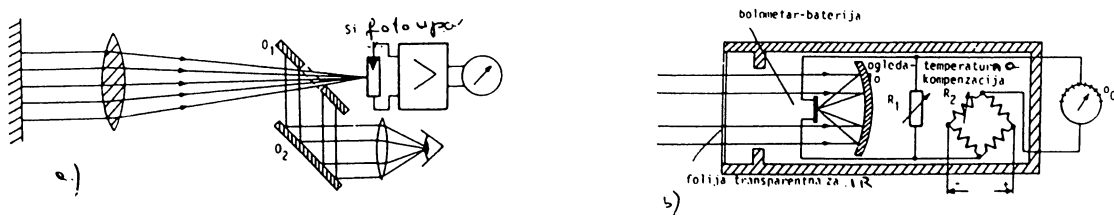
Slika 26: Spektralni pirometer na 'izginjajočo' nitko (a), prikaz pogoja nastavitve enake svetlosti nitke in površine sevalca (b)

Spektralni pirometri na nitko so uporabljivi za $T > 700$ °C. Ta omejitev izvira iz dejstva, da le telesa nad $T > 700$ °C sevajo dovolj energije v vidnem delu spektra (ker se kot senzor koristi oko). Ta instrument ima običajno dva merilna obsega; (700 do 1500) °C, in (1500 do 2200) °C (s sivim filtrom). Osnovna pomanjkljivost spektralnega pirometra je odvisnost točnosti od subjektivnih faktorjev (opazovalca). Napake tehničnih spektralnih pirometrov na nitko so (10 do 20) °C, vrhunske laboratorijske naprave pa dosežejo napako 1 °C pri 1000 °C.

11.2.2 Senzorji za radiacijske TM

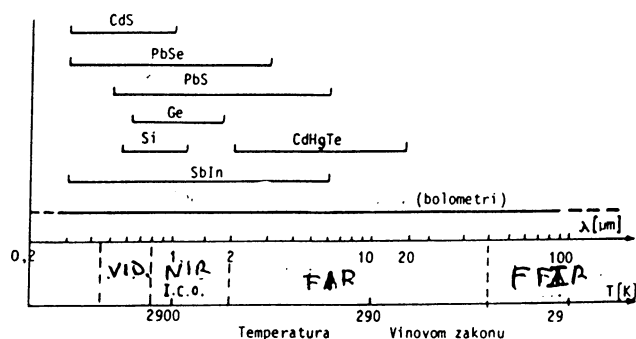
Opisani optični spektralni pirometer uporablja kot senzor sevanja oko in kot tak je neuporaben v sistemih za avtomatsko registriranje T in upravljanje procesov. Ostali radiacijski TM uporabljajo senzorje, ki objektivno merijo sevanje s konverzijo sevanja v električni signal (slika 27). Te senzorje delimo na:

- fotoelektrične, ki pretvarjajo svetlobno sevanje v električni signal na osnovi fotoefekta (npr., fotoupori, fotodiode, fototranzistorji) (slika 27a);
- toplotne (bolometri), katerih osnova je uporovni element ali TČ (slika 27b).



Slika 27: Radiacijski TM: a) za določen razpon valovnih dolžin s Si fotouporom, b) integralni s TČ baterijo

Za vsak material fotodetektorja obstaja maksimalna valovna dolžina λ oz. minimalna energija fotona, ki lahko da proste elektrone. Pri manjšanju λ vpadnega sevanja se občutljivost detektorja veča do nekega maksimuma, potem pa pada zaradi manjše verjetnosti interakcije fotona z vezanimi elektroni v materialu. Od določene minimalne λ je občutljivost senzorja praktično nula. Na sliki 28 so prikazane približne meje uporabnosti izbranih materialov za detekcijo toplotnega sevanja. Izbira tipa senzorja prvenstveno zavisi od razpona T v katerem se meri. Iz spodnje skale so razvidne valovne dolžine λ_{\max} pri katerih ima sevanje maksimalno spektralno gostoto pri določeni T .



Slika 28: Obsegi uporabnosti posameznih radiacijskih senzorjev

11.2.4 Integralni pirometri (bolometri)

Osnovni deli pirometrov so optični sistem, senzor in merilna veriga za obdelavo in indikacijo dobljenega električnega signala. Najenostavnejši optični sistem pirometra se sestoji iz zaslonke postavljene pred senzorjem (slika 29a). Pomanjkljivost te enostavne 'optike' je, da senzor 'vidi' veliko površino S merjenca, ki običajno nima enake T . Če se zaslonka zoži, je površina S_1 , katere T se meri, manjša. S tem se zmanjša tudi energija, ki pade na senzor, in tudi občutljivost merjenja. Boljše lastnosti ima optični sistem z zbiralno lečo, ki 'fokusira' večji del sevanja s površine S na detektor (slika 29b). S tem se meri T manjših merjencev z dobro občutljivostjo.

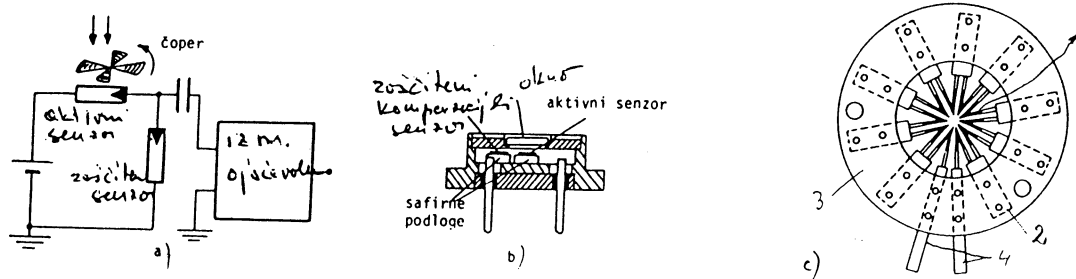


Slika 29: Optični sistem pirometra; a) z zaslonko, b) z zbiralno lečo

Za tehnične pirometre proizvajalec predpisuje razdaljo med merjencem in pirometrom, kakor tudi minimalne dimenzije merjenca. Postavljanje pirometra znotraj predpisanega obsega razdalj ne vpliva na točnost merjenja.

Kot senzor služi fotoupor v obliki tanke ploščice (slika 30a) ali termistor (slika 30b), ki pod vplivom z merjenca vpadlega sevanja spremenita svojo upornost, ali TČ baterija (slika 30c). Uporovni bolometri uporabljajo kot senzor kovinski upor (film debeline nekaj $10 \mu\text{m}$ naparjen na kvarčni podlagi, $\tau \approx 1 \text{ ms}$) ali termistor. V enem ohišju se občajno nahajata dva

senzorja: prvi, aktivni, je izpostavljen sevanju; drugi pa je zaščiten in služi za kompenzacijo T okolice (slika 30). Senzorja se vežeta v diferencialni veji ustreznega mostiča ali zaporedno v vejo v smislu potenciometriškega upora. Pri merjenju toplotnega sevanja se namesto enosmernega režima koristi izmenični režim detektiranja s pomočjo sekalca ('čoper-ja') (slika 30a). Prednost 'čopanja' je v tem, da se nadaljno ojačanje signala izvaja z izmeničnimi ojačevalci, ki so po pravilu stabilnejši od enosmernih. Po drugi strani, sevanje z ohišja in neposredne okolice na sensor ni 'čopano'. Električni signal izvirajoč iz te 'motnje', je enosmeren in se ne ojača.



Slika 30: a) Shema bolometra z mehanskim čoperjem, b) shema senzorstega bolometra, c) shema bolometričnega senzorstega s TČ baterijo (1-topli spoj, 2-kovinska ploščica, 3-telo senzorstega, 4-priključki za vodnika);

Pri TČ bateriji so aktivni konci pritrjeni na kovinsko ploščico (premazano s sajami ali črno pobarvano s posebnim spray-em), ki se izpostavi sevanju (slika 30c). Referenčne konce se zaščitijo pred sevanjem in služijo za kompenzacijo T okolice. Senzorji bolometrov se obnašajo kot črno telo v širokem pasu valovnih dolžin od vidnega dela EM spektra pa vse do 1000 μm in več.

Komentar: Termistorski bolometri (slika 30b) imajo pri sobni T veliko upornost (1 do 3) $\text{M}\Omega$, tako da je napetost napajanja lahko velika ($> 100 \text{ V}$) s samosegrevanjem le 10 $^{\circ}\text{C}$. Bolometri s termistorjem v enosmernem režimu delovanja so za dva reda velikosti bolj občutljivi od kovinskih bolometrov in bolometrov s termočleni. V izmeničnem režimu nimajo te prednosti zaradi termičnega šuma (Johnsson-ov šum).

Konstantna spektralna občutljivost bolometra je gotovo prednost pred spektralno občutljivostjo polprevodniških elementov. Seveda, občutljivost bolometra je praviloma veliko manjša od občutljivosti polprevodnikov v spektralnem obsegu valovnih dolžin v katerem so uporabni. Eden od kriterijev za vrednotenje karakteristik bolometrov je prag občutljivosti, ki predstavlja minimalno moč sevanja, ki jo je pri danih pogojih dela možno še zaznati (detektirati). V tabeli 4 so podani tipični podatki za nekatere IR senzorstega.

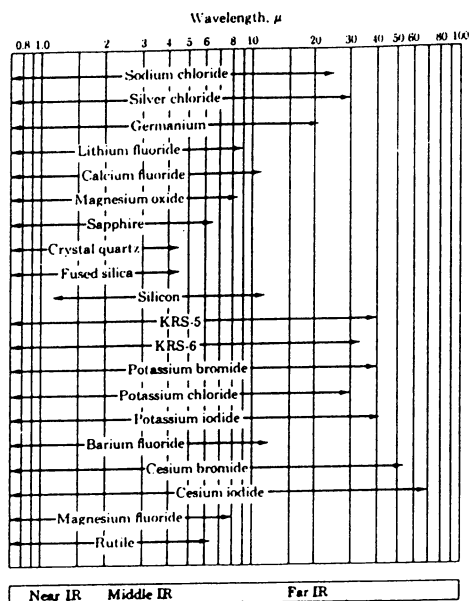
Tabela 4: Tipični podatki za nekatere IR senzorstega

vrsta senzorstega	prag občutljivosti (W)	odzivni čas (ms)	občutljivost (V/W)
termistorski bolometer	2×10^{-10}	1.5 do 30	700 do 1200
Bolometer s TČ baterijo	$(0.7 \text{ do } 2) \times 10^{-11}$	5 do 300	3 do 90
bolometer z Ni filmom	3×10^{-9}	4	0.4
PbS celica	$(4 \text{ do } 40) \times 10^{-12}$	0.04 do 2	15×10^4
InSb fotoupor	1×10^{-9}	0.001	1

Materiali leč optičnih sistemov pirometrov morajo, imeti čim manjšo absorbcijo, tj. čim večjo propustnost v celotnem obsegu valovnih dolžin v katerem merjenec seva večji del svoje energije (slika 30). Navadna stekla so transparentna za IR do (2 do 3) μm . Kvarčno steklo ima mejo pri 4 μm in se lahko koristi za merjenje

temperatur do 150 °C. Za $\lambda > 4 \mu\text{m}$ so vsa stekla praktično neprozorna. Za FIR področje od (1.8 do 20) μm se uporablja Ge. Od ostalih materialov še ZnSe, ZnS, CdTe. Ker imajo ti materiali velik lomni količnik, se z njimi da narediti leče s kratkimi goriščnimi razdaljami. Optični sistemi s tako optiko so zato majhni po dimenzijah. Možne so meritve do sobne temperature (termovizija). V višjem IR področju se optični sistemi konstruirajo s pomočjo zrcal, katerih optične lastnosti niso odvisne od λ .

Slika 31: Materiali za optične sisteme pirometrov



Naloge: **Temperatura**

1) Na sliki 1 je prikazana poenostavljena shema termometra z Ni uporovnim elementom. V danem temperaturnem obsegu se upornost elementa lahko opiše s kvadratno enačbo

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2),$$

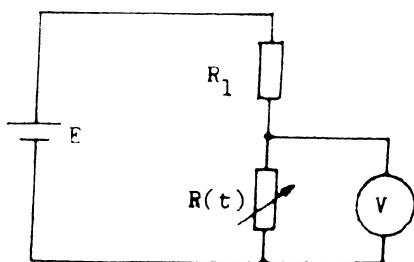
kjer je $R_0 = 50 \Omega$, $\alpha = 6.01 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 6.53 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

- Določi upornost R_1 tako, da bo napetost, ki jo kaže voltmeter, približno linearna funkcija temperature.
- Določi napetost izvora za napajanje pod pogojem, da bo v intervalu (0 do 50) $^\circ\text{C}$ maksimalna disipacija v uporovnem elementu 1mW.
- Izračunaj občutljivost termometra.

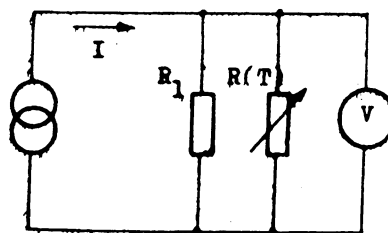
2) Na sliki 2 je prikazan lineariziran termistorski termometer, ki se napaja iz izvora konstantnega toka. Parametri termistorja so:

$$R(25 \text{ }^\circ\text{C}) = 5 \text{ k}\Omega \text{ in } B = 3500 \text{ K merilni obseg pa (0 do 30) }^\circ\text{C}.$$

- Določi upornost R_1 in tok I , če je maksimalna izhodna napetost $U_{\text{max}} = 1 \text{ V}$.
- Določi maksimalno in srednjo občutljivost termometra v danem razponu.



Slika 1



Slika 2

3) Približna oblika nekega Fe-konstantan termočlenskega spoja je kroglica s premerom 1.5 mm. Predpostavimo, da je termočlen izpostavljen konvektivnemu okolju z $\alpha_p = 75 \text{ W /m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Določi časovno konstanto termočlena. Za lastnosti materiala, ki so potrebne za izračun, izberi tiste, ki veljajo za Fe.

3) Termoelektrični efekt se uporablja tudi za generacijo električne moči. Izračunaj, s pomočjo priložene tabele, termoelektrično občutljivost naprave v kateri se, kot različna materiala, uporabljata Bi in Te. Oceni maksimalno vrednost generirane napetosti za $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ razliko okrog sobne temperature z uporabo enega spoja.

4) Približna oblika nekega Fe konstantan termočlenskega spoja je kroglica s premerom 1.5 mm . Predpostavimo, da je termočlen izpostavljen konvektivnemu okolju z $\alpha_p = 75\text{ W / m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Določi časovno konstanto termočlena. Za lastnosti materiala, ki so potrebne za izračun, izberi tiste, ki veljajo za Fe.

5) Z bolometrom smo merilo energijo, ki jo seva kos kovine. S predpostavko, da je emisivnost površine 0.82 , smo določili njegovo temperaturo, ki znaša $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kasneje smo ugotovili, da je dejanska emisivnost 0.75 . Izračunaj napako pri določanju temperature.

MERJENJE TLAKA

1. Uvod

Tlak je neelektrična veličina, katerega merjenje se, poleg temperature, najpogosteje opravlja v številnih področjih kot so industrija, promet, medicina, meteorologija. Tlaki se merijo v razponu od visokih tlakov nad 10^{10} Pa pa do ultravakuuma 10^{-10} Pa. V tako širokem razponu (20 dekad) se koristi več merilnih metod in vrst senzorjev.

Primarno važnost v metrologiji imajo absolutne meritve pri katerih se tlak določa po svoji definiciji kot razmerje normalne sile F in površine A , pri čemer se obe veličini merita z neko od absolutnih metod. Precizni absolutni manometri (MN), čeprav v principu enostavni, predstavljajo drage instrumente za statična merjenja v laboratorijih in to v glavnem kot etaloni za kalibracijo:

za srednje in višje tlake: tekočinski MN, MN na bat, MN s potopljenim zvonom
za visoke tlake: instrument z žičnim uporabnim senzorjem (Bridgman gage)
za nižji vakuum: McLeod-ov vakuummeter (kot najvažnejši absolutni instrument)

V vsakodnevni tehnični praksi se namesto absolutnih merilcev koristijo številni, po konstrukciji enostavnejši merilci manjše točnosti, ki uporabljajo posebne senzorje:

za srednje in višje tlake: senzori na principu;
- deformacij elastičnih elementov
(diafragme, membrane, votli elementi, npr. Bourdonova cev, aneroidi, membrane, ipd.)
- piezoelektričnega efekta (PZE elementi)
- piezouporovnega efekta.
za nižji in srednji vakuum: Pirani vakuummeter na vročo žico.

2. Absolutne metode merjenja srednjih in višjih tlakov

2.1 Tekočinski manometri

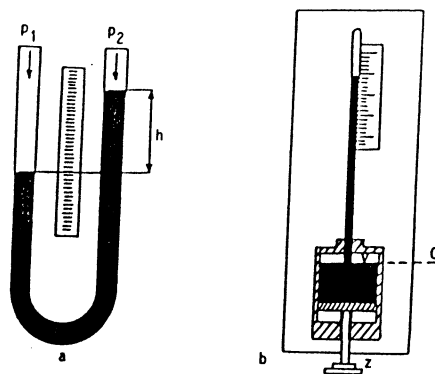
Tekočinski MN se v glavnem koristijo za precizne absolutne meritve statičnega tlaka v laboratorijskih pogojih in kot etaloni za kalibracijo drugih tipov MN. Dva osnovna tipa sta prikazana na sliki 1. MN z U-cevjo kaže razliko tlakov nad površinama tekočine v krakih cevi. Deluje na principu vezanih posod. V stacionarnem stanju je razlika tlakov enaka hidrostatičnemu tlaku tekočine:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho gh,$$

kjer je ρ gostota tekočine in g gravitacijski pospešek. Običajna tekočina je Hg, lahko pa tudi voda ali alkohol. V praksi se kot referenčni tlak uporablja atmosferski tlak.

Na sliki 1b je prikazan barometer z enim krakom in rezervoarjem za merjenje atmosferskega tlaka. Pred odčitavanjem nivoja Hg na skali se s pomočjo vijaka Z nastavi nivo Hg v rezervoarju tako, da se ujema z oznako 0.

Slika 1: Tekočinski manometri;
 a) z U-cevjo,
 b) barometer



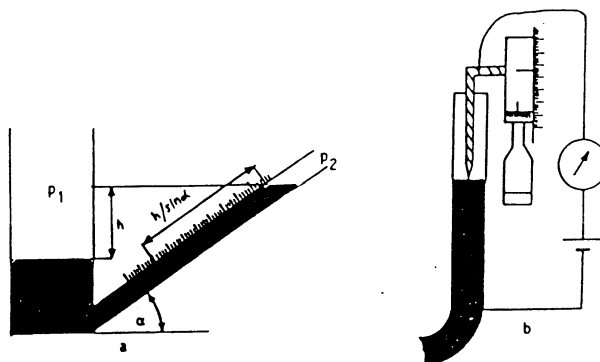
Za precizne meritve z U-MN je treba izpolniti določene pogoje. Poznati je treba točno vrednost gostote ρ . Za odpravo negotovosti zaradi temperature [raztezanje tekočine, $h' = h(1 + \gamma T)$] se ti MN termostatirajo. Drugi problem je precizno določanje nivoja tekočine v obeh krakih. Uporabljajo se različne optične metode. Odčitavanja otežujejo tudi oscilacije stolpca Hg. Stolpec se obnaša kot dinamični sistem z zelo majhnim dušenjem. Vplivom kapilarnih pojavov se izognemo z uporabo večjih premerov cevi (1.5 do 5) cm, kar pomeni, da ti MN vsebujejo znatne količine Hg. Poznati je treba tudi točno vrednost lokalnega zemeljskega pospeška.

V uporabi so tudi modifikacije osnovnega tipa MN od katerih ena je tz. MN z nagnjenim krakom (slika 2a). Eden od krakov je nagnjen po kotom α glede na horizontalo. Dolžina stolpca tekočine v nagnjenem kraku, ki ustreza razliki nivojev h , je $h/\sin\alpha$. Z nagibom se torej občutljivost MN poveča za $1/\sin\alpha$ v primerjavi z MN s pokončnim krakom.

Merjenje zelo majhnih razlik tlakov se opravlja s tz. mikromanometrom. To so MN pokončnega ali nagnjenega tipa opremljeni s preciznim optičnim ali električnim odčitavanjem nivoja tekočine. Na sliki 2b je prikazan eden od krakov pri katerem se nivo Hg odčituje s pomočjo električnega kontakta. Nad Hg je z mikrometrom nastavljiva elektroda. Nastanek kontakta registrira v krog vključeni Ω -meter. Napaka odčitavanja znaša 0.01 mm.

Slika 2:

- a) Manometer z nagnjenim krakom,
 b) določevanje Hg nivoja pri mikromanometru



Opomba: S Hg-MN se meri tlake do 5×10^6 Pa (50 bar – gornja meja). Stare enote: 1 bar = 760 mm Hg; 1 mm Hg = 1 tor.

2.2 Manometri na bat

Batni manometri so precizne naprave za absolutno merjenje tlaka, ki majo v primerjavi z Hg-MN znatno večji obseg, enostavnejši postopek merjenja in lažje vzdrževanje. Shema take naprave je prikazana na sliki 3.

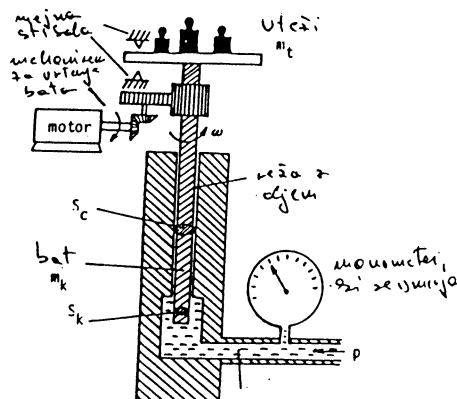
Slika 3: Manometer na bat

Sestavni deli so vertikalni cilindri izvrtani v masivnem kovinskem bloku in bat z maso m_b na katerega se postavljajo uteži m_u . Kot delovna tekočina se uporabljajo posebna brez kislin olja. Olje pod tlakom p pritiska bat s silo $F_b = A_b p$. Tej sili se zoperstavlja sila teže bata in

$$p = \frac{g(m_b + m_u)}{A_b} + p_a$$

Ker se vse veličine na desni strani enačbe lahko izmerijo z osnovnimi veličinami (mase, dolžine, časa), je merjenje z batom absolutno in neodvisno od 'etaloniranja' s pomočjo nekega drugega merilca. Opomba: Lahko merijo tudi tlaki nižji od p_a , če se evakuira del, kjer so uteži.

Slika 3: Manometer na bat



2.3 Manometri s potopljenim zvonom

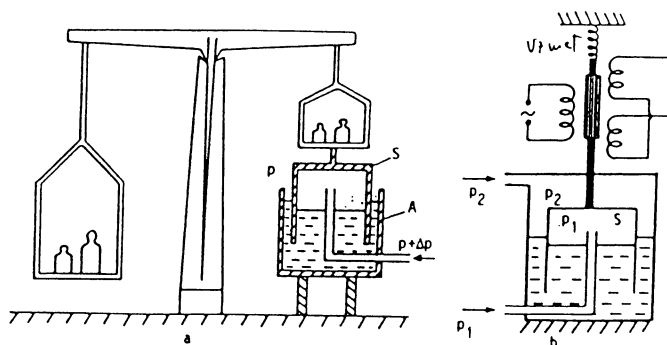
Uporaba: za merjenje tlaka blizu atmosferskega

MN se sestoji iz enakokrake tehtnice. Na enem koncu je pritrjen valj z odprtim koncem potopljenim v tekočino. Tekočina se nahaja v posodi A, ki stoji na podlagi. Tehtnico se uravnovesi, ko je tlak v zvonu enak atmosferskemu. Pri spremembi tlaka deluje na dno cilindra sila $F = A\Delta p$, kjer je A poznana površina in Δp tlačna sprememba. Sila F se meri z dodajanjem uteži do ponovnega ravnovesja. Merilni princip je torej isti kot pri batnem MN. Odlikuje se z veliko natančnostjo, ki v obsegu do 2×10^3 Pa znaša 0.1 Pa.

MN na principu zvona se uporabljajo tudi v industriji. Za merjenje premika zvona služi induktivni pretvornik (slika 4b).

Slika 4:

- a) Absolutno merjenje tlaka na principu potopljenega zvona, b) uporaba metode zvona za diferencialne meritve s pomočjo induktivnega senzorja



2.4 Dinamika tekočinskih manometrov

Kapljevinski MN se uporabljajo za statična merjenja tlaka. Da je to tako si oglejmo kako je z dinamičnim obnašanjem tekočinskih MN na primeru U-cevi. Model je prikazan na sliki 5.

V času gibanja stolpca Hg velja naslednje dinamično ravnovesje sil, ki deluje na tekočino:

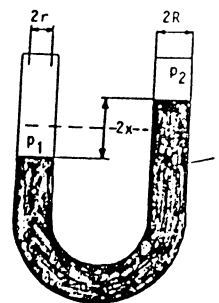
$$F_{\Delta p} + F_{tr} + F_g = m_s a$$

$$F_{\Delta p} = \text{sila zaradi razlike tlakov } \Delta p = p_1 - p_2 (= \pi R^2 \Delta p);$$

$$F_{tr} = \text{sila viskoznega trenja med tekočino in steno cevi } (= 8\pi\eta L g 2x);$$

$$F_g = \text{sila teže zaradi razlike višin tekočine v krakih } (= \pi R^2 \rho g 2 \dot{X});$$

m_s = masa celotne tekočine v cevi;
 a = pospešek tekočine;
 \dot{X} = hitrost tekočine;
 η = dinamična viskoznost;
 L = dolžina Hg stebra.



Slika 5: Model za dinamično analizo tekočinskega MN

Z navedenimi enačbami dokaj hitro pridemo do diferencialne enačbe drugega reda za gibanje tekočine:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_s \dot{x} + \omega_s^2 x = \frac{4 \Delta p}{3 \rho L}$$

kjer sta

$$\omega_s = \sqrt{\frac{3g}{2L}} \quad \text{in} \quad \xi = \frac{\eta}{\rho R^2} \sqrt{\frac{6L}{g}}$$

ustrezno, lastna krožna frekvenca in konstanta dušenja.

Karakteristika tekočinskega MN je zelo majhen ξ (za $R = 0.5$ cm in $L = 1$ m, je $\xi = 0.01$), kar pomeni dolgo iznihavanje stolpca pri vsaki spremembi tlaka in s tem neprimernost njihove uporabe za dinamična merjenja tlaka.

3. Absolutne metode merjenja visokih tlakov

Znano je, da se upornost tanke žice v odvisnosti od tlaka spreminja po enačbi:

$$R = R_1 (1 + b\Delta p)$$

kjer je R_1 upor žice ($\sim 100 \Omega$) pri p_a (1 bar-u) navite v obliki tuljavce in vstavljene v ustrezno ohišje, b pa tlačni koeficient upornosti. Za žico iz manganina (84 % Cu, 12 % Mn, 4 % Ni) je $b = 2.5 \times 10^{-11}/\text{Pa}$. S to metodo se da meriti tlake do 10^5 bar-ov, natančnost ~ 0.1 %. Frekvenčni odziv žice je sicer zelo hiter (~ 1 MHz), vendar je celotni odziv sistema (zaradi počasnejšega akustičnega odziva transmisijske tekočine precej manjši).

4. Tehnični merilci tlaka

4.1 Senzorji tlaka na principu elastičnih deformacij

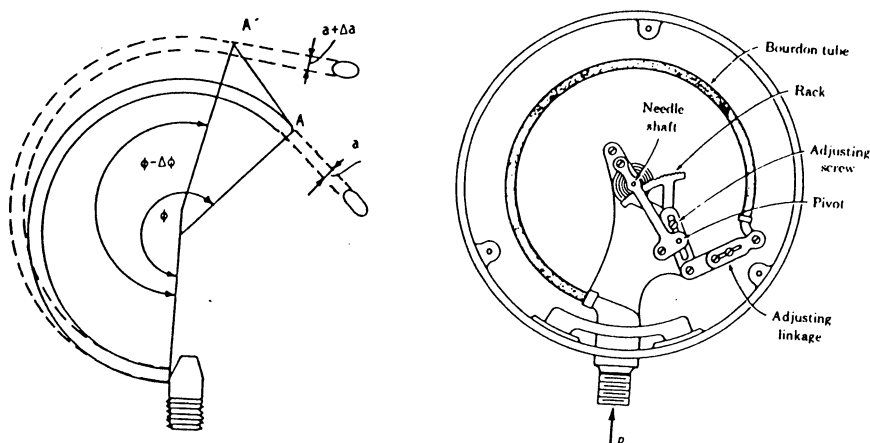
V praktičnih meritvah tlaka (statičnega ali dinamičnega) se najpogosteje uporabljajo senzorji delujoči na osnovi elastičnih deformacij tankih kovinskih elementov. Elastični element lahko potisne mehanizem s kazalcem s katerim se odčitava tlak. V telemetriji, avtomatiki in električnih merilnih instrumentih se deformacija elastičnega elementa pretvori v električni signal s pomočjo primerne senzorja giba (pomika).

Najpogostejši elastični senzorji so Bourdonove cevi, membrane, votli tanki cilindri, ipd. Lahko se koristijo za merjenje majhnih kakor tudi zelo visokih tlakov (7×10^8 Pa = 7000 bar). Lastna frekvenca nekaterih od teh je več 10 kHz, kar omogoča merjenje tudi dinamičnih sprememb tlakov. Elastični senzorji, obremenjeni nad dovoljeno mejo, trajno spremenijo svojo karakteristiko, kar je pri eksploataciji potrebno upoštevati.

4.1.1 Bourdonova cev

Bourdonova cev predstavlja najstarejši in verjetno še vedno najpogosteje uporabljeni merilec tlaka. Osnovni tip Bourdonove C-cevi je prikazan na sliki 6.

Slika 6:
Bourdonova cev C-tipa
a) princip,
b) konstrukcija.



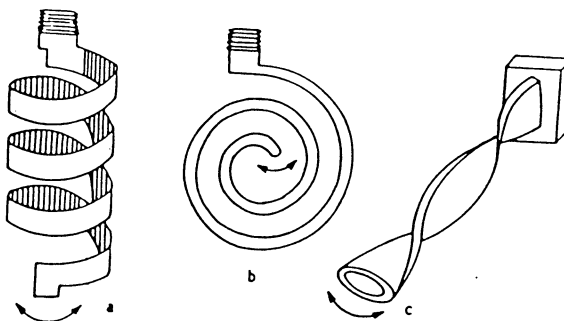
Prečni presek cevi je sploščen (elipsaste oblike). Pod vplivom razlike tlakov (notranjega in zunanjega) Δp presek teži bolj in bolj h krožni obliki. Analiza deformacije Bourdonove cevi je zelo komplicirana. Rezultat pokaže, da so relativne deformacije $\Delta a / a$ krajše osi eliptičnega preseka in relativne spremembe zasučnega kota cevi $\Delta\phi/\phi$ sorazmerne razliki Δp :

$$\Delta a / a = - \Delta\phi/\phi = \text{konst.} \times \Delta p$$

Opomba: Kot izhodna veličina Bourdonove cevi se koristi pomik prostega konca $\Delta l = \overline{AA'}$, ki je tudi sorazmeren z Δp .

Občutljivost Bourdonove cevi raste s povečanjem zasučnega kota ϕ . Praktično se to izvede (slika 7) v obliki helikoidnih (7a), spiralnih (7b) ali uvitih (d) cevi s čemer se kot ϕ poveča za (1 do 10) polnih kotov. Občutljivost se tudi poveča: z zmanjšanjem debeline cevi, s povečanjem sploščenosti prečnega preseka, z zmanjšanjem krivinskega radija, z zmanjšanjem elastičnega modula.

Slika 7: Izvedbe Bourdonovih cevi



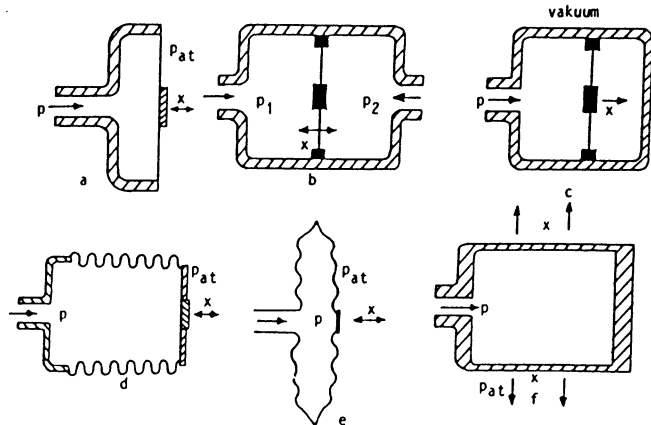
Materiali morajo imeti čim manjše notranje izgube (čim manjšo mehansko histerezo), ker le-te predstavljajo nenatančnost senzorja na direkten način. Primerni materiali so jeklo (za vzmeti) in bronca. Cevi z dobrimi elastičnimi lastnostmi imajo tudi zelo majhen koeficient dušenja in so zato zelo podvržene nihanjem zaradi morebitno prisotnih mehanskih sunkov. Nihanja se lahko delno 'zaduši' tako, da se cevi postavi v posodo napolnjeno s silikonskim oljem. Merilni obseg (0 do 1000) bar-ov s točnostjo $\pm (2 \text{ do } 3) \%$.

4.1.2 Membranski senzorji

Membranski senzorji se uporabljajo v širokem razponu tlakov, od nižjega vakuumu do visokih tlakov (1×10^8 Pa). Sila zaradi razlike Δp z obeh strani membrane se izenačuje z elastično silo membrane, kar povzroča deformacijo $\propto \Delta p$. V splošnem deformacija ni linearna funkcija tlaka. Praktični senzorji se uporabljajo v omejenem obsegu v katerem je karakteristika približno linearna, odnosno nelinearnost ne presega (1 do 5) %.

Slika 8:

Primeri praktičnih elastičnih senzorjev;
a), b), c) s tanko membrano (diafragmo),
d) in e) aneroidi, f) s tankostenskim valjem



Senzorji za srednje in visoke tlake koristijo atmosferski tlak kot referenco, sliki 8a in 8b. Pri merjenju zelo nizkih tlakov, kot referenčni tlak služi vakuum, slika 8c. Valovite (harmonikaste) membrane (slika 8d in 8e) dajejo večji pomik od ravnih. Najpogosteje uporabljen senzor z valovito membrano je aneroid. Za merjenje visokih tlakov se koristijo senzorji v obliki valja (tanko jeklo, slika 8f). Pri delovanju tlaka se polmer valja povečuje s porastom tlaka.

4.1.3 Elastični senzorji z električnim izhodom

Elastične deformacije se lahko pretvorijo v električni signal na več načinov; s potenciometri, z induktivnimi in kapacitivnimi pretvorniki, merilnimi trakovi, s PZE pretvorniki, optoelektronsko in drugimi pretvorniki za gib (pomik). Taki pretvorniki se uporabljajo v električnih merilnih instrumentih in napravah za avtomatsko kontrolo v industriji.

4.1.3.1 MN s potenciometri

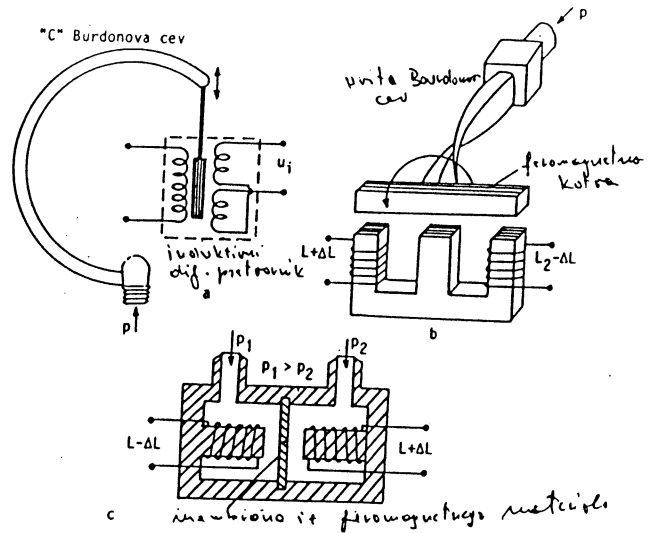
Potenciometre (žične ali slojne) je enostavno kombinirati z elastičnimi senzorji tako, da se drsnik poveže z gibljivim koncem senzorskega elementa. Njihova osnovna prednost je enostavnost in velik izhodni signal, ki se lahko direktno vodi na indikator. Slaba stran je majhna točnost (majhna resolucija žičnih potenciometrov, obraba uporabnega sloja), relativno kratek življenjski čas, trenje v drsniku zmanjšuje točnost, ki bi jo imel sam elastični element.

4.1.3.2 MN z induktivnim pretvornikom

Na slikah 9a in 9b sta prikazani dve varianti induktivnih pretvornikov za linearni in kotni pomik v kombinaciji z Bourdonovo C- in uvito-cevjo. Slika 9c je pretvornik z debelo membrano iz feromagnetnega materiala. Zaradi razlik tlaka v komorah pride do premika membrane, ki se ga meri z diferencialnim induktivnim pretvornikom. V primerjavi s potenciometri, induktivni MN so preciznejši in imajo večjo življenjsko dobo. Po drugi strani pa zahtevajo dražje komponente. Princip delovanja induktivnega pretvornika je opisan v poglavju merjenja gibov (pomikov).

4

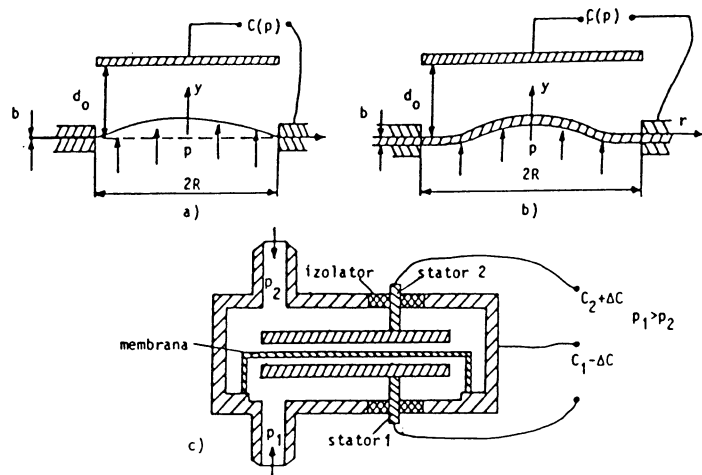
Slika 9:
Merjenje tlaka z induktivnim pretvornikom v kombinaciji z različnimi elastičnimi senzorji; a) C-tip, b) uvite Bourdonove cevi, c) z debelo membrano.



4.1.3.3 MN s kapacitivnim pretvornikom

Dva osnovna tipa kapacitivnih merilcev za merjenje tlaka s tanko in debelo membrano sta prikazana na slikah 10a in 10b.

Slika 10:
Merjenje tlaka s kapacitivnim pretvornikom v kombinaciji z različnimi elastičnimi senzorji; a) tanka membrana, b) debela membrana, c) diferencialni metoda.



Tanka, okrogla, po obsegu napeta membrana se pod vplivom tlaka deformira tako, da ima njena površina obliko žoge. Pri manjših tlakih je deformacija membrane y na razdalji r od centra, pri pogoju $y_{\max} \ll R$, podana z enačbo:

$$y = \frac{P}{4M} (R^2 - r^2), \quad (1)$$

kjer je M sila na enoto dolžine (v N/m). Kapacitivni pretvornik na sliki 10a se sestoji iz tanke membrane kot gibljive ploščice in fiksne ploščice postavljene na razdalji d_0 od membrane. Kapacitivnost obročka membrane radija r in debeline dr pri predpostavki, da je električno polje homogeno, je

$$dC = \frac{\epsilon_0 2\pi r dr}{d_0 - y} \cong \frac{\epsilon_0 2\pi}{d_0} \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) r dr. \quad (2)$$

Z uporabo enačbe (1) v enačbi (2) in integracijo, dobimo za kapacitivnost C pretvornika naslednji izraz:

$$C(p) = \int_0^R dC = C_0 \left(1 + \frac{R^2}{8Sd_0} p\right),$$

kjer je $C_o = \epsilon_o \pi R^2/d_o$ kapacitivnost pri $p = 0$.

Lastna (osnovna) frekvenca tanke krožne membrane je:

$$f_L = \frac{1.20}{\pi R} \sqrt{\frac{M}{\rho b}} \quad (3)$$

kjer je b debelina in ρ gostota materiala. Pri dinamičnih meritvah merjena frekvenca mora biti (5 do 10)-krat nižja od f_L .

Pri izvajanju enačbe (3) ni bil upoštevan vpliv tekočine na gibanje membrane. Pri merjenju v tekočinah je, zaradi vztrajnosti tekočine, dejanska frekvenca f_L membrane nižja od vrednosti izračunane po enačbi (3). Če je na drugi strani membrane zaprta manjša količina plina, pride, zaradi kompresibilnosti plina, do povečanja ekvivalentne togosti (vzmetne konstante) membrane in s tem povečanje f_L membrane. Sile, ki membrano nategujejo in trenje na robovih tudi vplivajo na f_L . Enačba (3) zato daje zgolj orientacijsko vrednost za lastno frekvenco, ki jo je treba eksperimentalno določiti.

Največje število pretvornikov za merjenje tlaka se lahko prikaže z modelom na sliki 10b. Pomik debele membrane pod vplivom tlaka p je dan z naslednjo enačbo:

$$y = \frac{3}{16} \frac{1 - \mu^2}{E b^3} (R^2 - r^2)^2 p \quad (4)$$

kjer je μ Poissonovo število in E elastični modul materiala membrane. Z zamenjavo (4) v (3) dobimo za kapacitivnost pretvornika

$$C(p) = C_o \left(1 + K \frac{R^4}{3d_o} p \right),$$

kjer je $C_o = \epsilon_o \pi R^2/d_o$ in $K = (3/16)(1 - \mu^2) / E b^2$. Lastna frekvenca debele membrane je

$$f_L = \frac{2.55b}{\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1 - \mu^2)}}.$$

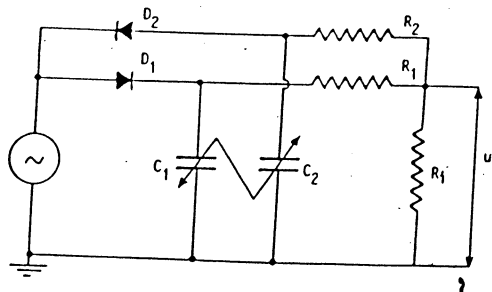
Membrane za visoke tlake imajo večjo debelino b in s tem višjo lastno frekvenco f_L . Vrednosti f_L za praktične membrane so velikosti (1 do 100) kHz. Komercialni membranski pretvorniki se uporabljajo v širokem obsegu tlakov od 3 kPa do 400 MPa.

V praksi se veliko koristijo kapacitivni pretvorniki z dvema stacionarnima (fiksna) elektrodama. Na sliki 10c je prikazan poenostavljen primer merjenja tlaka s pomočjo diferencialnega pretvornika. Z uporabo le-tega se v veliki meri kompenzira vpliv temperature okolice, poboljša občutljivost in linearnost. Ena od shem vezja za merjenje tlaka s pomočjo diferencialnega pretvornika je prikazana na sliki 11.

Izvor izmenične napetosti polni skozi diode D_1 in D_2 diferencialne kondenzatorje C_1 in C_2 v dveh različnih polperiodah napetosti (slika 11). Kondenzatorja se izmenično praznita preko skupnega upora R_i pri čemer sta tokova praznjenja nasprotnega predznaka. Na ta način je srednja vrednost izhodne napetosti u_i v simetričnem položaju enaka nič. Pri premikanju membrane sta spremembi kapacitivnosti kondenzatorjev C_1 in C_2 v nasprotni smeri, kar povečuje tok praznjenja v eni smeri in zmanjšuje v drugi. Pri tem dobimo enosmerno izhodno napetost, ki je sorazmerna s spremembo kapacitivnosti. Znak izhodne napetosti določa smer pomikanja membrane.

Slika 11:
Shema vezja za merjenje tlaka s pomočjo diferencialnega pretvornika

†



4.1.4 MN z merilnimi trakovi

(glej Merjenje napetosti in sil v togih telesih – tenzometrija)

4.1.5 Piezoelektrični senzorji za dinamična merjenja tlaka

(glej Piezoelektrična tipala)

5. Merjenje nižjega in srednjega vakuuma

Vsi doslej opisani manometri imajo omejeno uporabo pri nizkih tlakih zaradi majhne občutljivosti. Bourdonove cevi se lahko uporabljajo do 10^3 Pa, aneroidi pa do 10 Pa. Najnižja spodnja meja za elastične senzorje je 0.1 Pa (s tanko membrano). Spodnja meja Hg manometra (ki je tudi etalon za srednje tlake), je 10 Pa, kar ustreza višini Hg stolpca velikosti 0.1 mm.

5.1 McLeod-ov vakuummeter (absolutna metoda)

Princip: Komprimiranje vzorca nizkotlačnega plina do tlakov, ki se dajo odčitavati z navadnim Hg-MN.

McLeod-ov vakuummeter je modificirana verzija Hg-MN in se uporablja tudi kot etalon v razponu 10 Pa do 10^{-2} Pa. V primerjavi z navadnimi Hg-MN ima večjo občutljivost ustvarjeno s komprimiranjem plina, ki se meri. Shema McLeod-a je prikazana na sliki 12.

Komora v kateri se meri tlak se priključi na odprtino cevi A. V začetnem stanju največji del Hg se nahaja v rezervoarju B, ki je zaprt z gibljivim batom. S pomočjo bata se Hg lahko potiska v levi del vakuumetra (potiskanje se lahko doseže z atmosferskim tlakom, če se bat zamenja z ventilom za spuščanje zraka v zgornji del rezervoarja). V trenutku ko Hg, katerega nivo v levem kraku raste, doseže nivo C-C, se cev D oddvoji od merjenega tlaka in pri nadaljnjem dviganju Hg se plin v cevi D komprimira. Zaradi tega je dvigovanje Hg stolpca v cevi A hitrejšo kot v cevi D. V trenutku ko Hg v cevi A doseže nivo E-E, se odčita razlika H v nivoju Hg. Pri tem se Hg v cevi D nahaja v zoženem delu, ki je po volumnu kalibriran. Celotni volumen V_0 cevi D je znan, volumen V_1 komprimiranega plina v trenutku odčitavanja je $V_1 = H A_k$, kjer je A_k presek zoženega dela. Zveza med merjenim tlakom p in tlakom stisnjenega dela plina p_1 je

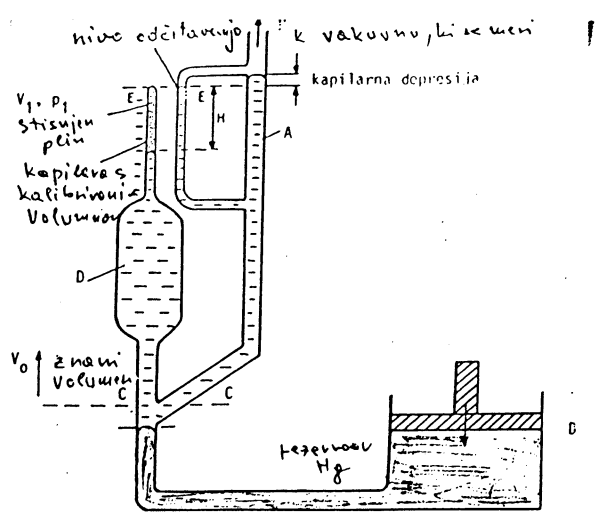
$$p_1 = p + \rho g H .$$

S pomočjo Boyle-Mariottovega zakona ($pV = pV_0 = p_1V_1 = p_1 A_k H$) se dobi

$$p = \frac{V_1 \rho g H}{V_0 - V_1} \approx konst. x H^2 ,$$

ker je $V_0 \gg V_1$ in $konst. = \rho g A_k / V_0$.

‡



Slika 12: McLeod-ov vakuummeter

Merjenje z McLeod-om je absolutno, ker se vsi parametri dobijo z merjenjem osnovnih veličin; dolžine, mase, časa. Relativna natančnost je 0.1% pri 10 Pa in 1% pri 10^{-2} Pa. Če se v razredčenem plinu nahajajo pare olja, vode in dr., pride pri kompresiji do delne kondenzacije, kar predstavlja eden od osnovnih vzrokov napake McLeod-ovih vakuummetrov.

5.1 Termični vakuummetri

Pri tlakih blizu atmosferskega, telo segreto na 100 do 200 °C oddaja toploto Q v zrak s prestopom:

$$Q = A_t \alpha_p \Delta T$$

in prevodnostjo

$$Q = \lambda A_t \Delta T / \Delta x ,$$

kjer je A_t površina telesa in λ toplotna prevodnost.

Mehanizem prenosa toplote praktično ne zavisi od tlaka vse dokler se le-ta ne zmanjša do $\approx 10^3$ Pa, ko pride do spremembe mehanizma oddajanja toplote. Pri teh vrednostih tlaka postane prenos toplote s konvekcijo zanemarljiv, medtem ko se toplotna prevodnost zmanjšuje z nižanjem tlaka. Če opazujemo žico, ki se segreva s stalnim tokom, njena temperatura, in s tem njena upornost, raste sorazmerno zmanjševanju tlaka. Na tem principu deluje vrsta različnih vakuumskih termičnih merilcev od katerih sta najbolj poznana Piranijev vakuummeter in vakuummeter s termočlenom.

Zmanjšanje koeficienta toplotne prevodnosti λ z zniževanjem tlaka razložimo s povečanjem proste poti molekul l_{prosta} . Za zrak pri 15 °C velja

$$l_{\text{prosta}} = a / p \quad (l_{\text{prosta}} \text{ v m, } p \text{ v Pa, } a = 6.6 \times 10^{-6} \text{ mPa})$$

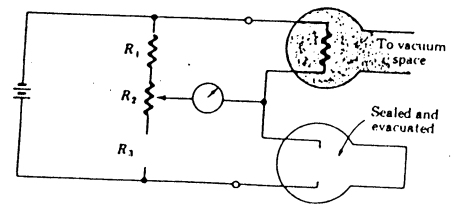
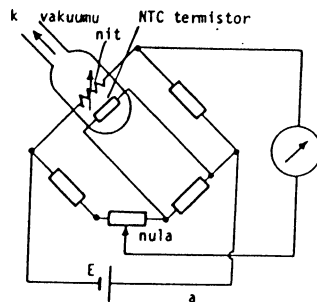
Po tej enačbi pri $p = 1$ Pa je dolžina proste poti $l_{\text{prosta}} = 0.66$ cm, kar je blizu premera cevi v kateri se nahaja segrevana nitka za merjenje tlaka. Toploto z žice na zidove cevi prenašajo molekule, ki direktno udarjajo na stene cevi brez medsebojnih trkov molekul v plinu. Zaradi tega je odvajanje toplote obratno sorazmerno s koncentracijo molekul oziroma tlaku:

$$Q \propto 1/n = 1/p .$$

Osnovna shema Pirani vakuummetra s konstantnim tokom je prikazana na sliki 13. Senzor je segrevana wolframova nitka vključena v most (v bistvu je upogovni TM). Zaradi temperature

kompenzacije je v nasprotno vejo mosta vključen NTC termistor paralelno z uporom R_2 . NTC termistor, ki ima zanemarljivo samosegrevanje, je postavljen v vakuum v bližino nitke in sledi temperaturnim spremembam okolice. Zaradi nasprotnega predznaka temperaturnega koeficienta upornosti α_R termistorja glede na nit, pride do kompenzacije vpliva temperaturnih sprememb.

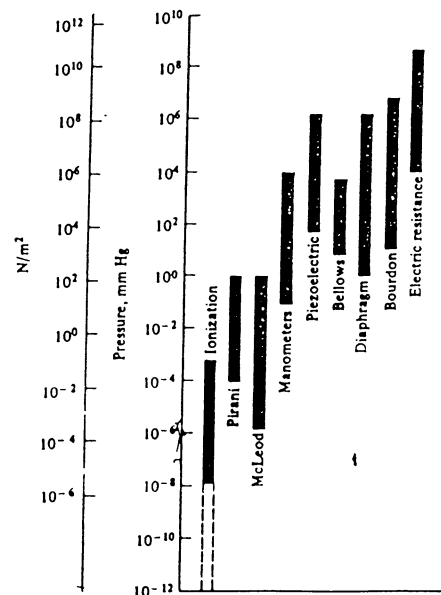
Slika 13:
Pirani vakuummeter s konstantnim tokom in s temperaturno kompenzacijo;
a) z NTC termistorjem,
b) s Pirani-jevimi senzorjem



Obseg uporabnosti: (0.1 do 100) Pa, odzivna konstanta: ≈ 1 min

Na sliki 14 je prikazan pregled merilnih obsegov običajno uporabnih merilcev tlaka.

Slika 14:
Pregled merilnih obsegov uporabnih merilcev tlaka



Naloge 'Fiz-mer': Tlak

1) Na sliki 1 je prikazan kapacitivni senzor s tanko kovinsko membrano krožnega preseka za merjenje tlaka v fluidu.

a) Izračunaj spremembo kapacitivnosti senzorja pri tlaku $p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$.

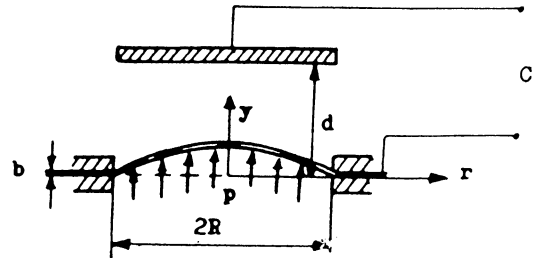
b) Določi približno maksimalno frekvenco spremembe tlaka p , ki se lahko meri s tem senzorjem.

Podatki o membrani:

$$R = 1.5 \text{ cm}, \quad b = 0.05 \text{ mm}, \quad d = 1 \text{ mm},$$

$$S = 200 \text{ N/cm}, \quad \rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Slika 1



2) Na sliki 2 je prikazan kapacitivni senzor z debelo jekleno kovinsko membrano krožnega preseka za merjenje tlaka. Senzor je priklopljen s pomočjo kabla s kapacitivnostjo $C_1 = 50 \text{ pF}$ povezan s tuljavo z induktivnostjo $L = 3.5 \text{ mH}$.

a) Določi frekvenco rezonančnega kroga v odvisnosti od tlaka.

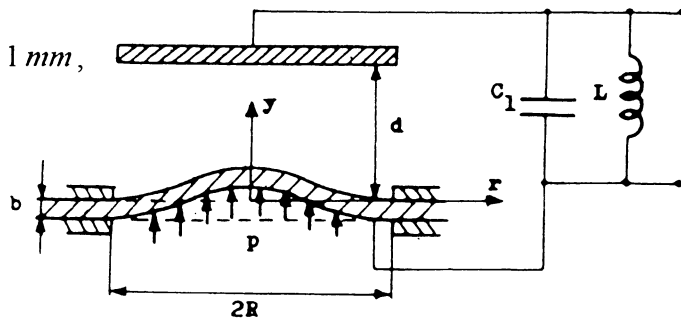
b) Izračunaj frekvenčno občutljivost v področju majhnih tlakov ($p \approx 0$) in srednjo občutljivost v razponu (0–1) bar.

c) Približno določi maksimalno dovoljeno frekvenco spremembe tlaka, ki se s tem senzorjem lahko meri.

Podatki o membrani:

$$R = 2.0 \text{ cm}, \quad b = 0.4 \text{ mm}, \quad d = 1 \text{ mm},$$

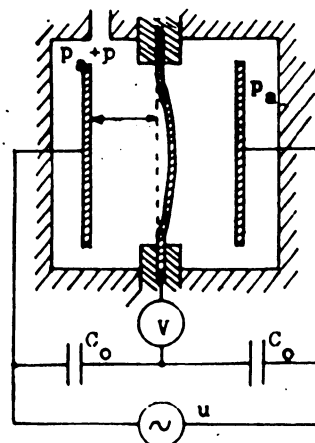
Slika 2



3) Tlak plina merimo s pomočjo diferencialnega kapacitivnega pretvornika z debelo krožno membrano (Slika 3). Pretvornik je spojen v most z napetostnim indikatorjem in z izvorom izmenične napetosti (efektivna napetost $u = 10 \text{ V}$).

Določi občutljivost mosta in približno vrednost frekvence napetosti izvora. Podatki za kapacitivni pretvornik so isti kot v nalogi 2).

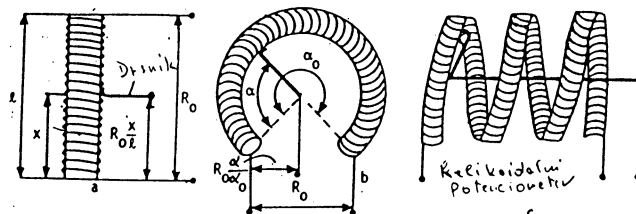
Slika 3



Merjenje pomika (giba)

1. Potenciometrski pretvorniki za merjenje translatorsnega in kotnega pomika

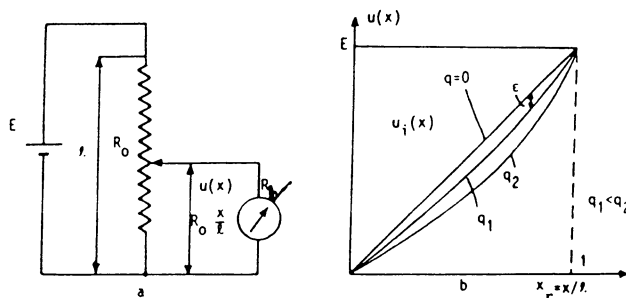
Najpogosteje žični potenciometri iz tanke žice homogeno navite okrog ravnega ali krožnega izolatorja konstantnega preseka (slika 1).



Slika 1: Vrste potenciometrov za merjenje; a) translatorsnega, b) in c) kotnega pomika

Za kotne pomike večje od 360° se uporabljajo helikoidalni potenciometri z več obrati drsnika (običajno 10), slika 1c.

Pomik se meri tako, da se potenciometer priključi na izvor konstantne napetosti E , izhodni signal pa se meri med drsnikom in enim koncem potenciometra s pomočjo voltmetra z notranjo upornostjo R_v (slika 2a).



Slika 2: a) Shema naprave za merjenje pomika s pomočjo potenciometra, b) karakteristika za različna razmerja upornosti potenciometra in instrumenta

Če je R_0 celotna upornost potenciometra in l njegova dolžina, tedaj, pri razdalji x drsnika od začetnega položaja potenciometra, voltmeter pokaže napetost

$$u(x) = E \frac{x_r}{1 + q x_r (1 - x_r)}, \quad (1)$$

kjer je $x_r = x/l$ relativni pomik in $q = R_0/R_v$ razmerje upornosti potenciometra in instrumenta. Zveza med izhodno napetostjo in pomikom je torej nelinearna. Diagrami napetosti za tri vrednosti q so prikazani na sliki 2b. Če ima voltmeter zelo visoko upornost, tj., če je $q \sim 0$, je izhodna napetost linearna funkcija pomika

$$u_i(x) = E x_r \quad , \quad q = R_o/R_v \rightarrow 0 \quad . \quad (2)$$

V praksi je q pogosto majhen, toda ne zanemarljiv. V teh primerih se lahko enačbo (1) aproksimira z

$$u(x) \approx E x_r [1 + q x_r (1 - x_r)] \quad \text{za} \quad q \ll 1 \quad . \quad (3)$$

Razlika napetosti $\varepsilon = u(x) - u_i(x)$ predstavlja napako, oziroma nelinearnost zaradi končne porabe voltmetra. Nelinearnost merjenja pomika z danima R_v in R_o se lahko zmanjša, če zaporedno in vzporedno s potenciometrom vežemo stalne upore izbrane vrednosti.

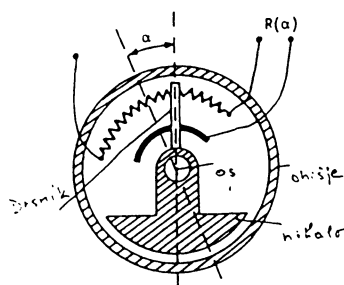
Izhodna napetost žičnih potenciometrov je stopničasta funkcija pomika. Resolucija merjenja zavisi od debeline žice in gostote navitja in znaša $l/2n$, kjer je n celotno število navitkov. Skokovita sprememba napetosti se pojavi pri prehodu drsnika z ene na drugo žico ali pri prehodu vmesnega položaja drsnika (ko se drsnik dotika dveh navitkov). Večje gostote pri komercialnih potenciometrih znašajo $n = (200 \text{ do } 400)/\text{cm}$, kar predstavlja resolucijo $(2.5 \text{ do } 5) \times 10^{-3} \text{ cm}$.

V praksi se precej uporabljajo tudi potenciometrski pretvorniki s plastičnim uporabnim slojem. Z variranjem debeline se lahko doseže širok razpon nominalnih vrednosti upora. Izhod teh potenciometrov je zvezen.

Obraba in vpliv nečistoč na drsniku omejujeta uporabo vseh potenciometrskih pretvornikov za preciznejša merjenja giba. Življenjska doba je nekaj 10^6 pomikov. Materiali za potenciometrskie pretvornike: manganin, konstantan, nikrom. Temperaturni koeficient upornosti α_R teh zlitin je reda $(2 \text{ do } 10) \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$. Temperaturne spremembe upornosti zelo malo vplivajo na izhodno napetost, ker je odvisen od razmerja upornosti.

1.1 Potenciometrski pretvornik z nihalom za kotni zasuk

Na sliki 3 je prikazan potenciometrski pretvornik z nihalom za merjenje kotnega zasuka (pomika) glede na smer gravitacijskega polja.



Slika 3: Potenciometrski pretvornik z nihalom za merjenje kotnega zasuka

Osnovni del pretvornika je relativno masivno fizikalno nihalo, ki lahko rotira okrog horizontalne osi. Nihalo pomika drsnik po krožnem navitju pritrjenem na ohišju potenciometra. Ohišje se fiksira na objekt katerega nagib glede na normalo se meri. V horizontalnem položaju se drsnik nahaja na sredini navitkov. S tem je most, v katerem predstavlja potenciometer dve sosednji diferencialni veji, uravnotežen. Obseg merjenja je $\leq \pm 60^\circ$. Delovne frekvence morajo biti manjše od lastne, ki znaša $\sim 2 \text{ Hz}$. Z ustrezno

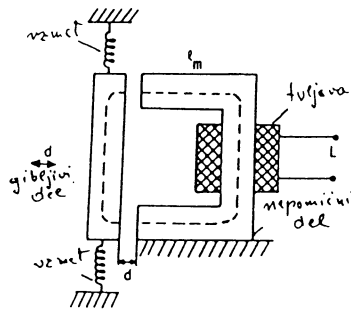
viskozno tekočino se lahko doseže dušenje $\xi \sim 0.6$. Tipična resolucija je 0.01° . Uporaba: gradbeni stroji za niveliranje cest, kanalov, ipd.

2. Merjenje pomika z induktivnimi pretvorniki

2.1 Induktivni pretvornik

Osnova induktivnih pretvornikov za merjenje pomika je:

- sprememba induktivne upornosti ΔL tuljave v odvisnosti od spremembe oblike magnetnega tokokroga;
- sprememba medsebojne (vzajemne) induktivnosti ΔM dveh tuljav v odvisnosti od spremembe permeabilnosti ali geometrijskih karakteristik magnetnega tokokroga.



Slika 4: Induktivni pretvornik za merjenje majhnih pomikov

Na sliki 4 je prikazan induktivni ΔL pretvornik, ki se sestoji iz tuljave navite na feromagnetno jedro sestavljeno iz gibljivega in negibljivega dela. Med tema deloma je zračna reža širine d , ki se spreminja pri premikanju gibljivega dela (kotve). Induktivnost tuljave je:

$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{l_m / \mu_r + 2d}, \quad (4)$$

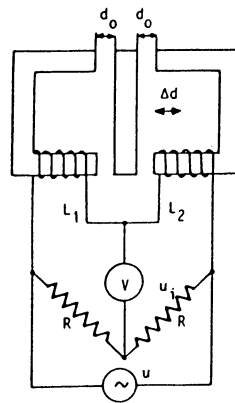
kjer je l_m srednja dolžina magnetnega pretoka, A prečni presek jedra, μ_0 je magnetna permeabilnost v vakuumu ($= 1.26 \times 10^{-6}$ H/m), μ_r je relativna magnetna permeabilnost jedra. Gornja enačba je dovolj točna, če je d majhen in μ velik.

Če skozi tuljavo teče konstanten tok I , je sila F s katero negibljivo jedro privlači kotvo enaka:

$$F = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dd} = - \frac{I^2 N^2 A \mu_0}{(l_m / \mu_r + 2d)^2}. \quad (5)$$

Sila F ima negativen predznak, ker je privlačna. Sila F raste z zmanjšanjem razdalje d . Spremenljiva sila F je za merjenje pomika d neprimerna, ker teži da izzove nekontrolirane gibe kotve. Pretvornik raje vključimo v eno vejo izmeničnega mostiča za merjenje induktivnosti. Pomanjkljivosti 1/4-mostiča so nelinearnost in odvisnost induktivnosti L od temperature.

Povečanje občutljivosti, poboljšanje linearnosti in odpravo vpliva temperaturnih sprememb dosežemo z uporabo diferencialnega induktivnega pretvornika DIP (1/2- most, slika 5).



Slika 5: Merjenje majhnih gibov s pomočjo diferencialnega induktivnega pretvornika

Pretvornik se sestoji iz dveh tuljav L_1 in L_2 navitih na dve enaki feromagnetni jedri. V začetku meritve je kotva enako oddaljena od obeh jedr in $L_1 = L_2$. V simetričnem položaju pretvornika se most nahaja v ravnovesju. Pri pomiku kotve za Δd , induktivnosti tuljav znašata

$$L_{1,2} = \frac{N^2 A \mu_0}{l_m / \mu_r + 2(d_0 \pm \Delta d)} \quad (6)$$

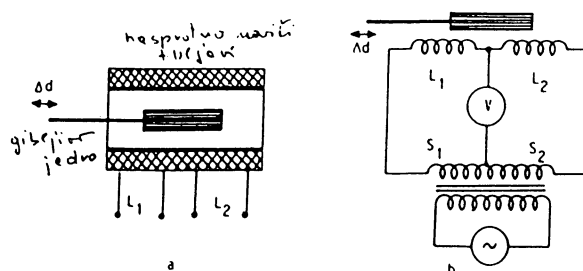
Izhodni signal neuravnovešenega mosta je

$$u_i = \frac{u}{2} \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{u}{2} \frac{\Delta L}{L} = \frac{u}{2} \frac{\Delta d}{(l_m / \mu_r + 2d_0)} \quad (7)$$

pri čemer smo zanemarili omsko upornost tuljav. Prednost DIP je, da privlačne sile, ki delujejo na kotvo, težijo k medsebojnemu uničenju zlasti še blizu ravnotežnega položaja.

Pretvorniki opisanega tipa se uporabljajo za merjenje giba v obsegu od (0 do 0.01) mm do 0 do 1) mm. Izhodni signal je zvezna funkcija pomika, točnost je predvsem odvisna od občutljivosti in točnosti voltmetra.

Za merjenje večjih pomikov velikosti 1 cm do nekoliko cm se uporabljajo DIP sestavljeni iz dveh tuljav navitih na votlem valju, ki je izolator (slika 6a).



Slika 6: a) Diferencialni induktivni pretvornik za merjenje večjih gibov, b) induktivni most

V valju se nahaja feromagnetno jedro, ki se pomika vzdolž njegove osi. V začetnem položaju se jedro nahaja v sredini valja. Obe tuljavi imata enako induktivnost, $L_1 = L_2$. Pri pomiku jedra za Δd , se poveča magnetna permeabilnost v področju tuljave 1 in s tem induktivnost L_1 za ΔL . Istočasno se za isto vrednost zmanjša induktivnost L_2 . Za majhne pomike je $\Delta L \propto \mu \Delta d$.

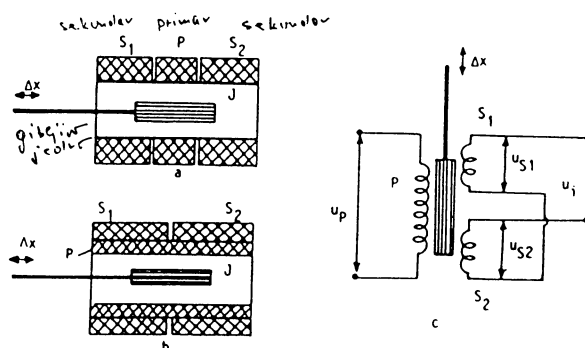
Pretvornik se lahko uporabi v mostu na prejšnji sliki. Boljša rešitev je, da se veže v induktivni most (slika 6b). Most je napajen s pomočjo simetričnega transformatorja, katerega sekundarna stran že predstavlja veji mosta.

Mostiči z induktivnimi pretvorniki se napajajo z napetostjo efektivne vrednosti (5 do 30) V v širokem razponu frekvenc (50 do 10000) Hz. Nizke frekvence (kot npr. mrežna) niso primerne iz več razlogov. Impedanca pretvornika pri nizkih frekvencah je majhna. Zato morajo biti napetosti napajanja relativno majhne, kar pomeni tudi manjšo občutljivost. Upoštevati je treba tudi vpliv omske upornosti tuljave. Pri visokih frekvencah je impedanca tuljave znatno večja od omske upornosti in je sprememba impedance ΔZ pri pomiku kotve, oziroma jedra, zato večja. Po drugi strani pa pri visokih frekvencah nastopijo izgube zaradi vrtničnih tokov, kar je ekvivalentno porastu omske upornosti tuljave. Svoj vpliv doprinešajo tudi parazitne kapacitivnosti.

Izhodna napetost izmeničnih mostov z induktivnimi in drugimi pretvorniki pri prehodu skozi nulo skokovito menja fazo za π . Če se kot indikator uporablja izmenični voltmeter, ki meri efektivno vrednost napetosti, tedaj ni možno ugotoviti smer pomika jedra glede na ravnotežni položaj. Smer se lahko ugotovi, če se za indikacijo koristi usmernik, ki pri spremembi faze za π zamenja polariteto izhodnega enosmernega signala (fazni detektor).

2.2 Diferencialni induktivni transformatorski pretvornik

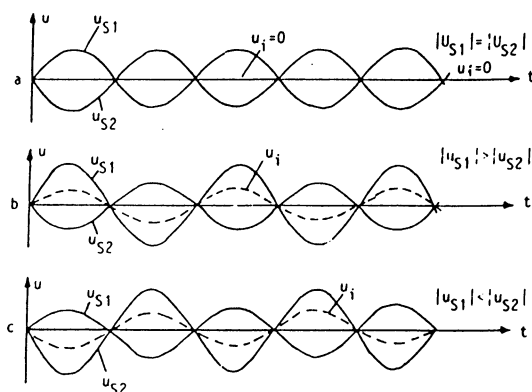
Diferencialni induktivni transformatorski pretvornik predstavlja enega od najpogosteje uporabljenega pretvornika za merjenje gibov kakor tudi drugih mehanskih veličin. V angleški literaturi se je zanje udomačila kratica LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Po svoji konstrukciji LVDT predstavlja transformator z eno primarno in z dvema enakima, simetrično postavljenima sekundarnima tuljavama, vse tri navite na votli valj iz izolacijskega materiala (slika 7).



Slika 7: Diferencialni induktivni transformatorski pretvornik LVDT za merjenje pomika; a) in b) konstrukcijska primera, c) principiela shema pretvornika.

V osi valja je feromagnetno jedro, ki se lahko pomika vzdolž valja v obeh smereh. Sekundarni tuljavi sta nasprotno naviti (med seboj spojeni v opozicijo). Diagram napetosti

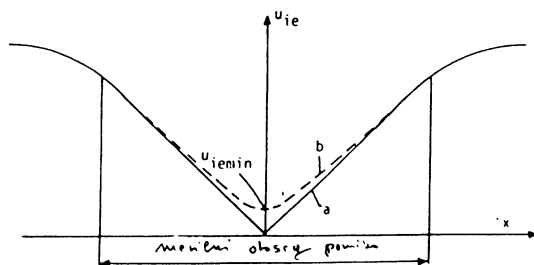
u_{S1} in u_{S2} in izhodnega signala u_i DIP pretvornika v različnih položajih jedra je prikazan na sliki 8.



Slika 8: Diagram napetosti u_{S1} in u_{S2} in izhodnega signala u_i LVDT pretvornika v različnih položajih jedra; a) ravnotežni, b) pomik navzgor, c) pomik navzdol.

Ko se jedro nahaja v simetričnem položaju, tedaj sta koeficienta medsebojne indukcije M_1 in M_2 primarne in obeh sekundarnih tuljav, enaka. Napetosti u_{S1} in u_{S2} imata isto amplitudo in fazo (slika 8a). Ker sta tuljavi nasprotno naviti, je izhodna napetost $u_i = u_{S1} - u_{S2} = 0$, kot prikazano na sliki 8a. Če jedro pomaknemo v smeri sekundarja S_1 , pride do povečanja M_1 in s tem tudi povečanja u_{S1} . Istočasno se amplituda u_{S2} zmanjša, ker se jedro oddaljuje od S_2 (slika 8b). Na izhodu pretvornika se pojavi izhodna napetost u_i z amplitudo, ki je sorazmerna pomiku Δx in s fazo enaki fazi večje napetosti, tj. u_{S1} . Če jedro pomaknemo v nasprotni smeri za $-\Delta x$, se amplituda napetosti u_{S1} zmanjša, amplituda napetosti u_{S2} pa poveča. Izhodna napetost u_i ima isto amplitudo kot v predhodnem primeru, le da je njena faza za π premaknjena (slika 8c).

Odvisnost efektivne izhodne napetosti od pomika za primer, da je pretvornik idealno simetričen in brez izobličenj napetosti, je prikazana na sliki 9 (polna črta).



Slika 9: Efektivna vrednost izhodne napetosti LVDT pretvornika v odvisnosti od pomika; a) idealni pretvornik, b) realni pretvornik

Odseka krivulje a v levi in desni polravnini, se lahko popišeta z enačbo

$$u_{ie} = \pm K_1 \Delta x \left[1 - K_2 (\Delta x)^2 \right], \quad (8)$$

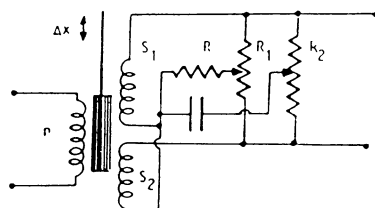
kjer sta K_1 in K_2 konstanti odvisni od geometrijskih parametrov tuljav, števila navojev, frekvence in toka v primarni tuljavi. Izhodna napetost je nelinearna funkcija, ki se pri relativno majhnih pomikih, pri pogoju $K_2 (\Delta x)^2 \ll 1$, lahko aproksimira z linearnim členom

$$u_{ie} \propto \pm K_1 \Delta x. \quad (9)$$

Pri vsakem pretvorniku se lahko določi obseg pomikov v katerem nelinearnost ne preseže določeno mejo. Na primer, maksimalni pomik jedra za pretvornik na sliki 9 pri nelinearnosti 1 % je $\propto 0.14 l_j$ (l_j = dolžina feromagnetnega jedra). Širši obseg linearnosti se doseže s pretvorniki večjih dimenzij.

Občutljivost pretvornika je določena s konstanto K_1 , katere vrednost je sorazmerna toku primarija I_p , frekvenci napajanja ω in obratno sorazmerna dolžini pretvornika. Občutljivost v odvisnosti od frekvence raste do določene meje, ko izgube zaradi skin- efekta narastejo. V tem področju je občutljivost približno neodvisna od frekvence. V praksi se uporabljajo frekvence v razponu 50 Hz do 20 kHz. Za dinamične meritve morajo biti frekvence (5 do 10)x nižje od frekvence napajanja. Merilni obsegi LVDT so os 1×10^{-3} cm do nekaj cm, pri čemer nelinearnost znaša (0.1 do 1) %, odvisno od konstrukcije pretvornika.

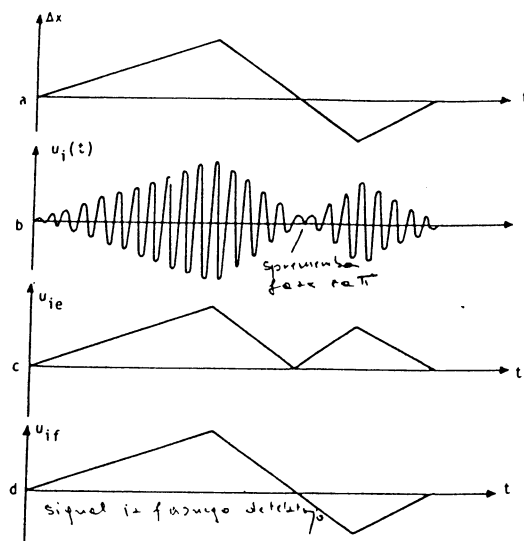
Če merimo u_i realnega LVDT z občutljivim voltmetrom, opazimo, da napetost $u_i \neq 0$ v nobenem položaju jedra (slika 9b, črtkano). To je posledica različnih vzrokov zlasti pa nesimetrije sekundarnega navitja v pogledu števila navojev, omske upornosti in parazitne kapacitivnosti. Zaradi tega napetosti na sekundarni strani niso fazno premaknjene točno za π . Torej, tudi ko sta napetosti u_{S1} in u_{S2} enaki, njuna rezultanta ni nula ampak doseže neko minimalno vrednost $u_{i,min}$ (slika 9b). Nulo izhodne napetosti dosežemo s pomočjo dodatnih RC členov kot prikazano na sliki 10.



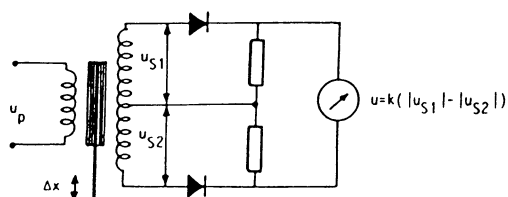
Slika 10: LVDT pretvornik z dodatnimi elementi za dosego nule izhodne napetosti

S potenciometroma R_1 in R_2 izmenično, korak po koraku, uravnavamo amplitudo in fazo sekundarnih napetosti u_{S1} in u_{S2} .

Potek delovanja LVDT za pomik jedra v obe smeri je ilustriran na sliki 11. Diagram pomika $\Delta x(t)$ je na sliki 11a, ustrezni izhodni signal $u_i(t)$ pa na sliki 11b. V trenutku ko pomik spremeni predznak, izhodna napetost skokovito spremeni fazo za π . Če merimo napetost z instrumentom, ki da je efektivno vrednost napetosti, je njen potek kot prikazan na sliki 11c. Instrument ne pokaže realnega pomika jedra. Indikatorji efektivne vrednosti napetosti so primerni samo, če je smer pomika jedra v naprej poznana. Na sliki 11d je prikazan izhodni signal fazno občutljivega detektorja, ki verno prikazuje pomik jedra. Praktična rešitev fazno občutljivega detektorja primerne za uporabo z LVDT pretvorniki je prikazana na sliki 12.



Slika 11: Merjenje pomika z LVDT pretvornikom; a) pomik jedra, b) izhodna napetost pretvornika, c) prikaz instrumenta efektivne vrednosti, d) prikaz fazno občutljivega detektorja



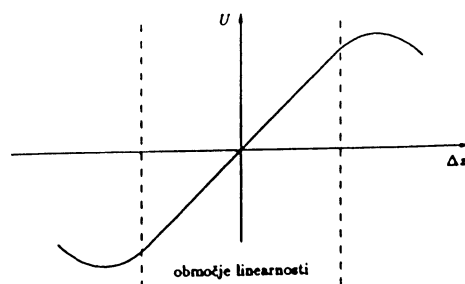
Slika 12: Preprosta fazno občutljiva demodulacija z diodami

Vezje se sestoji iz dveh diodnih usmernikov, ki usmerijo (demodulirajo) izhodni napetosti sekundarjev. Demodulirani napetosti sta sorazmerni napetostima u_{S1} in u_{S2} , ki sta nasprotno vezani. Enosmerni instrument kaže razliko demoduliranih (usmerjenih) napetosti

$$u = k(|u_{S1}| - |u_{S2}|), \quad (10)$$

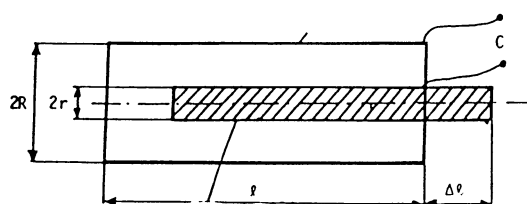
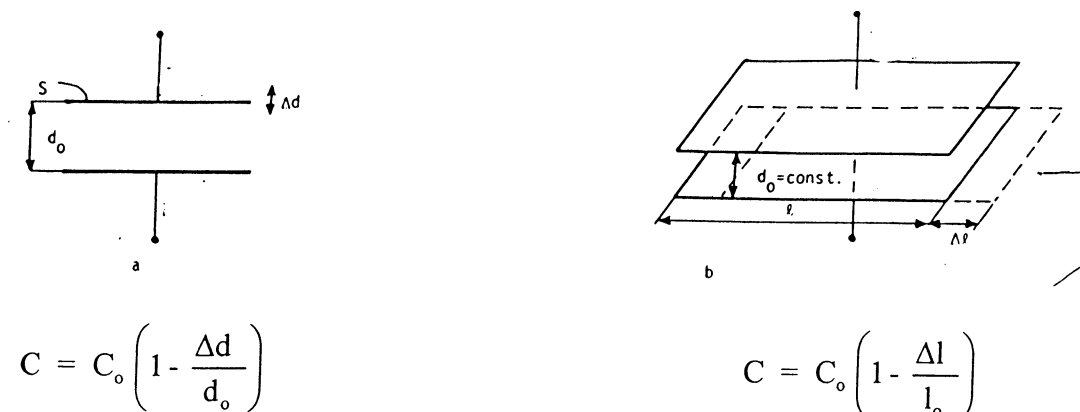
ki je sorazmerna pomiku jedra Δx .

Komercialno so na voljo senzori, ki zahtevajo le enosmerno napajalno napetost, na izhodu pa dobimo že obdelan signal, ki je sorazmeren s premikom jedra. Vezje, ki ustvari izmenično napetost in opravi fazno občutljivo demodulacijo, je že vgrajeno v sam senzor. Občutljivost in linearnost nakazuje slika 13. Na trgu dobimo LVDT, ki so linearni v območju 1 m.

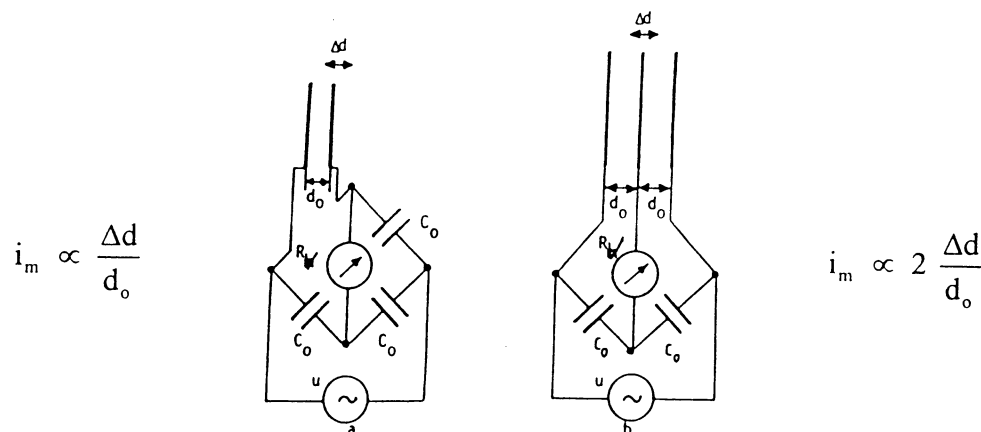


Slika 13: Linearno območje in občutljivost komercialnega diferencialnega transformatorja

3. Merjenje pomika s kapacitivnimi pretvorniki



Slika 14: Kapacitivni senzori za merjenje pomika: a) ploščati za manjše pomike, b) ploščati za večje pomike, c) cilindrični za večje pomike

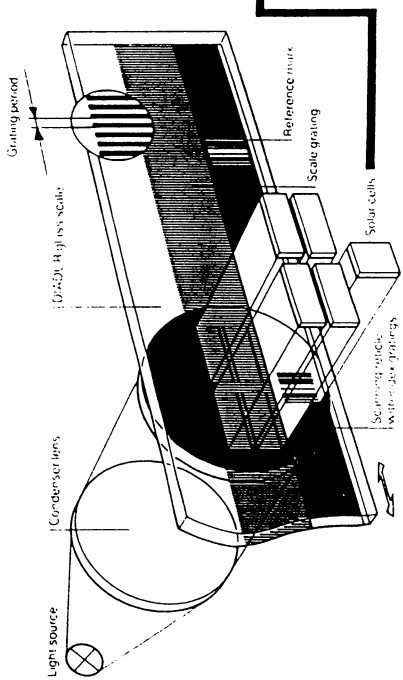


Slika 15: Kapacitivni most za merjenje pomika (in tlaka): a) običajni pretvornik (1/4 most), b) diferencialni pretvornik (1/2 most)

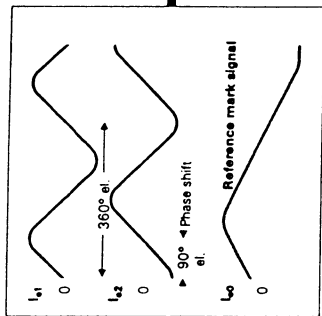
4. Inkrementalnimi dajalniki pozicije

Slika 16: Linearni inkrementalni dajalnik pozicije: a) princip, b) signali 'skener-ja' dajalnika, b) vlak pravokotnih sunkov po 5x interpolaciji in digitalizaciji

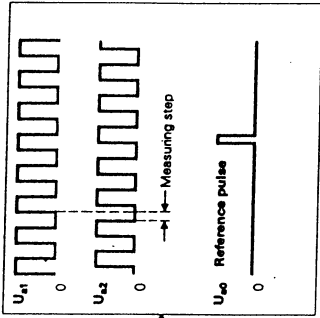
Slika 17: Izgled linearnega inkrementalnega dajalnika



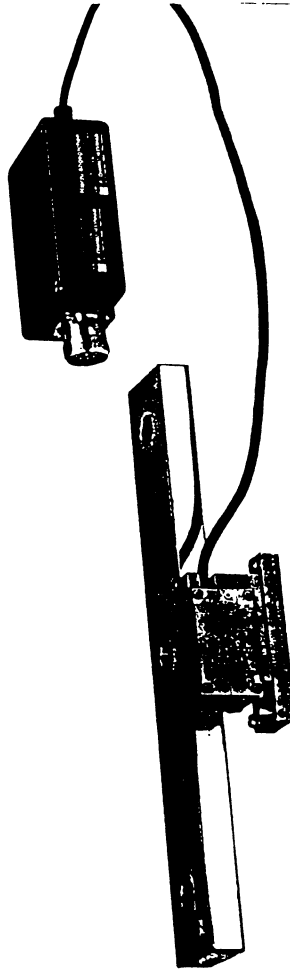
Skizma 16:



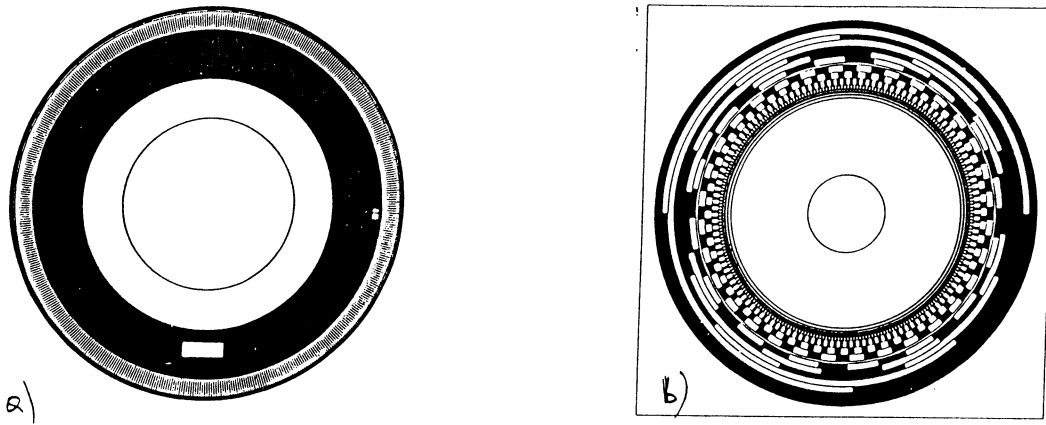
b)



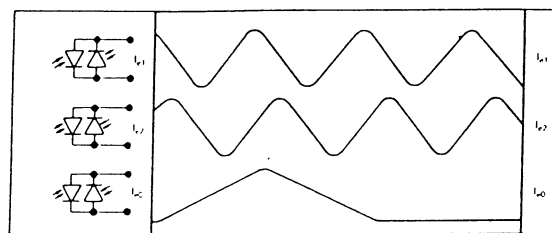
c)



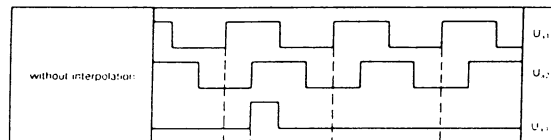
Skizma 17:



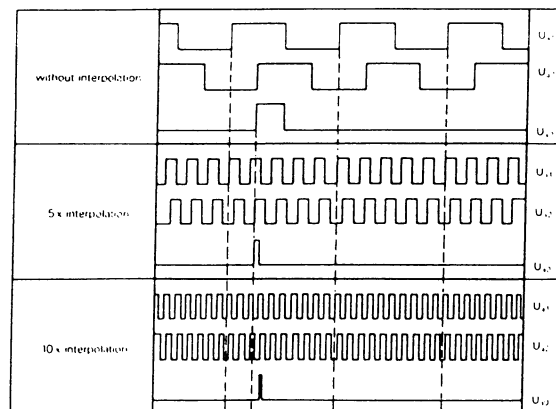
Slika 18: Rotacijski dajalnik pozicije: a) krožna graduacija za inkrementalni dajalnik (500 črt), b) krožna graduacija za absolutni dajalnik (13 stez z Gray kodo)



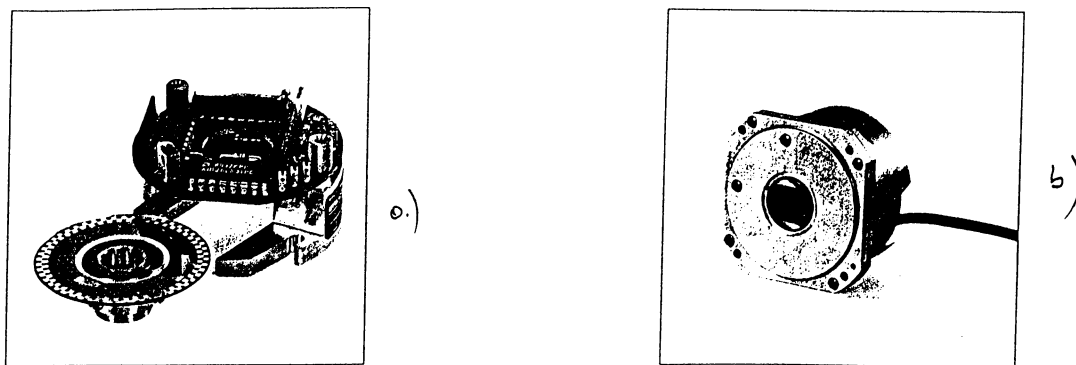
Square-wave output signals from rotary encoders with digitizing electronics



Square-wave output signals from the EXE interpolation and digitizing electronics

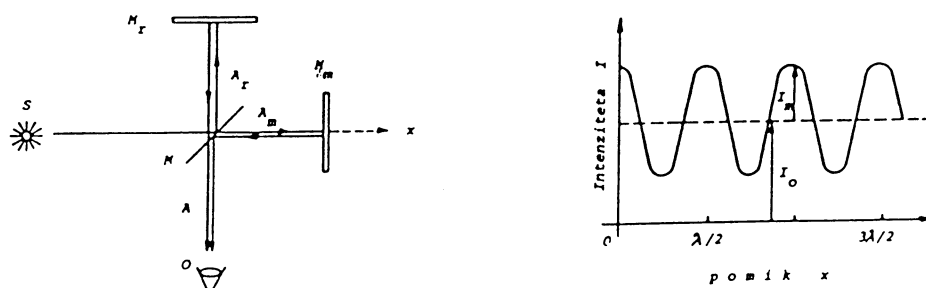


Slika 19: Signali rotacijskega dajalnika pozicije, a) brez digitalizacije, b) z digitalizacijo, c) s 5x in 10x interpolacijo

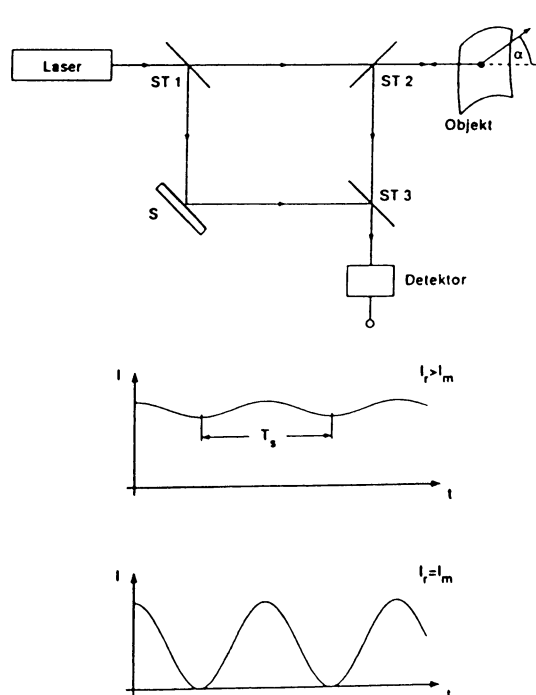


Slika 19: Izgled rotacijskega inkrementalnega dajalnika, a) razstavljen, b) sestavljen

5. Laserski interferometer

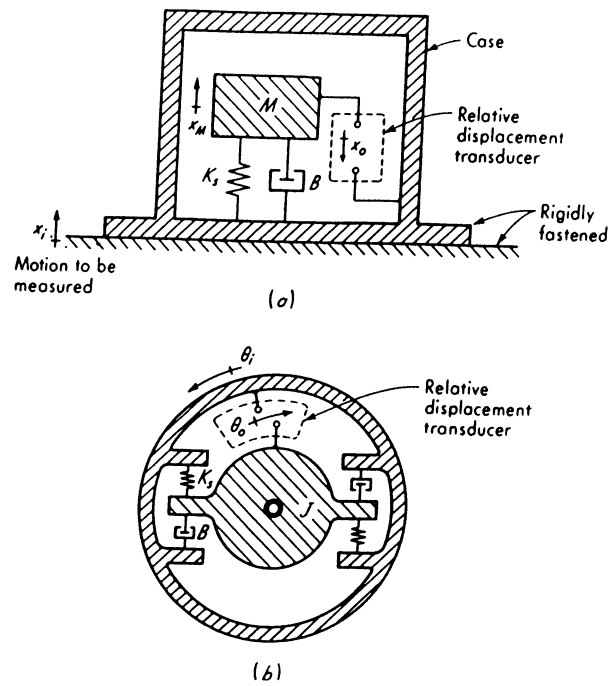


Slika 20: Princip Michelsonovega interferometra

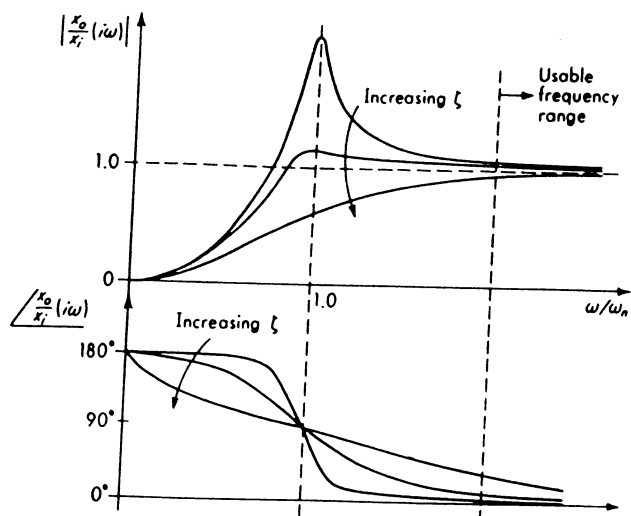


Slika 21: Princip laserskega vibrometra

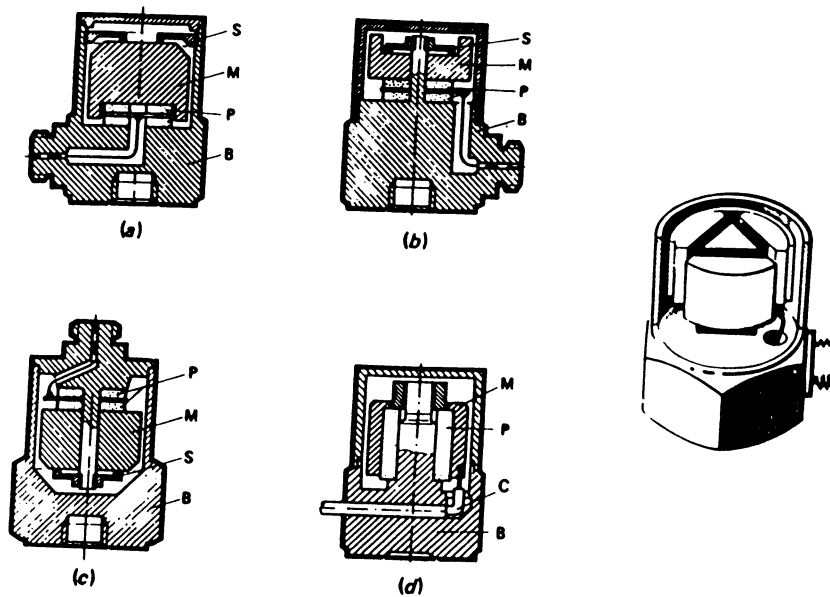
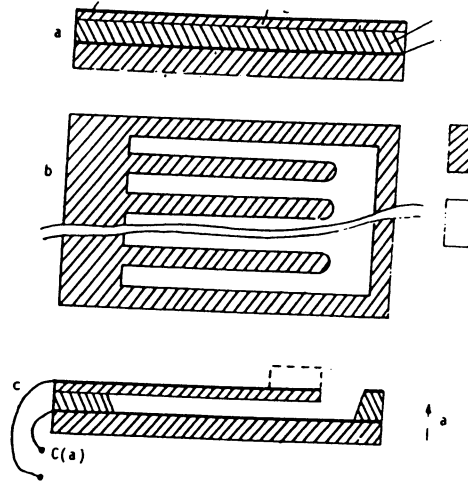
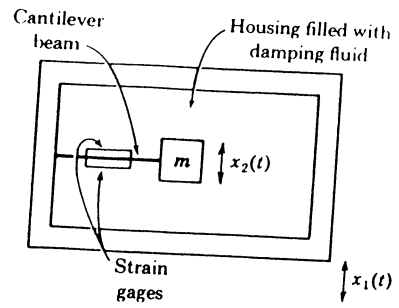
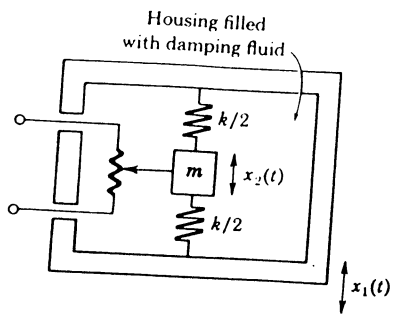
Fiz-mer: Vibracije



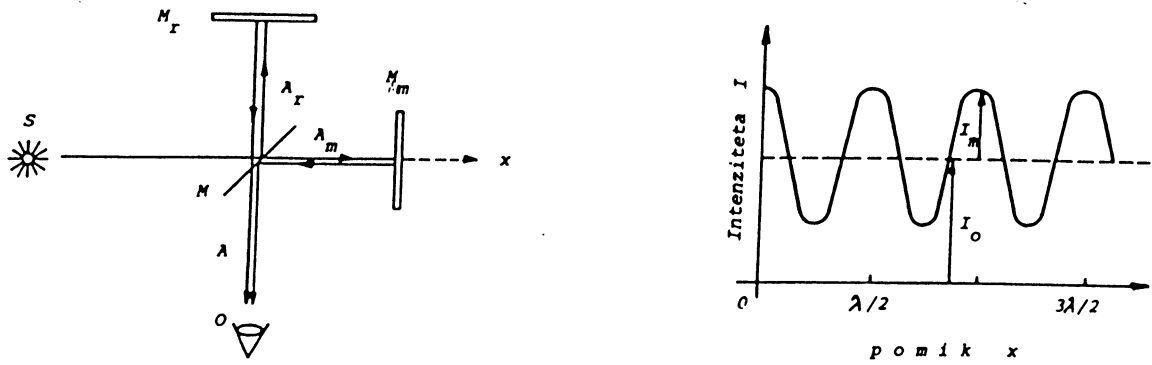
Slika 1: Splošna shema merilca vibracij; a) anoosna translatorna, b) rotacijska



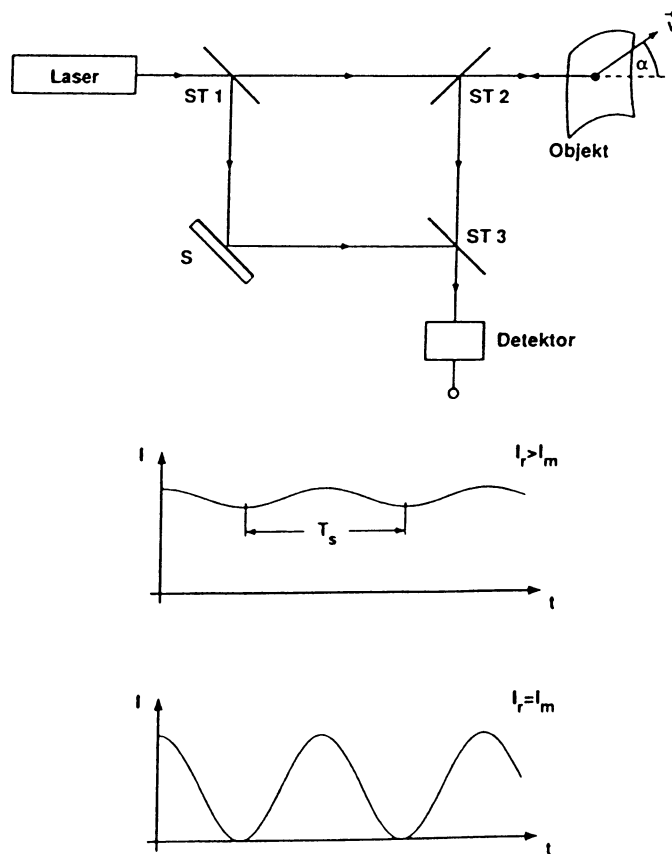
Slika 2: Frekvenčni in fazni odziv vibracijskega (seizmičnega) senzorja



Slika 3: Izvedbe senzora za merjenje vibracij: a) z merilnimi lističi, b) s potenciometričkim delilcem napetosti, c) integrirani konzolno-kvarčni kapacitivni, d) piezoelektrični



Slika 4: Princip Michelsonovega interferometra



Slika 5: Princip laserskega vibrometra

Merjenje napetosti in sil v togih telesih

1. Merilni trakovi

Merilni trakovi (lističi) omogočajo enostavno določanje deformacij kovinskih vzorcev pod vplivom napetosti oziroma sil, ki se merijo. Razvoj teh pretvornikov in ustrezne elektronske opreme je skoraj popolnoma izpodrinil mehanske naprave za merjenje sil. Za merjenje sil se uporabljajo tudi induktivni in magneto-strikcijски pretvorniki.

Princip delovanja merilnih trakov (MT) je osnovan na 'tenzo-uporovnem' efektu, tj. spremembi upornosti žice pri raztezanju. Merilni trakovi so uporabni tudi za merjenje drugih mehanskih veličin, ki so 'zmožne' povzročiti deformacijo merilnega lističa (pospešek, vibracije, tlak, pretok, nivo, gib). Narejeni so iz tanke žice, tanke folije (slika 1) ali polprevodnika. Na sliki 1 so prikazani tz. lepljeni MT. Pri teh se večkrat 'meandrično' uvita tanka žica ali folija nalepi na podlago (nosilec vodnika) tako, da se dobi merilni trak (tipalo) v obliki pravokotnika dolžin (5 mm do 5 cm) in več.



Slika 1: Merilni trakovi iz; a) tanke žice, b) tanke folije

Upornostni vodnik (žica ali napačena folija) je običajno iz konstantana ali 'karme'. Podlage ali nosilci so iz papirja, raznih sintetičnih materialov (poliamid, poliamid ojačan s steklenimi vlakni, ipd.). Trakovi se s pomočjo lepil na bazi epoksidnih smol pritrdijo na površino elastičnega objekta katerega deformacije se merijo. Z lepljenjem se ustvari trden spoj traka in podlage tako, da so deformacije, ki nastanejo v smeri žice praktično enake deformacijam traka. MT v prvi aproksimaciji reagirajo samo na deformacije v smeri žice in ne na deformacije v pravokotni (transverzalni) smeri. To se lahko razloži z dejstvom, da je vzdolžni presek traka precej večji od prečnega in, da lepilo s katerim je trak pritrjen v celoti prenese deformacijo po dolžini, ne pa po širini.

V praksi se pokaže, da so trakovi občutljivi tudi na prečne deformacije podloge pravokotno na smer žice. Prečna občutljivost je nekoliko izrazitejša pri trakovih iz folije vendar še vedno znatno manjša od vzdolžne občutljivosti. V praktičnih meritvah se prečno občutljivost trakov običajno zanemari.

1.1 Princip dela merilnega traka

Fizikalne osnove merilnih trakov lahko objasnimo na poenostavljenem modelu kovinske žice krožnega preseka A (slika 2). Upornost žice je

$$R = \rho_R \frac{l}{A} = \frac{\rho_R l}{\pi r^2}, \quad (1)$$

Naloge 'Fiz-mer': Tlak

1) Na sliki 1 je prikazan kapacitivni senzor s tanko kovinsko membrano krožnega preseka za merjenje tlaka v fluidu.

a) Izračunaj spremembo kapacitivnosti senzora pri tlaku $p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$.

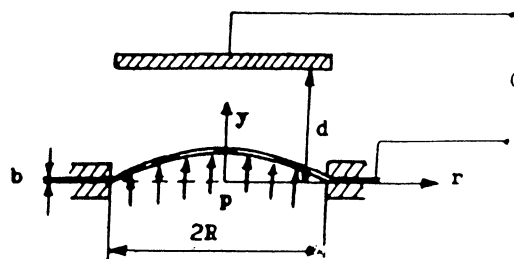
b) Določi približno maksimalno frekvenco spremembe tlaka p , ki se lahko meri s tem senzorjem.

Podatki o membrani:

$$R = 1.5 \text{ cm}, \quad b = 0.05 \text{ mm}, \quad d = 1 \text{ mm},$$

$$S = 200 \text{ N/cm}, \quad \rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Slika 1



2) Na sliki 2 je prikazan kapacitivni senzor z debelo jekleno kovinsko membrano krožnega preseka za merjenje tlaka. Senzor je priklopljen s pomočjo kabla s kapacitivnostjo $C_1 = 50 \text{ pF}$ povezan s tuljavo z induktivnostjo $L = 3.5 \text{ mH}$.

a) Določi frekvenco rezonančnega kroga v odvisnosti od tlaka.

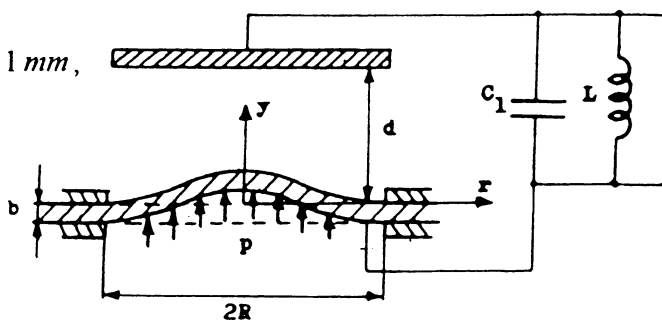
b) Izračunaj frekvenčno občutljivost v področju majhnih tlakov ($p \approx 0$) in srednjo občutljivost v razponu (0–1) bar.

c) Približno določi maksimalno dovoljeno frekvenco spremembe tlaka, ki se s tem senzorjem lahko meri.

Podatki o membrani:

$$R = 2.0 \text{ cm}, \quad b = 0.4 \text{ mm}, \quad d = 1 \text{ mm},$$

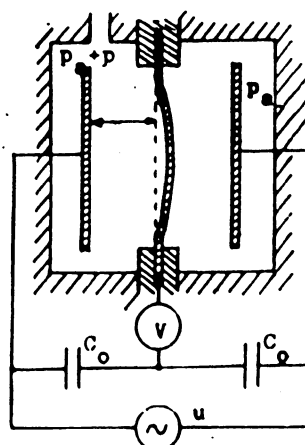
Slika 2



3) Tlak plina merimo s pomočjo diferencialnega kapacitivnega pretvornika z debelo krožno membrano (Slika 3). Pretvornik je spojen v most z napetostnim indikatorjem in z izvorom izmenične napetosti (efektivna napetost $u = 10 \text{ V}$).

Določi občutljivost mosta in približno vrednost frekvence napetosti izvora. Podatki za kapacitivni pretvornik so isti kot v nalogi 2).

Slika 3



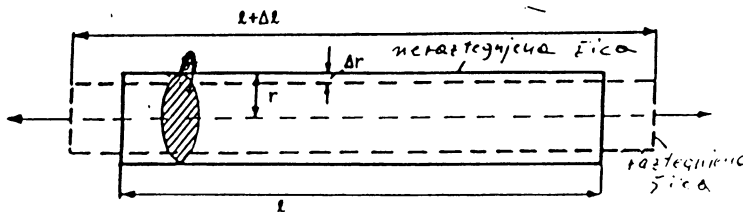
kjer so ρ_R specifična upornost materiala žice, l dolžina žice in r njen polmer. Pri vzdolžni deformaciji žice $\Delta l / l$ pride tudi do zmanjšanja polmera

$$\frac{\Delta r}{r} = -\nu \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

kjer je ν Poissonovo število (0.24 do 0.40 za kovine). S pomočjo enačb (1) in (2) dobimo

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + 2\nu \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho_R}{\rho_R} \quad \text{oz.}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \left(1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho_R / \rho_R}{\Delta l / l} \right) \quad (3)$$



Slika 2: Model kovinske žice

Člen $(\Delta \rho_R / \rho_R) / (\Delta l / l)$ se imenuje koeficient piezo-upornosti in izraža spremembo specifične upornosti žice zaradi mehanskih napetosti. Pri materialih, ki se uporabljajo za izdelavo merilnih trakov je ta koeficient konstantna veličina. Celoten izraz v oklepaju je torej konstanta. S tem postane zveza med spremembo upornosti žice in njenim raztežkom linearna:

$$\frac{\Delta R}{R} = -k \frac{\Delta l}{l} = -k \varepsilon, \quad (4)$$

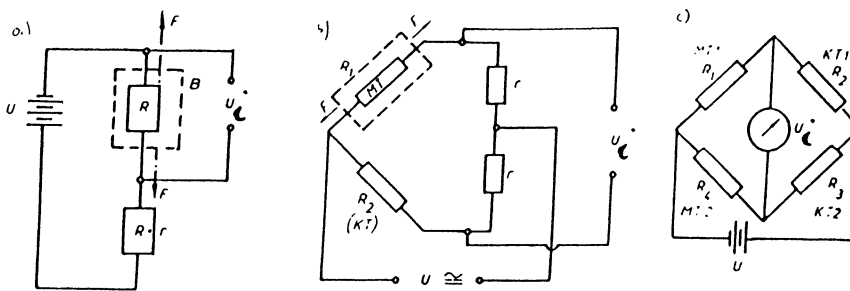
kjer je k občutljivost MT, ki pove kolikšna je relativna sprememba upornosti traku na enoto relativnega raztežka ε . Za večino materialov $k = 2$, za nekatere pa doseže večjo vrednost (npr. $k = 6$ za Pt).

1.2 Princip meritve

Princip meritve je prikazan na sliki 3. Pod vplivom sile F se del B deformira, pri čemer se spremeni upor traka R v R' in merjena napetost U_d v U_d' (slika 3a) in

$$\varepsilon = k \frac{\Delta U_i}{U_i}. \quad (5)$$

Zaradi drugih dejavnikov, ki vplivajo na deformacijo merjenca (temperatura, vlaga) je primernejša shema 1/2-most (slika 3b) ali 1/1-most (slika 3c).



Slika 3: Princip meritve z merilnimi trakovi; a) merjenje padca napetosti, b) 1/2-most, c) 1/1-most

R_1 - upor obremenjenega MT, R_2 - kompenzacijski trak (KT), ki ostane neobremenjen in kompenzira vpliv temperature in vlage, r - upori vgrajeni v merilni instrument

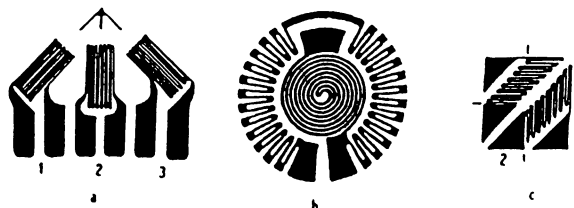
Napajanje mosta je lahko enosmerno ali izmenično. Izmenična napetost (instrumenti z nosilno frekvenco) pride v upoštevanje, ko gre za statično ali kvazistatično spreminjanje merjene veličine. Pri dinamičnih meritvah je za napajanje možno uporabiti enosmerno napetost, ker lezenje statične vrednosti nič ne pomeni ali pa ga celo izločimo z vezavo preko kondenzatorja (slika 3c).

1.3 Oblike merilnih trakov in materiali za njihovo izdelavo

Pri izbiri MT je treba upoštevati:

1. Maksimalno temperaturo merjenja (merjenega mesta). Od tega je odvisna izbira materiala vodnika, zlasti pa materiala podlage in izbira ustreznega lepila, s katerim pritrdimo MT na površino merjenja;
2. Velikost deformacije merjenja pri obremenitvi;
3. Frekvenca spremembe mehanske deformacije; statična, počasi spremenljiva (nizke frekvence), srednje in visoke frekvence;
4. Material merjenja (jeklo, železo, aluminij, les, ...).
5. Merilni problem;

Napetosti v materialih kovinskih konstrukcij so lahko sestavljene. V takih primerih merjenje deformacij zgolj v eni smeri ne zadostuje. Zato se merilni trakovi izdelujejo v različnih oblikah glede na namen. Iz nauka o trdnosti vemo, da je mogoče določiti smer in velikost glavne deformacije, če poznamo deformacijo v treh smereh na neki površini (Primer rozete prikazan na sliki 4a, ki se sestoji iz treh trakov postavljenih pod različnimi koti. Za določene specialne namene se uporabljajo tudi druge oblike, slika 4b in 4c).



Slika 4: Oblike merilnih trakov; a) 0°/45°/90°-rozeta, b) diafragma rozeta, c) 2x45° MT za vrtilni moment

Zahteve za material za izdelavo MT:

- velika specifična upornost ρ_R ,
- čim manjši temperaturni koeficient upornosti α_R ,
- velika občutljivost k .

Zaželjeno je, da imajo trakovi tudi relativno veliko upornost R_0 (upornost MT pri $0\text{ }^\circ\text{C}$), da se zmanjša vpliv upornosti priključnih kablov. Standardni električni upori vodnikov MT so 120, 350 in $600\ \Omega$. Zato so izdelani v obliki večkrat zvite žice ali folije. Premer žice je (3 do 10) μm .

V obsegu $T \leq 300\text{ }^\circ\text{C}$ se uporabljajo (Cu,Ni)-zlitine kot npr. konstantan (60 %Cu, 40 %Ni).

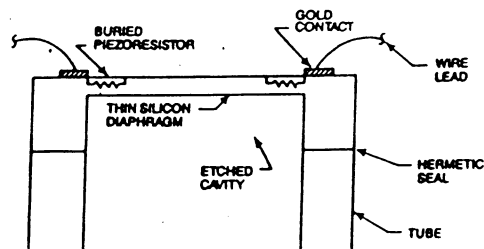
Lastnosti: $k = 2$, $\alpha_R = 3.5 \times 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\rho_R = 0.49\ \Omega\text{mm}^2/\text{mm}$, $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Drugi tak material ima komercialni naziv 'karma' (74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Fe, 3 % Al).

Lastnosti: $k = 2$, $\alpha_R = 1 \times 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\rho_R = 1.6\ \Omega\text{mm}^2/\text{mm}$, $\alpha = 1.3 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Za merjenje napetosti pri visokih temperaturah do $T \approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$ se uporabljajo trakovi iz čiste Pt ali zlitine (90 % Pt in 10 % Ir). Za te materiale je $k = 6$. Slaba stran je velik α_R , majhna ρ_R : 0.1 za Pt in 0.25 za Pt-Ir zlitino (v $\Omega\text{mm}^2/\text{mm}$).

Razen kovin se za MT uporabljajo tudi polprevodni materiali kot npr. kvarc (SiO_2) z visokim dodatkom primesi. Polprevodniški MT imajo zelo visoko občutljivost $k \approx 200$. Velik k izhaja iz dejstva, da je pri kvarcu piezo-uporovni koeficient velik. Na sliki 5 je prikazana shema piezo-uporovnega pretvornika s štirimi MT razporejenimi po obodu.



Slika 5: Shema piezo-uporovnega merilnega traku

Polprevodniški MT so primerni za občutljive meritve napetosti in sile. Po drugi strani, linearnost in temperaturna stabilnost, kakor tudi obseg delovnih temperatur, so slabši kot pri metalnih trakovih.

Za lepljenje se v obsegu nižjih temperaturah uporablja araldit in bakelitno-fenolna lepila. Za visoke T se uporabljajo keramična lepila, pri čemer se žica nahaja med azbestnim slojem.

1.4 Vpliv temperature in kompenzacija s pomočjo kompenzacijskih trakov

Če linearna temperaturna koeficienta raztezanja traka α^{MT} in podlage α^P na kateri je trak nalepljen nista enaka, potem se pri spremembi temperature ΔT v žici pojavi dodatna napetost

$$\sigma(T) = E_y (\alpha^P - \alpha^{MT}) \Delta T, \quad (6)$$

kjer je E_y modul elastičnosti žice. Ustrezna sprememba upornosti zaradi ΔT znaša

$$\frac{\Delta R(T)}{R} = k \sigma(T) / E_y = k (\alpha^P - \alpha^{MT}) \Delta T. \quad (7)$$

Če je linearni temperaturni koeficient upornosti α_R , je celotna sprememba upornosti zaradi spremembe temperature enaka:

$$\frac{\Delta R(T)}{R} = [k (\alpha^P - \alpha^{MT}) + \alpha_R] \Delta T = \alpha_e \Delta T, \quad (8)$$

kjer je α_e ekvivalentni linearni temperaturni koeficient upornosti

$$\alpha_e = k (\alpha^P - \alpha^{MT}) + \alpha_R. \quad (9)$$

Pravkar izračunana sprememba upornosti zaradi spremembe ΔT simulira mehanski raztezek merjenca in dodatno 'navidezno' napetost. Zato, da so navidezne napetosti čim manjše, se komercialni trakovi med izdelavo priredijo za določen linearni temperaturni razteznostni koeficient. Vrednost α_e je nič, če je $\alpha_R = -k (\alpha^P - \alpha^{MT})$, kar se v praksi praviloma ne doseže. Nasprotno, običajno je $\alpha_e > \alpha_R$.

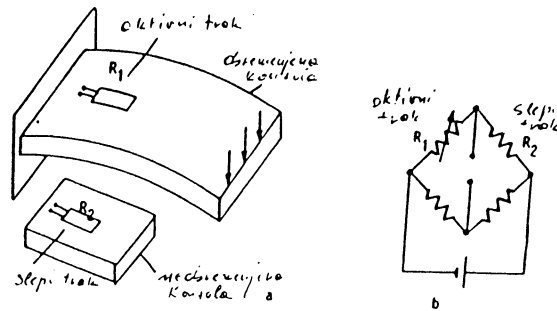
Primer: Merilni trak T-prilagojen za jekla: $\alpha^P = 10.8 \mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$, $\alpha^{MT} = 12 \mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$ (konstantan), $k = 2$, $\alpha_R = 35 \mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$:

$$\alpha_e = 35 + 2 \times (10.8 - 12) = 37.4 \mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}.$$

Spremembe $\Delta R/R$ merilnih trakov pri tipičnih deformacijah, ki se pojavljajo pri materialih v strojništvu in gradbeništvu, so velikosti (0.01 do 0.1) % kolikor znašajo tudi temperaturne spremembe upornosti pri ΔT za nekaj deset $^\circ\text{C}$. Iz povedanega sledi, da ΔT spremembe lahko povzročajo velike napake pri merjenju, če pri tem ne upoštevamo vpliv temperature odnosno, če se njenega vpliva ne kompezira. Eden od uveljavljenih načinov T-kompenzacije je uporaba tz. slepih merilnih trakov.

Na sliki 6b je prikazan most v katerem sta vključena dva merilna traka R_1 in R_2 z identičnima karakteristikama. Trak R_1 , zalepljen na merjenec (konzolo), katerega upogibna deformacija se meri, je aktivni merilni trak (slika 6a). Trak R_2 je slepi MT zalepljen na oblogo (vzorec) iz istega materiala kot merjenec, ki pa ni pod vplivom zunanjih mehanskih napetostih. Vzorec na katerem je slepi (kontrolni) trak se nahaja v neposredni bližini in v dobrem toplotnem kontaktu z merjencem, tako da sta temperaturi obeh v vsakem trenutku

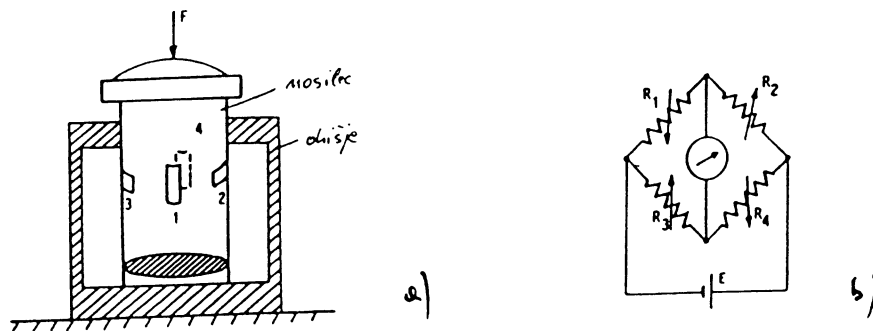
enaki. Na ta način se $\Delta R/R$ spremembe merilnih trakov zaradi temperature (in vlage) v vsakem od trakov med seboj izničijo. Slep trak torej ne prispeva k občutljivosti ampak samo opravlja vlogo T-kompensacije.



Slika 6: a) Postavljanje aktivnega in slepega traka na konzolo, b) most z aktivnim in slepim trakom

1.5 Most z merilnimi trakovi

Kot elastični element za merjenje srednjih in velikih sil s pomočjo merilnih trakov se pogosto uporablja vertikalno postavljen votel valjast nosilec iz kvalitetnega jekla (slika 7). Vrh nosilca je zaobljen tako, da vertikalna sila, ki se meri, deluje vzdolž osi. Na nosilcu so zalepljeni štiri identični trakovi na način kot prikazano na sliki 7. V praktičnih merilcih sile se uporablja osem ali več MT postavljenih vodoravno ali navpično po obsegu. S tem se lahko kompenzira vpliv eventualnega ukrivljenja zaradi neaksialnosti delovanja sile in zaradi eventualnih razlik v karakteristikah trakov. Nosilec z MT je zaščiten pred zunanjimi vplivi (vlaga, prah) z ohišjem.



Slika 7: a) Valjast nosilec kot elastični element za merjenje sile s pomočjo merilnih trakov, b) način vezave merilnih trakov v polni most

Pri delovanju sile F so deformacije trakov 1 in 4 negativne (tlak)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = -F / E_y A , \quad (10)$$

deformacije trakov 2 in 3 pa pozitivne

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \nu F / E_y A . \quad (11)$$

Ustrezne spremembe upornosti trakov pod vplivom sile F so

$$\frac{\Delta R_1}{R} = \frac{\Delta R_4}{R} = -k \frac{F}{E_y A} \quad \text{in} \quad \frac{\Delta R_2}{R} = \frac{\Delta R_3}{R} = v k \frac{F}{E_y A} \quad (12)$$

Dejstvo, da so spremembe upornosti negativnega predznaka, se izrabi za povečanje občutljivosti merjenja, če trake spojimo v polni (1/1) most. Izhodna napetost (signal) mosta je

$$U_i = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \quad (13)$$

Z uporabo enačbe (12) v enačbi (13) dobimo

$$U_i = -E \frac{(v+1)k}{2E_y A} F \quad (14)$$

Izhodna napetost je torej linearno odvisna od sile F . Z merilnimi trakovi z $R = 350 \Omega$ in $k = 2$ je maksimalna izhodna napetost U_i (20 do 30) mV.

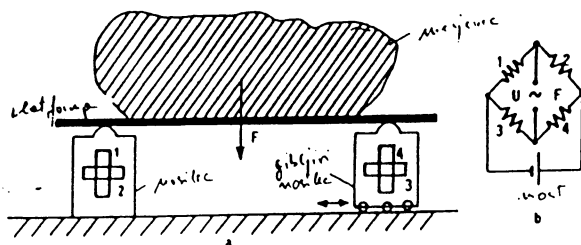
Ker imajo vsi trakovi identične karakteristike in se vsi nahajajo praktično na isti temperaturi, se vpliv spremembe temperature okolice izniči tj. most je T-kompenziran.

Merilni obseg merilcev z valjastim nosilcem: nekaj 100 N do 5×10^6 N

Nelinearnost merjenja sile: 0.05 %

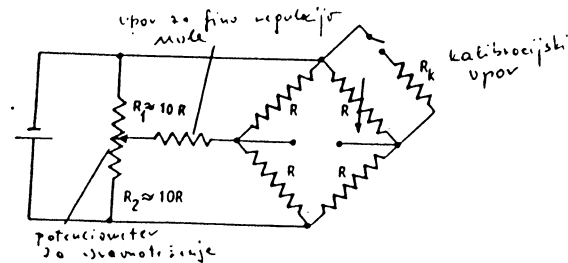
Histereza: 0.02 %

Za merjenje teže večjih merjencev (kovinske grede, motorna vozila, itd.) se uporabljata dva nosilca z merilnimi trakovi in platformo na katero se postavi merjenec (slika 8a). Celotna teža merjenca je enaka vsoti sil, ki delujejo na nosilca. Avtomatsko odčitavanje vsote sil se lahko doseže na več načinov. Najenostavnejša rešitev je lepljenje na nosilca po dva traka, ki se vezeta v en most (slika 8b).



Slika 8: Merjenje teže večjih objektov z dvema nosilcema z merilnimi trakovi:
a) način lepljenja trakov, b) vezava mostu

Na sliki 9 je prikazana shema mosta z merilnimi trakovi skupno z uporoma R_1 in R_2 , ki služita za fino regulacijo ravnovesnega stanja. S pomočjo teh uporov se lahko izvede 'tariranje' mostu, tj. uravnoteženje mostu, če nanj deluje sila katere spremembo merimo. Primer, če se pri merjenju teže praznega vozila most uravnovesi ('tarira'), bo 'električna' teža potem kazala čisto težo tovora.



Slika 9: Električna shema mosta za merjenje sil in deformacij z elementi za uravnoteženje in kalibracijo

Z uporabo R_k se most lahko kalibrira bodisi v enotah relativnega raztezka ϵ (strain gauge) ali pa sile F na naslednji način. Kalibracijski upor R_k z znano vrednostjo se veže s pomočjo stikala P paralelno z merilnim trakom R (katerega upornost se, v odvisnosti od sile, zmanjšuje). Sprememba upornosti v tej veji mosta, zaradi priključitve R_k znaša:

$$\frac{\Delta R_k}{R} = \frac{1}{R} \left(\frac{R R_k}{R + R_k} - R \right) \quad (15)$$

Ker se R_k izbere tako, da je $R_k \gg R$ sledi

$$\frac{\Delta R_k}{R} = - \frac{R}{R_k} \quad (16)$$

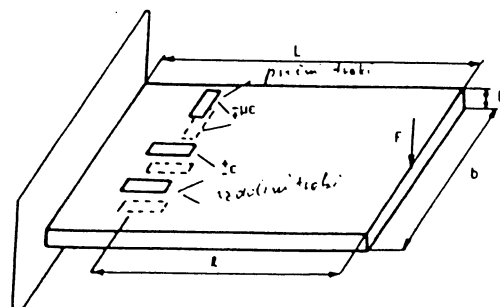
Torej je priključitev kalibracijskega upora R_k ekvivalentna deformaciji merilnega traku R (po enačbi 5):

$$\epsilon_k = - \frac{1}{k} \frac{R}{R_k} \quad (17)$$

Na ta način lahko skalo instrumenta kalibriramo, namesto v enotah napetosti ali toka, direktno v enotah relativnega raztezka.

1.4 Upogibni nosilec kot elastični element

Upogibni nosilec (konzola) kot elastični element za merjenje sil se uporablja v obsegu (1 do 5000) N. Na sliki 10 je prikazan način lepljenja merilnih trakov na konzolo.



Slika 10: Upogibni nosilec kot elastični element za merjenje sile s pomočjo MT

Za konzolo je značilen obstoj mest z deformacijami enake velikosti, toda nasprotnega predznaka. Upogibna napetost σ_u na poziciji l zaradi vertikalne sile F na koncu konzole je

$$\sigma_u = \pm \frac{M_u}{W_x} = \pm \frac{Fl}{bh^2/6}, \quad (18)$$

kjer je M_u upogibni moment in W_x odpornostni moment preseka. Predznak $+$ se nanaša na gornjo, znak $-$ pa na spodnjo površino konzole. Ker je $\sigma_u = E_y \varepsilon$ (Hookov zakon), dobimo:

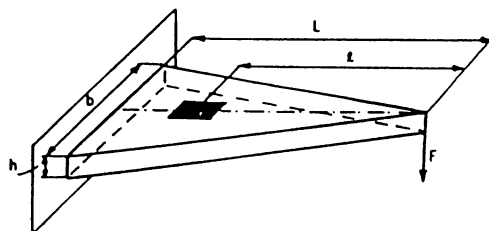
$$\varepsilon = \pm \frac{1}{E_y} \frac{6Fl}{bh^2}. \quad (19)$$

Razen vzdolžno postavljenih trakov se lahko koristi tudi trakove postavljene prečno na smer konzole. Spremembe upornosti teh trakov so v -krat manjše od sprememb vzdolžnih trakov in nasprotnega predznaka:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm kv \frac{1}{E_y} \frac{6Fl}{bh^2}. \quad (20)$$

V določenih primerih se kot elastični element uporablja tudi konzola trikotne oblike prikazana na sliki 11. Namreč napetost konzole vzdolž simetrijske osi ni odvisna od razdalje l . Tako merilne trakove lahko postavimo kjerkoli vzdolž te osi. Deformacije trakov na zgornji oz. na spodnji strani so:

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{E_y} \frac{6FL}{bh^2}. \quad (21)$$

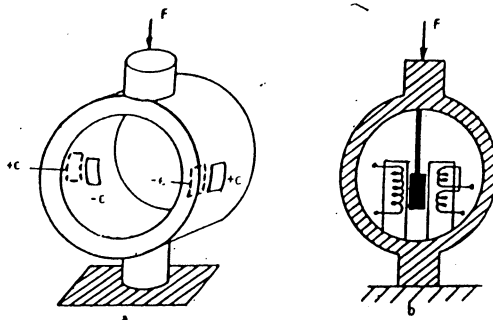


Slika 11: Trikotna konzola kot elastični element za merjenje sile s pomočjo MT

Izvedene enačbe veljajo za relativno dolge konzole. Merilne trakove je treba postaviti dovolj daleč od mesta fiksiranja konzole na merjenec. Okrog tega mesta in mesta prijemanja sile nastopajo sestavljene napetosti, ki zavisijo od velikosti sile vpetja in oblike konzole in gornje enačbe ne veljajo več.

1.5 Prstan kot elastični element

Na sliki 12 je prikazan jeklen prstan kot elastični element za merjenje sile s pomočjo merilnih trakov. Na takem obroču sta dve mesti s pozitivno in negativno deformacijo, kar pomeni, da lahko silo merimo s štirimi aktivnimi trakovi postavljenimi na način, ki ga kaže slika 12a.

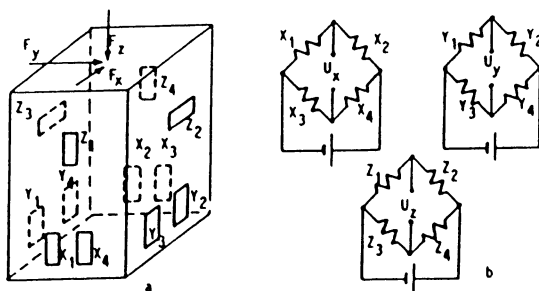


Slika 12: Jeklen obroč kot elastični element za merjenje sile; a) z merilnimi trakovi, b) z induktivnim diferencialnim transformatorskim pretvornikom

Razen trakov se lahko uporabi tudi induktivni diferencialni pretvornik (slika 12b). Na gornjem delu obroča je pritrjeno feromagnetno jedro, transformator z dvema diferencialno vezanima tuljavama se nahaja na spodnjem delu. Pod vplivom sile F se obroč deformira, jedro menja svoj položaj glede na sekundarno navitje in povzroči spremembo izhodne napetosti sorazmerno sili.

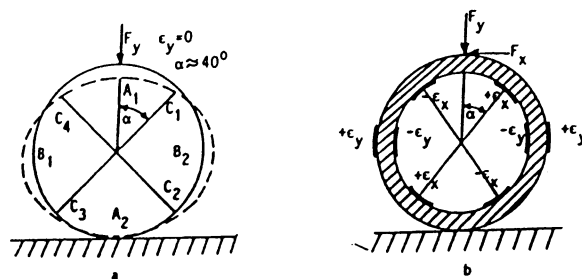
1.6 Merjenje normalnih komponent sile

V praksi se pojavlja tudi potreba, da se poleg velikosti določi tudi smer delovanja sile tj. potrebno je merjenje normalnih komponent (F_x , F_y , F_z). Za merjenje teh komponent se lahko uporabi nosilec oblike paralepipeda prikazanega na sliki 13. Na nosilec je nalepljenih 12 trakov, pri čemer so trakovi (X_{1-4} , Y_{1-4} , Z_{1-4}) vezani v tri ločene 1/1-mostičke, ki služijo za merjenje komponent (F_x , F_y , F_z), respektivno. Če nekateri od trakov spremenijo upornost v odvisnosti od neke druge komponente, občutljivost mosta na drugo komponento mora biti enaka nič. Tako npr. vsi trakovi za merjenje X in Y komponent enako menjajo upornost v odvisnosti od F_z . Rezultirajoči učinek vseh teh sprememb na izhodne signale $U_{i,x}$ in $U_{i,y}$ je enak nuli. S tem v zvezi je treba poudariti, da mora sila F_z prijemat v težišču gornje ploskve nosilca, da se izognemo ukrivljenju nosilca.



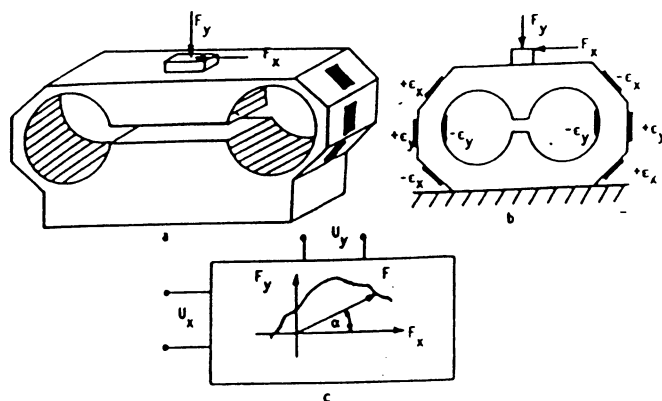
Slika 13: Merjenje pravokotnih komponent sile s pomočjo merilnih trakov; a) način lepljenja, b) mostovi za merjenje posameznih komponent

Komponenti F_x in F_y se lahko merita tudi s pomočjo elastičnega prstana (slika 14). Če na prstan (obroč) deluje samo vertikalna komponenta F_y , se obroč deformira tako, da je deformacija u točkah A_1 in A_2 na notranji strani negativna, v točkah B_1 in B_2 pa pozitivna. Ker deformacija obroča spremeni predznak vzdolž obsega sledi, da na obsegu obstojajo mesta $C_1 - C_4$ v katerih je napetost zaradi vertikalne komponente enaka nič. Z analizo se da pokazati, da se točke $C_1 - C_4$ nahajajo pod kotom $\alpha = 45^\circ$ glede na vertikalo. Merilni trakovi, ki se lepijo na mestih točk $C_1 - C_4$ so občutljive samo na komponento sile F_x . Nasprotno trakovi, ki se lepijo pod kotom 90° , služijo za merjenje vertikalne komponente F_y (slika 14b).



Slika 14: Prstan kot pretvornik za merjenje normalnih komponent sile; a) princip delovanja, b) način lepljenja trakov za merjenje komponent (F_x , F_y)

Čeprav se z opisanim prstanom lahko neodvisno merijo normalne komponente sile, ta senzor ni praktičen zaradi kotaljenja obroča pod vplivom horizontalne sile F_x . Znatno boljše tehnične karakteristike ima oktogonalni prstan (slika 15).



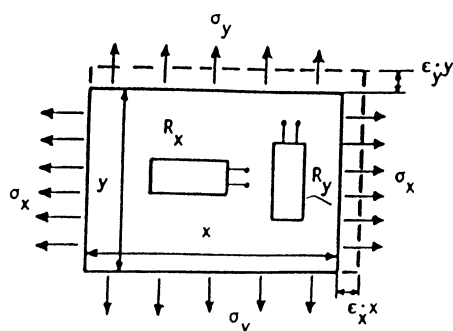
Slika 15: Oktogonalni dvojni prstan za merjenje normalnih komponent sile; a) izgled, b) način lepljenja trakov, c) vektorski diagram s pomočjo X-Y pisalnika

Osnovna ploskev je široka in se lahko stabilno pritrdi na podlago in s tem prepreči pomik pod vplivom horizontalne sile. Podobno kot pri prstanu, trakovi lepljeni poševno merijo F_x , pravokotno pa F_y -komponento sile. S pravilno vezavo se lahko meri tudi moment sile. Za opazovanje vektorja sile v ravnini se lahko uporabi X-Y pisalnik na katerega vhod pripeljemo napetosti $U_{i,x}$ in $U_{i,y}$ (slika 15c). V tem primeru je razdalja krivulje od koordinatnega začetka sorazmerna velikosti sile F , kot α pa trenutnemu kotu pod katerim deluje sila, ki se meri.

(Opomba: Egzaktna matematična analiza tega obroča je kompleksna. Dimenzioniranje praktičnih pretvornikov se dela na osnovi empiričnih enačb in obnašanjem modela s pomočjo fotoelastičnih metod).

1.6 Merjenje dvoosnih napetosti

Na sliki 16 je prikazana ravna plošča, istočasno natezno napeta v dveh smereh.



Slika 16: Merjenje dvoosnih napetosti ravne plošče s pomočjo merilnih trakov

Merjenje napetosti σ_x , σ_y se lahko opravi z dvema trakovoma R_x , R_y . Z merjenjem upornosti teh dveh trakov direktno merimo deformacije ϵ_x , ϵ_y . Postavlja se problem kako izračunati ustrezne napetosti σ_x , σ_y . Rešitev dobimo na osnovi naslednjega razmisleka. Če predpostavimo, da obstaja samo napetost σ_x , bi deformacije plošče v X in Y smeri bile:

$$\epsilon_x' = \frac{\sigma_x}{E_y} \quad \text{in} \quad \epsilon_y' = -\nu \frac{\sigma_x}{E_y} . \quad (22)$$

V kolikor bi obstajala samo napetost σ_y , tedaj bi obstajale samo sledeče deformacije:

$$\epsilon_x'' = -\nu \frac{\sigma_y}{E_y} \quad \text{in} \quad \epsilon_y'' = \frac{\sigma_y}{E_y} . \quad (23)$$

Če istočasno nastopajo napetosti vzdolž obeh oseh, tedaj so rezultirajoče deformacije enake vsoti ustreznih deformacij:

$$\epsilon_x = \epsilon_x' + \epsilon_x'' = \frac{1}{E_y} (\sigma_x - \nu \sigma_y) , \quad (24)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_y' + \epsilon_y'' = \frac{1}{E_y} (\sigma_y - \nu \sigma_x) . \quad (25)$$

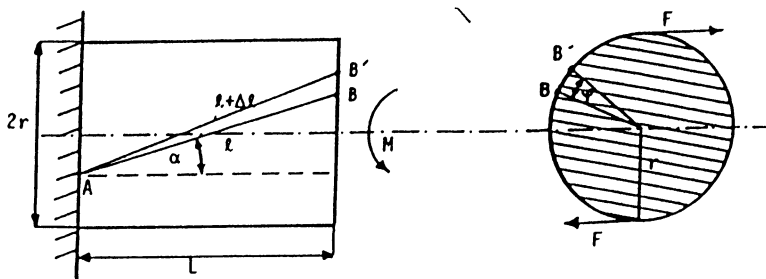
Če z merjenjem spremembe upornosti merilnih trakov določimo deformacije ϵ_x , ϵ_y in, če sta E_y in ν poznana, lahko normalne napetosti dobimo z rešitvijo gornjega sistema enačb:

$$\sigma_x = \frac{E_y}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) , \quad (26)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) . \quad (27)$$

1.7 Merjenje napetosti zaradi torzije

Napetost materiala zaradi torzije predstavlja poseben primer napetosti, ki se pogosto pojavlja v strojni tehniki pri motorjih, dvigalih, osovinskem prenosu, ipd. Na sliki 17 je prikazana gred krožnega preseka, ki je na enem koncu vpeta, na prostem koncu pa obremenjena s torzijskim momentom M_t (dvojica sil F).



Slika 17: Deformacija gredi pod vplivom torzijskega momenta

Zaradi torzije lok \widehat{AB} dolžine l preide v nov položaj $\widehat{AB'}$, pri čemer se dolžina poveča na $l + \Delta l$. Pomik točke B v funkciji zasučnega kota φ gredi je $\widehat{BB'} = r\varphi$, torej:

$$\left(\widehat{AB'}\right)^2 = (l + \Delta l)^2 = L^2 + (r\varphi + l \sin \alpha)^2. \quad (28)$$

S kvadriranjem in zanemarjanjem členov nižjega reda velikosti dobimo:

$$1 + 2 \frac{\Delta l}{l} = \left(\frac{L}{l}\right)^2 + \frac{2r\varphi}{l} \sin \alpha + \sin^2 \alpha. \quad (29)$$

Ker je $L/l = \cos \alpha$, je relativna deformacija loka \widehat{AB}

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{r\varphi}{l} \sin \alpha = \frac{r\varphi}{L} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{r\varphi}{2L} \sin 2\alpha. \quad (30)$$

Iz teorije elastičnosti je znano, da je zasučni kot okrogle palice:

$$\varphi = \frac{M_t l}{IG} = \frac{2M_t L}{\pi G r^4}, \quad (31)$$

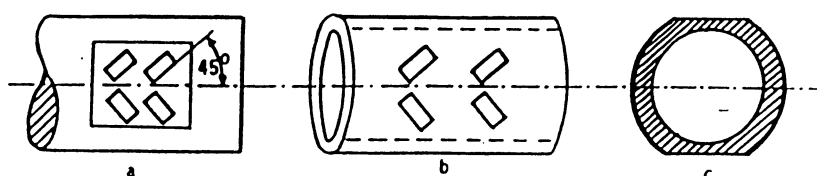
kjer sta G strižni modul elastičnosti in I vztrajnostni moment ($I = \pi d^4/64$ za okrogli profil). Z zamenjavo te enačbe v enačbo za deformacijo loka \widehat{AB} dobimo

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{M}{\pi G r^3} \sin 2\alpha. \quad (32)$$

Relativna deformacije merilnega traku je podana z isto enačbo. Relativna sprememba upornosti je:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = \frac{k M_t}{\pi G r^3} \sin 2\alpha . \quad (33)$$

Iz enačbe 33 sledi, da je relativna sprememba upornosti sorazmerna z momentom M . Ta sprememba je maksimalna, če so merilni trakovi lepljeni pod kotom $\pm 45^\circ$, tj., ko je $\sin 2\alpha = \pm 1$. Trakovi lepljeni pod kotom $\pm 45^\circ$ utrpijo enake spremembe upornosti toda nasprotnega predznaka. Ti traki se vežejo v sosednje veje mostu za merjenje. Največjo občutljivost merjenja torzije ima most s štirimi aktivnimi traki (slika 18). Če z lepljenjem trakov na gred ne dosežemo dovolj veliko občutljivost, se lahko poslužimo elastičnega elementa v obliki votlega valja na katerega nalepimo trakove (slika 18b). Votli valj se fiksira na gred kot spojka, ki prenaša torzijski moment, ki se meri. Še večjo občutljivost dosežemo, če steno valja na dveh nasprotnih straneh, na katere nalepimo trakove, porezkamo (slika 18c).

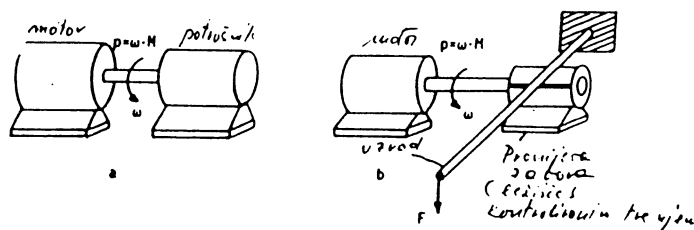


Slika 18: Pretvorniki za merjenje deformacij zaradi torzije; a) polna gred, b) votla gred, c) votla porezkana gred za večjo občutljivost

Merjenje momenta M_t je zanimivo za določanje moči,

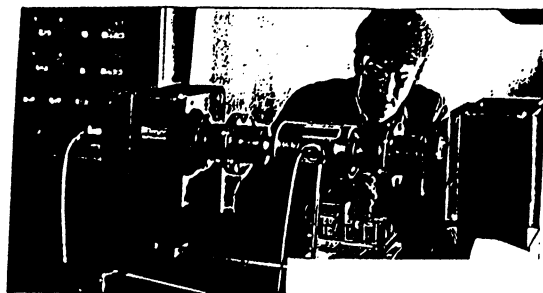
$$P = M_t \omega, \quad (34)$$

ki jo motor prenaša potrošniku preko gredi. Za določitev koristne moči je treba meriti moment M_t in kotno hitrost ω (slika 19a). Klasičen način merjenja moči je s pomočjo ležaja s kontroliranim trenjem tipa Pronyjeve zavore (slika 19b). Os motorja je postavljena v ležišče katere trenje se uravnava s silo F . Na ta način se ustvari ista kotna hitrost kot takrat, ko motor poganja potrošnik. Moment je tedaj enak momentu sile trenja, ki je sorazmeren sili F s katero se naravnava trenje v ležišču. Merjenje M_t se torej prevede na merjenje sile F .



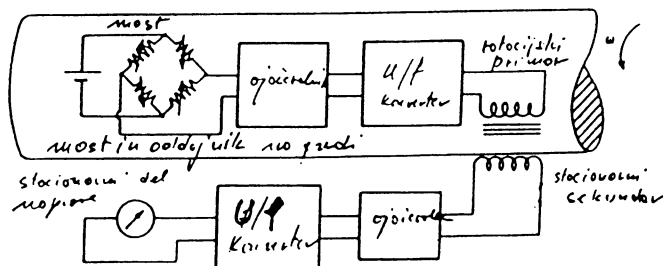
Slika 19: a) Motor, ki vrti potrošnik, b) klasično merjenje momenta motorja s Prony-jevo zavoro

V novejšem času se, namesto mehanskega načina, uporabljajo merilni trakovi. Kot elastični element služi valj z nalepljenimi trakovi (slika 18b), ki se ga vgradi na spoju motorne gredi in potrošnika (slika 20).



Slika 20: Montaža na gred celice z merilnimi trakovi za merjenje momenta

Eden od problemov pri tem je realizacija električnih kontaktov za napajanje mosta in odvzem signala glede na to, da se most vrti skupaj z gredjo. Najenostavnejša izvedba kontakta je s pomočjo krtačk in drsnih obročev. Pri tem se javlja problem obrabe krtačk in vpliv nečistoč na kontaktno upornost še zlasti, če gre za 'on-line' meritev. Eleganten način rešitve problema kontaktov pri merjenju napetosti rotirajočih gredi je uporaba miniaturnega telemetričnega sistema, katerega oddajni del se namesti na gred z merilnimi trakovi kot prikazano na shemi (slika 21).

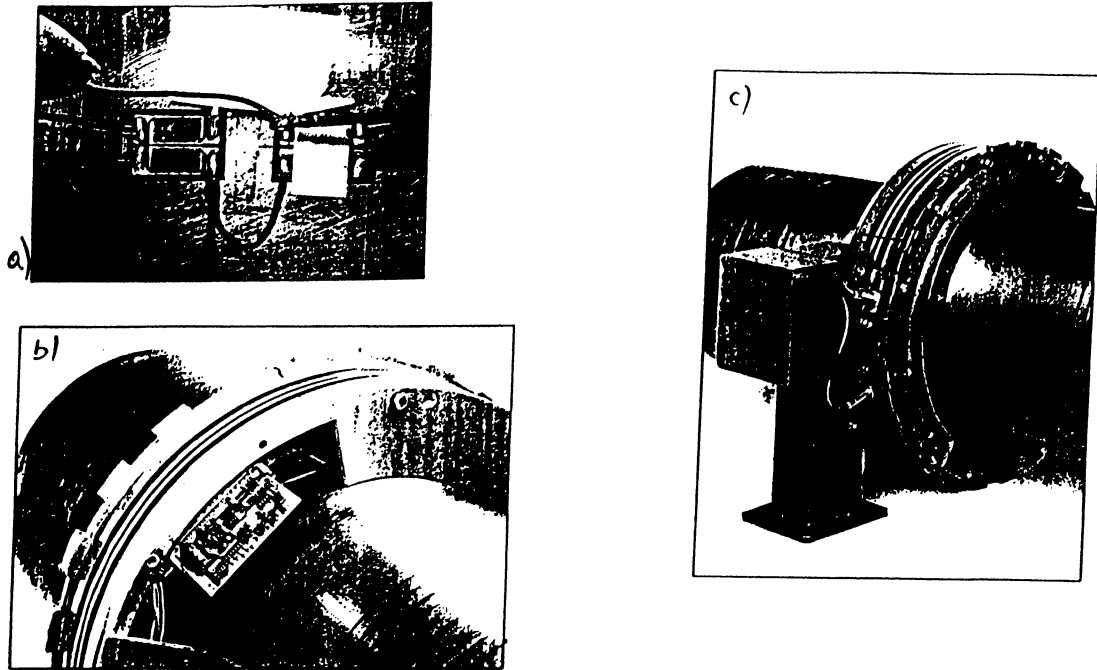


Slika 21: Blok shema naprave za brezkontaktno merjenje momenta na rotirajoči gredi

Izhodna napetost U_r , ki je sorazmerna torzijskemu momentu M_r , se ojači in vodi na vhod napetostno/frekvenčnega (U/f) pretvornika. Izhod pretvornika je periodična ali sunkovna napetost, katere frekvenca je linearna funkcija momenta M_r . Signal se vodi na primar transformatorja, ki rotira z gredjo. Sekundar transformatorja se nahaja poleg gredi, tj., predstavlja stator v katerem se inducira napetost z enako frekvenco kot tista v primarni tuljavi. Inducirani signal se ojači in vodi na f/U pretvornik. Merjeni signal je sorazmeren spremembi frekvenca oz. momentu M_r .

Na sliki 22 je prikazana izvedba sistema PALCO® (firme VAF Instruments, NZ) za sprotno kontrolo torzijskega momenta, obratov in moči na ladijskem gredju. Na sliki 22a je prikazan način pritrditve merilnih trakovi na ladijsko gred, na sliki 22b način pritrditve rotorske elektronike, slika 22c pa zunanji izgled celotne naprave (rotor in stator). Komerzialne merilne celice za vrtilni moment se razlikujejo (različni tipi) po načinu vgraditve, po merilnem obsegu in po številu vrtljajev (max. do 40.000 /min).

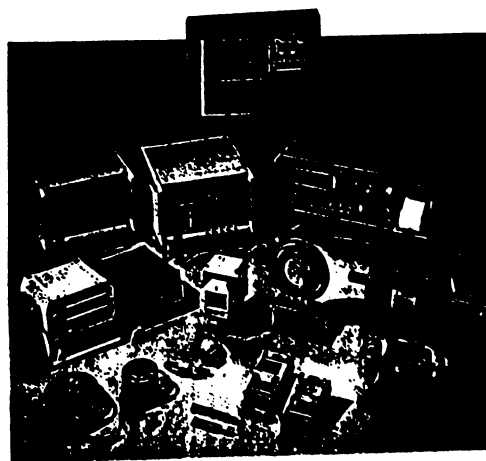
Na sliki 23 sta prikazana primera uporabe merilnih trakov: merilna celica za določanje prednapetosti v vijaku (a) in merjenje napetosti v vijaku (b). Slika 24 prikazuje različne naprave za merjenje deformacij sile, vrtilnega momenta, tlaka in pospeška vodilnega proizvajalca (Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM) tovrstne opreme.



Slika 22: PALCO® merilec vrtilnega momenta ladijske gredi: a) način pritrditve trakov na gred, b) način pritrditve rotorske elektronike, c) zunanji izgled celotne naprave



Slika 23: Primera uporabe merilnih trakov: a) merilna celica s trakovi za določanje prednapetosti vijakov b) merjenje napetosti v vijaku,



Slika 24: HBM naprave za merjenje sile, tlaka, vrtilnega momenta, pomika in pospeška

1.8 Napake pri merjenju

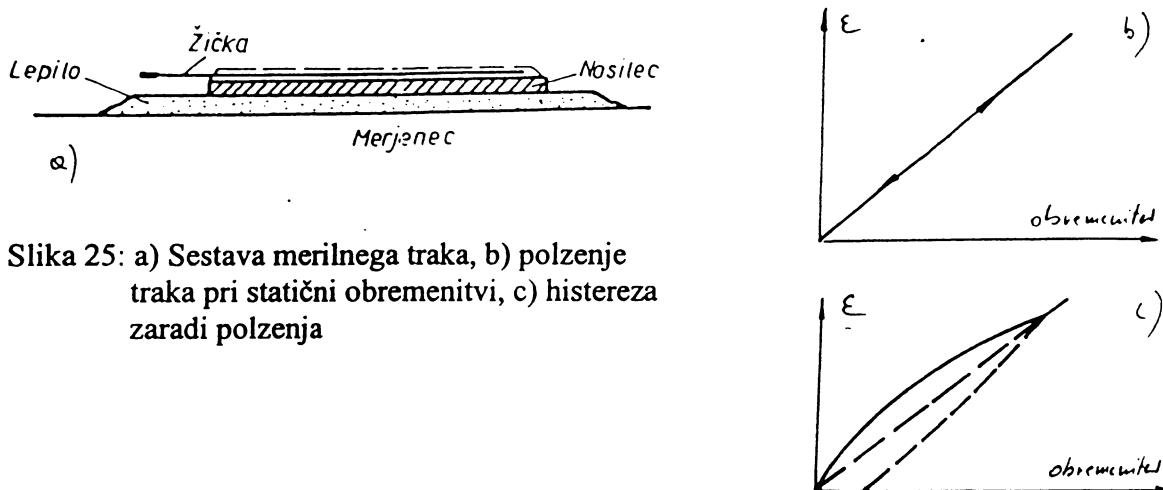
Na natančnost izmerjenih vrednosti raznih veličin z merilnimi trakovi vpliva več faktorjev. Večini se lahko izognemo s pravilnim izvajanjem merjenja ali pa jih upoštevamo kasneje s korigiranjem rezultatov merjenja. Važnejši vzroki za napake so:

a) prečna občutljivost:

Pri obremenitvi, razen deformacije v vzdolžni (longitudinalni) smeri (občutljivost k), nastopa tudi deformacija v prečni (transverzalni) smeri (občutljivost k_t), pri čemer je $k_t < k$. Napaka zaradi k_t je sorazmerna velikosti traku iz vodnikov žice. Napaki se v večji meri izognemo, če namesto vodnikov uporabljamo folije pri katerih je k_t manjši.

b) polzenje:

Pri merilnem traku je 'rešetka' žice nalepljena, folija pa neparjena na podlago. Podlaga se prilepi na merjenec (slika 26a). Izredno pomembno je, da rešetka vodnika (ali folija) prenaša spremembo dolžine merjenca zaradi obremenitve brez polzenja, npr. zaradi temperature (slika 26b, nosilec iz papirja), ki lahko povzroča tudi histerezo (slika 26c). To pomeni, da se mora rešetka vodnika deformirati tako kot se deformira merjenec. Za preprečevanje polzenja je zelo važna kvaliteta podlage merilnega traka in izbira lepila. Pri dinamičnih obremenitvah je treba trak večkrat obremeniti in razbremeniti, da se izognemo histerezi s čemer dobimo pravilno deformacijo merilnega traka.



Slika 25: a) Sestava merilnega traka, b) polzenje traka pri statični obremenitvi, c) histereza zaradi polzenja

c) vpliv temperature:

Kadar pri merjenju nastopijo tudi spremembe temperature, se zaradi odvisnosti specifične upornosti materiala traka od temperature in razlik v linearnih temperaturnih razteznostnih koeficientih merjenca in traka pojavi dodatna, relativno velika navidezna deformacija oz. napetost, ki predstavlja izvor napake. Tovrstnim napakam zaradi temperaturnih sprememb se v večji meri izognemo:

- z vgraditvijo slepih trakov,
- s posebnimi temperaturno-kompenzirajočimi merilnimi trakovi,
- s pravilno izbiro trakov (podane so krivulje za α_c v odvisnosti od T).

d) dinamične lastnosti:

Za dinamične meritve je važno, da trakovi zdržijo veliko število ciklov. Normalno je, da pri deformaciji $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ vzdržijo nekaj 10^6 ciklov ('trajna trdnost'). Pri manjših amplitudah vzdržijo ustrezno več. Merilne folije vzdržijo večje število ciklov.

e) upor izolacije:

Upor izolacije R_{iz} je upor med koncema vodnika in podlago na katero je merilni trak nalepljen. Ki mora biti čim večji. Velikost R_{iz} je odvisna od različnih vplivov (temperatura, vlaga, konstruktivne lastnosti, lepilo, postopek sušenja). Premajhen upor povzroča napako pri merjenju deformacije. Upornost je ustrezna, če je $R_{iz} > 600 \text{ M}\Omega$. Če je $100 \text{ M}\Omega < R_{iz} < 600 \text{ M}\Omega$, se s takimi trakovi lahko opravlja samo grobe meritve. Če je $R_{iz} < 100 \text{ M}\Omega$, je treba trak zamenjati.

f. vpliv vlage:

Če vlaga prodre v vezivni sloj, se zmanjšajo mehanske in elektro-izolacijske lastnosti merilnih trakov kar precej vpliva na točnost meritev. Najbolj občutljivi na vlago so trakovi s papirjem. V splošnem njihova uporaba v pogojih večje vlažnosti ni priporočljiva. Manj občutljivi na vlago so trakovi s podlago iz poliamida in krezola. S posebnimi pokritji je mogoče doseči, da so trakovi uporabni tudi po več dni v vodi.

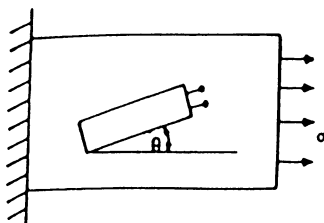
g. vpliv kablov:

h. napaka zaradi poševno postavljenega traka:

Na sliki 26 je prikazana ravna plošča obremenjena z natezno napetostjo σ vzdolž horizontalne osi. Merilni trak je postavljen poševno pod kotom θ . Preprost izračun deformacije za ta primer da naslednji rezultat:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E_y} (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) . \quad (35)$$

Enačba (35) pove, da je deformacija poševno postavljenega traku manjša od deformacije, ki bi jo 'doživel' pravilno postavljen trak ($\theta = 0$). Če je npr. $\theta = 15^\circ$ in $\nu = 0.3$, ima poševno postavljeni trak za 8.7 % manjšo upornost kot trak nalepljen točno v smeri napetosti.



Slika 26: Merjenje enoosnega raztezanja plošče s poševno postavljenim merilnim trakom.

Naloge Fiz-mer: Sila, napetost

1) Merjenje teže poteka s pomočjo aluminijaste konzole in merilnih trakov (slika a). Traki so povezani v most (slika b). Kot indikator služi galvanometer z upornostjo $R_i = 1000 \Omega$, razreda točnosti 1% in tokom pri polnem odklonu $I_i = 10 \mu A$. Analiziraj dve konfiguraciji mosta.

a) Most z dvema aktivnima trakovoma A in B.

b) Most z enim aktivnim trakom A in enim slepim trakom C.

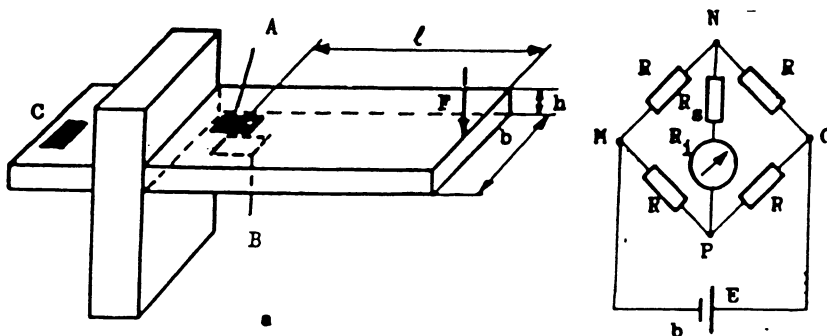
c) V konfiguracijah a) in b) določi vrednost upornosti R_{sa} in R_{sb} , ki jo je treba vezati zaporedno z instrumentom za doseg polnega odklona pri maksimalni sili $F_{max} = 98.1 N$.

d) Določi nelinearnost merjenja računano glede na tangento karakteristike pri $F = 0$. Ali je potrebno, glede na razred instrumenta, izdelati nelinearno kalibracijo skale v enotah sile?

Ostali podatki:

merilni trak - upornost $R = 200 \Omega$, občutljivost $k = 2.1$, $I = 20 mA$;

konzola $l = 0.5 m$, $b = 5 cm$, $h = 5 mm$, $E_y = 5.1 \times 10^5 N/mm^2$.



2) Vibracije jeklene palice pod vplivom izmenične sile $F_0 \sin \omega t$ se merijo s pomočjo vzdolžno zalepljenega merilnega traka (slika). Trak je potenciometriško vezan s stalnim uporom R_l . Izhodna napetost se meri s pomočjo izmeničnega voltmetra in se istočasno opazuje na osciloskopu.

a) Izračunaj optimalne vrednosti R_l in E .

b) Če sta kot edini izvor termičnega šuma merilni trak in upor R_l , izračunaj najmanjšo amplitudo sile, ki se lahko še meri.

c) Izračunaj približno dolžino najkrajšega mehanskega sunka, ki se še lahko meri na osciloskopu.

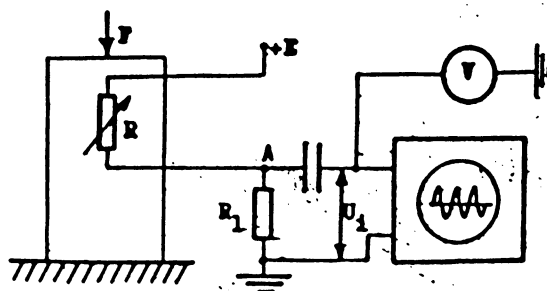
Ostali podatki:

merilni trak - upornost $R_0 = 600 \Omega$, občutljivost $k = 2$, $I = 10 mA$,

dolžina $h = 3 cm$;

palica - $E_y = 2.1 \times 10^5 N/mm^2$, presek $S = 10 cm^2$, hitrost zvoka v jeklu

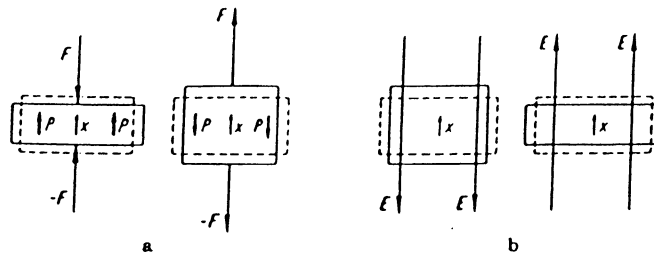
$c = 5100 m/s$. Širina prepustnega pasu voltmetra $\Delta f = 1 MHz$. Naprava obratuje pri sobni temperaturi.



Piezoelektrični efekt

1. Osnove

Piezoelektrični (PZE) efekt se pojavlja pri nekaterih trdnih telesih in predstavlja obliko pretvorbe mehanske energije v električno in obratno. Če tak material mehansko obremenimo s silo F , se na njegovi površini nabere določena količina naboja. Material se električno polarizira (slika 1a), pri čemer je P električna polarizacija. To je tzv. direktni PZE efekt. Obstaja tudi inverzni PZE efekt pri katerem se material mehansko deformira, če nanj priključimo električno polje E oz. naelektrimo njegovo površino z določenim nabojem (slika 1b). Na sliki 1 pomeni x smer reza kvarčnega kristala. PZE efekt sta odkrila l. 1880 brata Curie, ko sta raziskovala lastnosti kvarca.



Slika 1: Shematski prikaz PZE efekta v kvarčni ploščici; a) direktni efekt, b) obratni (inverzni) efekt

Direktni in obratni efekt sta popolnoma recipročna. Pri tem velja 'pravilo predznaka' nastale polarizacije P , ki pravi: Polarizacija nastala z direktnim efektom ima tako smer, da, zaradi obratnega efekta, sekundarno nastale mehanske deformacije delujejo proti primarnim deformacijam nastalih sled direktnega efekta. Prav tako velja tudi obratno: Z obratnim efektom povzročene deformacije ustvarijo, zaradi direktnega efekta, sekundarno polarizacijo, ki nasprotuje primarnemu električnemu polju.

PZE se pojavlja v:

a) naravnih in sintetičnih kristalih;

Med naravne materiale sodi kvarc (važen naraven material za dinamična merjenja), Segnetova oz. Rochellova sol ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ter turmalin ('lapis electricum', kemijsko Al-borosilikat). Med umetne kristale sodi tz. ADP.

b) polarizirani sintetični keramiki;

Najvažnejši materiali so BaTiO_3 in trdne raztopine $m \text{PbZrO}_3 + n \text{PbTiO}_3$ s polikristalno strukturo, ki se proizvajajo kot keramika s sintranjem (keramika PZT 55/45 npr. se uporablja za užiganje plina kuhinjskih štedilnikov).

Po svojih lastnostih te snovi spadajo med feroelektrike. Svoje PZE lastnosti dobijo v postopku polarizacije v močnem električnem polju v času hlajenja s temperatur višjih od Curie-jeve. Odlikujejo se po velikih vrednostih za tz. PZE koeficiente (velika občutljivost) in visoke T_c (za visoke delovne temperature).

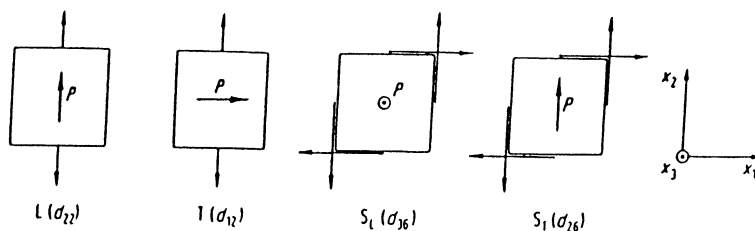
c) polimernih slojih.

Uporaba:

- direktni PZE efekt (rezonačna nihanja PZE elementov nezaželjena);
 - PZE merilna tehnika (sila, tlak, pospešek, pomiki, vibracije).
- recipročni PZE efekt (PZE elementi največkrat nihajo z lastno frekvenco);
 - generatorji ultrazvoka;
 - komunikacije (frekvenčna stabilizacija; frekvenčne in časovne normale, kvarčne ure)
 - mikropozicioniranje;
 - črpalke za ink jet printerje.

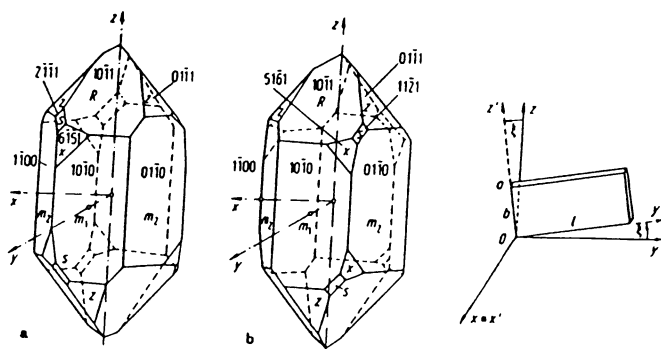
Na sliki 1 je prikazan samo tzv. longitudinalni (L) PZE efekt pri katerem se polarizacija pojavi v isti smeri kot sila, ki povzroča deformacijo. V splošnem razlikujemo 4 vrste; longitudinalni

(L), transversalni (T), strižno-longitudinalni (S_L) in strižno-transverzalni (S_T) PZE efekt, odvisno od smeri obremenitve in načina rezanja PZE ploščice iz kristala (slika 2).



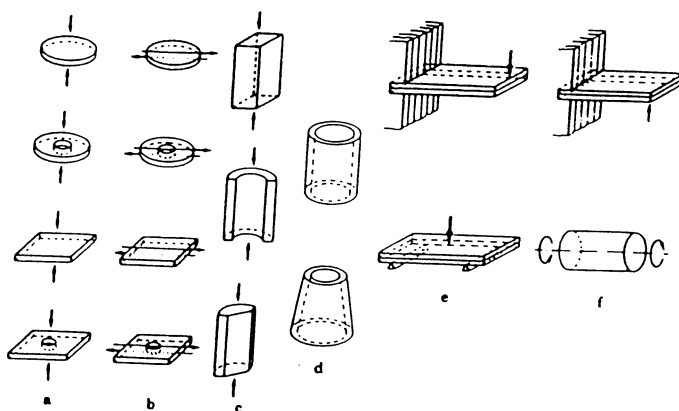
Slika 2: Štiri primeri (L, T, S_L in S_T) direktnega PZE efekta

PZE materiali so sicer električni izolatorji. Za senzorje in pretvornike se proizvajajo v obliki kondenzatorjev, večinoma ploščatih (disk ali ploščica), ki se izrežejo iz monokristala (trigonalna kristalna struktura) ali, v primeru keramike, sintrajo v določene oblike (slika 3).



Slika 3: Kristalna struktura α -kvarca s kartezijskimi koordinatami; a) l-kvarc, b) d-kvarc, c) element orientacije $XY\xi$

Za posebne namene obstojajo tudi druge oblike (slika 4).



Slika 4: Oblike komercialnih PZE elementov; a) ploščata (za L), b) ploščata (za S), c) paličasta (za T), d) votli valj ali stožec (samo iz keramike, za L ali S), e) bimorfni elementi kot konzola (za T), c) torzijsko občutljivi elementi (za S)

Pod vplivom mehanske sile, ki deformira pretvornik, se na njegovih ploščicah pojavi naboj po količini sorazmeren deformaciji oz. sili. PZE pretvorniki se odlikujejo po veliki občutljivosti

in majhnih dimenzijah, kar omogoča konstruiranje kompaktnih in robustnih pretvornikov z visoko lastno frekvenco $f_L > 10$ kHz. Po drugi strani pa je njihova notranja impedanca zelo visoka. Zato se za merjenje lahko koristijo samo instrumenti z visoko vhodno impedanco. Pri statični deformaciji se inducira določena količina naboja, ki se relativno hitro izprazni preko lastne prevodnosti ali preko priključnih kablov in vhodne upornosti indikatorja. Zaradi tega PZE pretvorniki ne generirajo signala pod učinkom stacionarne vhodne veličine.

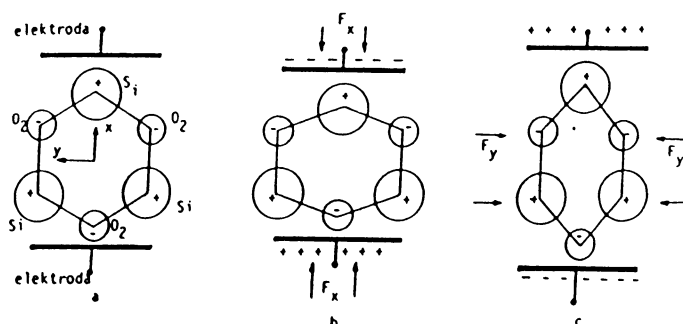
PZE pretvorniki se v praksi kombinirajo z elastičnimi ali seizmičnimi elementi in se prvenstveno uporabljajo za merjenje:

- pospeškov in vibracij (npr. na strojih, ladjah);
- dinamičnega tlaka;
 - merjenje in registriranje hitro menjajočih se sprememb tlakov v zgorevalnem prostoru motorjev (tudi kompresorjev);
 - merjenje sprememb tlaka v orožju (notranja balistika);
 - merjenje udarnega tlaka v ceveh (hidrocentrale);
 - spremembe tlaka v sistemu za vbrizgavanje goriva pri dizelskem motorju;
- merjenje spremenljivih sil (rezalnih sil na nožih, sil pod vijaki).

Območja temperatur uporabnosti:

BaTiO₃, keramični materiali do $T \cong 250$ °C ($< T_c$); (nad T_c material izgubi svoje PZE lastnosti).
 kvarc do 200 °C ($T_c=576$ °C je sicer znatno višja, vendar pa se njegove dielektrične lastnosti znatno poslabšajo nad navedeno T).

PZE pojav pri deformaciji kvarca se lahko objasni s pomočjo poenostavljene sheme kristalne celice (slika 5) v z-preseku (gledano s smeri optične z-osi, slika 3). Kemijska formula kvarca je SiO₂, pri čemer so Si joni pozitivni, O₂ pa negativni. Joni so nameščeni na temenih heksagonalne celice (slika 5a). Elektrode, dobljene z metalizacijo površine kvarca, omogočajo kreiranje polja oz. odvajanje naboja (izhodne napetosti). Pri kvarčnih pretvornikih z longitudinalno pretvorbo se elektrode postavi pravokotno na smer x-osi. V nedeformiranem stanju so vsi naboji med seboj kompenzirani in zato je napetost na izhodu nič (slika 5a). Pri delovanju sile F_x (tlak) se na gornji ploščici pojavi višek nosilcev negativnega naboja, na spodnji strani pa pozitivnega (slika 5b). Če na isto celico deluje sila F_y (tlak) vzdolž y-osi, se na elektrodah pojavi enaka količina naboja, toda nasprotnega predznaka (slika 5c). Če sila deluje v smeri z-osi, ne pride do nastanka naboja, tj. občutljivost v z smeri je nič.



Slika 5: Razlaga PZE efekta s poenostavljeno shemo kristalne strukture kvarca; a) brez deformacije, b) z debelinsko (longitudinalno), c) z bočno (transverzalno) deformacijo.

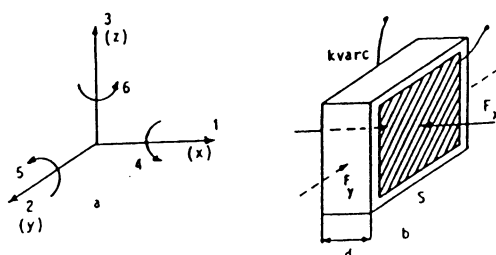
Opomba: Z modelom prikazanim na sliki 5 se lahko objasni tudi inverzni PZE efekt, to je nastanek deformacije, če se na njegove plošče dovede določena količina naboja.

PZE lastnosti materialov, ki so različne v posameznih smereh se opisujejo s tz. PZE koeficienti d_{ij} definiranimi s sledečim izrazom:

$$d_{ij} = \frac{\text{količina naboja v smeri } i}{\text{sila v smeri } j} = \frac{Q}{F} \quad \left(\begin{matrix} \text{C} \\ \text{N} \end{matrix} \right)$$

(C = Coulomb \equiv 1 As)

Indeksi i imajo vrednosti (1, 2, 3), kar ustreza sili (deformaciji) vzdolž x, y in z osi, medtem ko indeksi (4, 5, 6) predstavljajo torzijske momente vzdolž istih osi (slika 6a).



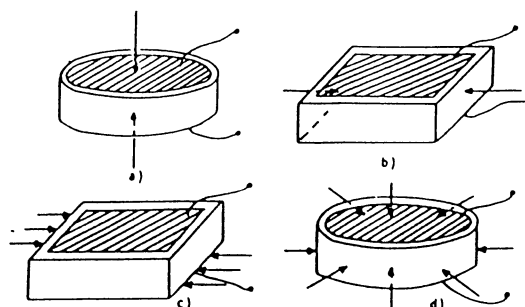
Slika 6: a) Označevanje d_{ij} koeficientov PZE pretvornikov, b) primer L-deformacije, ki jo opisuje koeficient d_{11} .

Za merjenje mehanskih veličin se največ uporablja L-deformacija vis-a-vis katere ima pretvornik največjo mehansko trdnost. Kvarčni kristali, ki delujejo na ta način, se režejo \perp na os x (slika 6b). Če ima tak pretvornik površino A in debelino d, velja:

$$\frac{Q}{F} = d_{11} = \frac{UC}{F} = \frac{U \epsilon_0 \epsilon_r A}{Fd} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{E}{F}$$

kjer so: ϵ_0 = influenčna konstanta ($= 8.85 \times 10^{-12}$ As/Vm), ϵ_r = dielektričnost in E = jakost električnega polja. Vrednost d_{11} za kvarc je 2.30 pC/N.

Na sliki 7 je prikazanih nekaj dodatnih načinov deformacije PZE pretvornikov. Najvažnejši primer je L- (longitudinalna, sliki 6b in 7a) deformacija, ko je sila \perp na površino elektrod na katerih se pojavi izhodni signal. Poleg teh obstajajo še PZE elementi za T- (transverzalne, slika 7b), S- (striže, slika 7c) in volumnske- (slika 7d) deformacije.



Slika 7: Načini deformacije PZE pretvornikov; a) L-, b) T-, c) S- in d) volumnska-deformacija

Za proizvodnjo PZE pretvornikov se največkrat uporabljajo sintetični kristali. Slaba stran kvarca je majhna lastna kapacitivnost C_0 in s tem v zvezi občutljivost izhodne napetosti od kapacitivnosti priključkov. Zaradi visoke mehanske trdnosti in visokih lastnih frekvenc se kvarčni pretvorniki uporabljajo za merjenje kratkotrajnih sprememb tlaka, ki nastanejo npr. ob eksplozijah. Po drugi strani se kvarc ne more uporabljati za merjenje strižnih deformacij in hidrostatičnega tlaka (ustrezni d_{ij} koeficienti imajo vrednost 0).

Po uporabi najvažnejši sintetični material je $BaTiO_3$. Os za debelinsko deformacijo teh kristalov se označuje z indeksom 3 (vzdolž katere se izvede polarizacija). Tipične vrednosti d_{ij} koeficientov za $BaTiO_3$ so:

$$d_{33} = 190, \quad d_{31} = d_{32} = -80, \quad d_{15} = 250 \quad (\text{v pC/N}),$$

Vzdolž ostalih dveh osi 1 in 2 ima $BaTiO_3$ enake PZE lastnosti. Značilno za $BaTiO_3$ (in ne za kvarc) je, da se lahko uporablja tudi za merjenje strižnih deformacij in hidrostatičnega tlaka (volumskih deformacij). Ustrezni koeficient znaša:

$$d_h = d_{33} + d_{31} + d_{32} = 34 \text{ pC/N}.$$

$BaTiO_3$ ima veliko občutljivost (faktor 10 v primerjavi s kvarcem) in veliko vrednost ϵ_r , ki znaša nekaj sto. Zaradi visoke lastne kapacitivnosti, izhodni signal ni veliko odvisen od kapacitivnosti priključnih kablov in merilnega instrumenta. Med ostale prednosti spada tudi visoka delovna temperatura in majhne dielektrične izgube pri teh temperaturah. Dobra stran je tudi dejstvo, da se ti pretvorniki lahko proizvajajo v različnih oblikah in dimenzijah. Slaba stran je, da se s časom polarizacija postopno zmanjšuje, podobno kot se zmanjšuje 'namagnetnost' pri permanentnih magnetih. Zaradi tega se morajo keramični pretvorniki ponovno polarizirati, še posebej, če so se uporabljali pri višjih temperaturah.

Medtem ko v šoli dobimo relativno dober občutek za napetost in tok, si je naboj veliko težje predstavljati. V spodnji tabeli je zbranih nekaj primerov o velikostnem razredu električnega naboja.

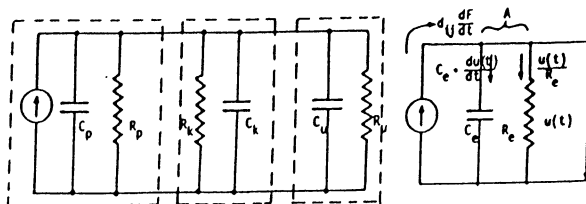
Tabela: Primerjave električnega naboja

elementarni naboj (naboj elektrona ali protona)	0.000 000 000 000 000 000 16 C	$Q = 0.16 \text{ aC}$
minimalen naboj, ki se ga da še meriti z sodobnimi nabojnimi ojačevalci	0.000 000 000 000 01 C	$Q = 10 \text{ fC}$
naboj, ki se nabere na kvarčnem senzorju pri obremenitvi 10 N	0.000 000 000 023 C	$Q = 23 \text{ pC}$
naboj, ki se nabere na kvarčnem senzorju pri obremenitvi 100 T	0.000 002 3 C	$Q = 23 \text{ } \mu\text{C}$
naboj pri lažjem električnem preboju	0.001 C	$Q = 1 \text{ mC}$
naboj pri blisku 'fleša'	20 C	$Q = 20 \text{ C}$
naboj 'shranjen' v majhni žepni bateriji	200 C	$Q = 200 \text{ C}$
naboj 'shranjen' v akumulatorju avtomobila	200 000 C	$Q = 200 000 \text{ C}$

Pri vseh PZE materialih se pojavlja tudi tz. piroelektrični (PRE) efekt. Pri tem efektu se pojavi naboj (oz. napetost), če se pretvornik izpostavi hitrim temperaturnim spremembam. PRE efekt povzroča motnje pri merjenjih s PZE pretvorniki, če se temperatura okolice hitro spreminja. Po drugi strani se PRE materiali uporabljajo za detektorje zelo hitrih temperaturnih sprememb (npr. javjalci požarov).

1.1 Analiza vezja s PZE pretvorniki v področju nizkih frekvenc

Ekvivalentna shema PZE pretvornika s priključenim instrumentom za merjenje napetosti je prikazana na sliki 8a. Ta shema velja pri predpostavki, da je frekvenca deformacije f , ki se meri, znatno nižja od lastne frekvence f_L ($f < 0.2 f_L$).



Slika 8: a) Električna shema PZE pretvornika, b) ekvivalentna shema

C_p = lastna kapacitivnost senzorja R_p = odvodna upornost senzorja
 C_k = kapacitivnost priključnih kablov R_k = upornost kablov
 C_u = kapacitivnost instrumenta R_u = vhodna upornost instrumenta

Pretvornik se lahko smatra kot generator naboja $Q = d_{ij} F$, oziroma generator toka

$$i = d_{ij} \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

Na sliki 8b sta $C_e (= C_p + C_k + C_u)$ in $R_e (1/R_e = 1/R_p + 1/R_k + 1/R_u)$ ustrezno, ekvivalentna (nadomestna, celotna) kapacitivnost in ekvivalentna upornost. S preprostim izračunom za občutljivost pretvornika dobimo:

$$S = \frac{d_{ij}}{C_e} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1+(\omega \tau)^2}} = S_0 \frac{\omega \tau}{\sqrt{1+(\omega \tau)^2}} \quad (\text{v V/N}), \quad (2)$$

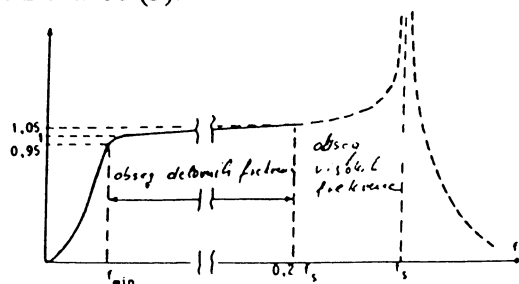
kjer je $\tau = R_e C_e$ časovna konstanta vezja. Če je $(\omega \tau)^2 \gg 1$, je amplitudna karakteristika ravna. Občutljivost v tem 'delovnem režimu' je

$$S_{\text{del}} \cong S_0 = \frac{d_{ij}}{C_e}$$

Občutljivost je torej obratno sorazmerna celotni kapacitivnosti pretvornika in vezja na katerega je priključen. Če enačbo (2) delimo s S_0 , dobimo amplitudno karakteristiko v brezdimenzionalni obliki;

$$\frac{S}{S_0} = \frac{\omega \tau}{\sqrt{1+(\omega \tau)^2}} \quad (3)$$

Amplitudna karakteristika je prikazana na sliki 9 (polna črta). Področje visokih frekvenc (črtkano) se ne popisuje z enačbo (3).



Slika 9: Amplitudna karakteristika PZE pretvornika za merjenje mehanskih veličin

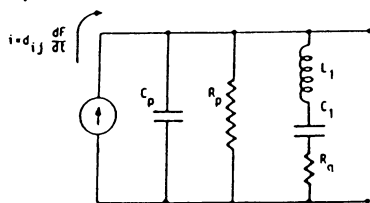
Iz slike 9 je razvidno, da je pri $\omega = 0$ ustrežna amplituda enaka nič, kar pomeni, da PZE pretvorniki ne morejo meriti statičnih in počasi spremenljivih mehanskih veličin. Spodnjo mejno frekvenco se dobi iz pogoja

$$\frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = 0.95,$$

od koder sledi $f_{\min} = 0.434/\tau$. V obsegu frekvenc ($0 - f_{\min}$), pretvornika ne moremo koristiti za merjenja. Zato, da bila frekvenca f_{\min} čim nižja, je potrebno povečati časovno konstanto τ . To se najugodneje naredi tako, da se izbere čim večji R_c , tj. z uporabo visoko-omskega instrumenta in priključnih kablov z dobrimi izolacijskimi lastnostmi. Povečanje τ s povečanjem C_c ni primerno, ker se s tem zmanjša občutljivost pretvornika.

1.2 Analiza vezja s PZ pretvorniki v področju visokih frekvenc

Enačba (3) popisuje občutljivost pretvornika samo v področju relativno nizkih frekvenc. PZE pretvornik v področju visokih frekvenc se obnaša kot sistem II reda z majhnim koeficientom dušenja ($\xi \ll 1$). Ustrežna ekvivalentna shema vezja je prikazana na sliki 10.



Slika 10: Ekvivalentna shema PZE pretvornika v področju visokih frekvenc

Poleg tokovnega generatorja i , statične kapacitivnosti C_p in odvodne upornosti R_p , ki nastopajo v ekvivalentni shemi za nizke frekvence, nastopajo tu novi elementi L_1 , C_1 in R_g . Induktivnost L_1 upošteva inercijske lastnosti pretvornika, C_1 elastične lastnosti in R_g izgube izvirajoče iz nastanka toplote pri mehanskih nihanjih. V bližini lastne frekvence f_L in v primeru $\xi \ll 1$ je amplitudna karakteristika

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_s)^2}.$$

Če je največja dovoljena napaka pri visokih frekvencah 5 %, se gornja mejna frekvenca f_{\max} določa z enačbo

$$\frac{1}{1 - (\omega / \omega_s)^2} = 1.05,$$

odkoder se dobimo $f_{\max} = 0.22 \times f_L$.

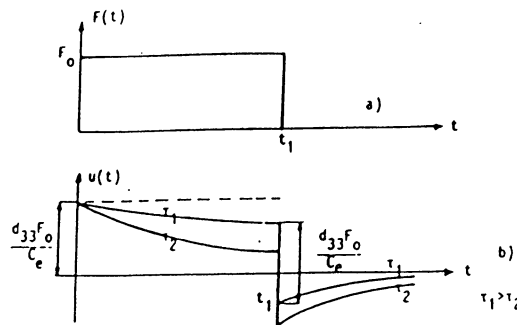
Za PZE pretvornik na sliki 7a lahko lastno frekvenco določimo na naslednji približen način, če predpostavimo, da deluje kot polvalovni rezonator. Če je debelina pretvornika d , valovna dolžina znaša $\lambda = 2d$. Hitrost razširjanja zvoka $c = \sqrt{E_y/\rho}$. Lastna frekvenca je

$$f_L = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}$$

E = elastični modul, ρ = gostota

1.3 Odziv PZE pretvornika na sunke

Tipičen primer dinamičnega merjenja je delovanje sile v obliki pravokotnega sunka amplitude F_0 in trajanja t_1 (slika 11a).



Slika 11: a) Sila v obliki pravokotnega sunka, b) odziv PZE pretvornikov za dve vrednosti časovnih konstant

V trenutku $t = 0^+$ se pojavi, zaradi sile F_0 , napetost

$$u(0^+) = \frac{d_{33} F_0}{C_e} \quad (4)$$

Z ozirom, da je sila v intervalu $0 < t < t_1$ konstantna, $F(t) = F_0$, je potek napetosti

$$u(t) = u(0^+) e^{-t/\tau} \quad (0 < t < t_1) \quad (5)$$

V trenutku t_1^+ izhodna napetost trenutno pade za vrednost (4) in znaša

$$u(t_1) = -u(0^+) (1 - e^{-t_1/\tau})$$

Ker je $F(t) = 0$ za $t > t_1$, je enačba za izhodno napetost

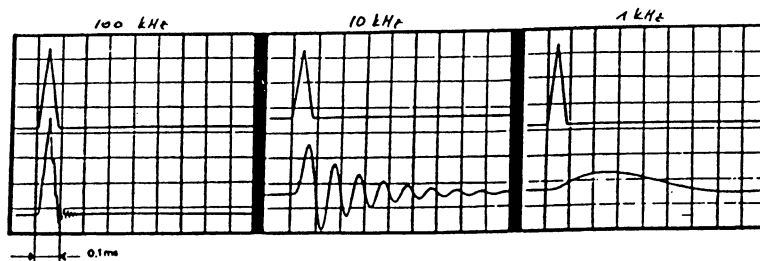
$$u(t) = -u(0^+) (1 - e^{-t_1/\tau}) e^{-(t-t_1)/\tau} \quad (t > t_1)$$

Diagram za dve vrednosti časovnih konstant τ_1 in τ_2 ($\tau_1 > \tau_2$) je prikazan na sliki 11b. Iz diagrama je razvidno, da je izobličenje izhodnega signala tem manjše čim večja je časovna konstanta pretvornika.

Za merjenje hitro spremenljivih pojavov potrebujemo merilne sisteme, ki so v stanju slediti hitrim spremembam merjene količine. Pod 'hitrimi spremembami' v PZE merilni tehniki razumemo dvižne čase v območju do $1 \mu s$. Ko merilni sistem ni več sposoben slediti pojavu,

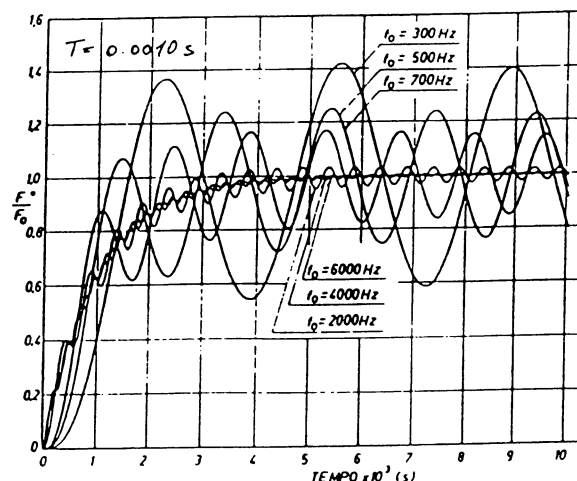
potem le-ta ne meri več pojavn ampak, v večini primerov, zgolj dinamične lastnosti merilnega sistema. Dinamično obnašanje PZE senzorjev je nazorno prikazano s primerom na sliki 12. Slika kaže odziv treh merilcev z različnimi f_L na kratek (80 μ s) tlačni sunek v hidravličnem sistemu. Iz teh diagramov sledi:

1. Če je lastna frekvenca f_L sistema 100 kHz, se tlačna konica reproducira (slika 12a). Iznihavanje ustreza lastni frekvenci.
2. Če je $f_L = 10$ kHz, ima prva pozitivna polovica signala približno obliko merjenega tlačnega sunka (slika 12b). Preostali del je iznihavanje merilnega sistema.
3. Če je $f_L = 1$ kHz, sistem oscilira z lastno frekvenco (slika 12c). Tlačna konica se sploh ne da izmeriti. Merimo lastnosti merilnega sistema ne pa signala merjenca.



Slika 12: Odziv PZE tlačnega merilca na kratek sunek v odvisnosti od lastne frekvence merilnega sistema

Na sliki 13 je prikazan odziv senzorjev različnih f_L na sunek sile, ki linearno narašča do končne vrednosti z dvižnim časom $\tau = 1$ ms. Iz diagrama je razvidno, da se za verno reprodukcijo oblike vhodnega sunka zahteva $f_L \approx 4$ kHz.



Slika 13: Odziv senzorjev z različnimi f_L frekvencami na sunek sile z dvižnim časom $\tau = 1$ ms

1.4 Temperaturni efekti

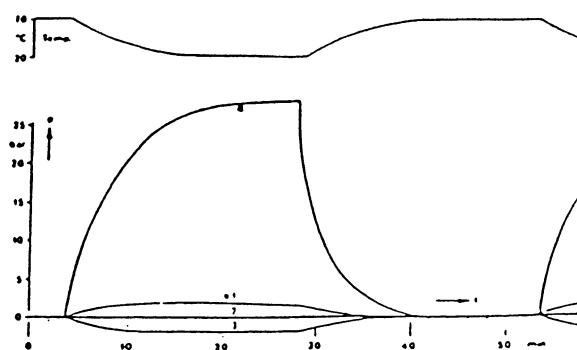
Razlikovati moramo med počasnimi in hitrimi temperaturnimi efekti kakor tudi med temperaturnimi efekti v kvarčnem tlačnem senzorju in v visoko-izolacijskem priključnem kablu.

1. Konstantna temperatura

Nivo temperature določa izbiro tipa senzorja in tipa priključnega kabla. Če se upor izolacije pri neki visoki, konstantni obratovalni temperaturi ne zniža znatno, merjenja v teh pogojih ne predstavljajo težav. Skrbna izbira materialov zadostuje, da se kompenzira različne razteznostne koeficiente.

2. Počasna nihanja temperature:

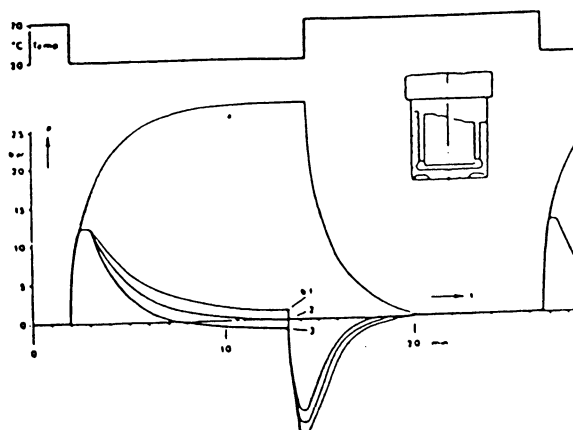
Na sliki 14 je shematično prikazan potek počasnih temperaturnih nihanj (počasnih v primerjavi s termičnimi časovnimi konstantami, tj. posamezni deli senzorja sledijo spremembam obratovalne temperature) in odziv različno 'kompenziranih' senzorjev. Iz slike 14 je razvidno, da T-kompensacija pri kvarčnem senzorju v polnosti deluje.



Slika 14: Odziv različno kompenziranih senzorjev na počasne spremembe obratovalne temperature: 1) nekompenziran, 2) premalo- , 3) idealno- , 4) preveč-kompenziran

3. Hitra nihanja temperature:

Vpliv hitrih T-sprememb se najbolje prikaže s primerom temperaturnega preskoka, npr. da senzor potunkamo najprej v hladno, nato pa v toplo oljno kopel in obratno (slika 15 zgoraj).

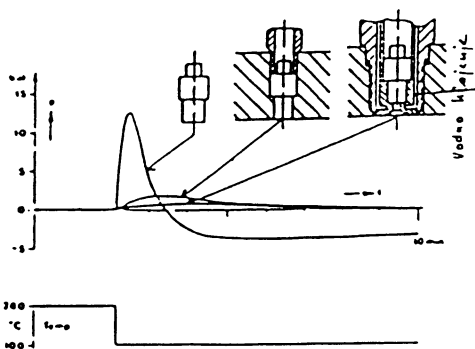


Slika 15: Odziv različno kompenziranih senzorjev na nenadne spremembe obratovalne temperature: 1) nekompenziran, 2) premalo- , 3) idealno- , 4) preveč-kompenziran

V primeru 1) senzor 'oddaja' signal, katerega velikost je odvisna prestopa toplote med oljem in senzorjem in toplotnih časovnih konstant senzorja. Signal nima zveze z merjenim tlakom in predstavlja sistematsko napako, ki se jo s konstrukcijskimi rešitvami lahko močno reducira. Na začetku (v prvih sekundah) po temperaturnem skoku se T-kompenzirani senzor obnaša kot nekompenzirani (primeri 2, 3, 4 na sliki 15). Šele potem, ko se kompenzacijski elementi segrejejo, prične delovati T-kompenzacija, ki napako zmanjša. Senzor je lahko premalo, idealno ali preveč kompenziran.

Navedeno 'obnašanje' postane jasno, če pogledamo prerez senzorja za merjenje tlaka (slika 15, desno zgoraj). Segrevanje (oz. hlajenje) poteka najprej v ohišju. To se razteza, prednapetost membrane 'popusti' in s tem se kvarčni element 'razbremeni'. (Pri hlajenju je potek ravno obraten, tj. element se dodatno obremeni.) Zatem se prične segrevati tudi napenjalna puša, ki element 'drži'. Pri tem se raztegne in obremeni element. Šele tedaj, ko kvarc in kompenzacijski elementi dosežejo novo temperaturo, bo temperaturna porazdelitev znotraj senzorja enakomerna in s tem kompenzacija popolna.

Temperaturne efekte na sliki 15 se ne da kompenzirati, če obstojajo omejitve pri izbiri materialov. Vplive dinamične komponente obratovalne temperature lahko reduciramo (ali izključimo) le s toplotno izolacijo. Uspeh teh 'vgradbenih' mer je prikazan na sliki 16. V primeru 16b je senzor vpet v večjo maso (povečamo termične konstante ohišja, s čemer preprečimo ali znižamo porast temperature notranjih sestavnih delov senzorja). V primeru 16c je senzor hlajen z vodo.



Slika 16: Primer odziva PZE senzorja tlaka na hitre temperaturne spremembe v odvisnosti od načina vgraditve: 1) nezadostno kompenziran, 2) vgrajen v večjo maso, 3) vodno hlajen

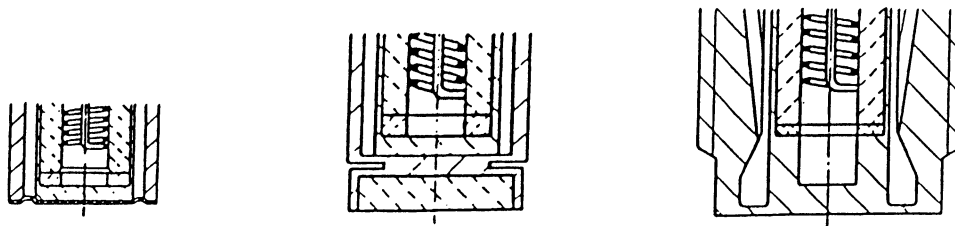
4. Prehodni temperaturni pojavi (šoki)

Prehodni temperaturni pojavi (šoki) nastanejo zaradi eksplozij in so običajni pri merjenju tlaka v motorjih z notranjim izgorevanjem. Ti so tako kratki, da se jih z opisanimi načini ne more ločiti od drugih efektov. Zadostuje že šibko sevanje (npr. svetlobni blisk), da segrejemo površino membrane in s tem majhne lokalne raztezke membrane, sled katerih nastane sila, ki je vzrok t.z. napaki zaradi temperaturnega šoka.

5. Konstrukcije membran

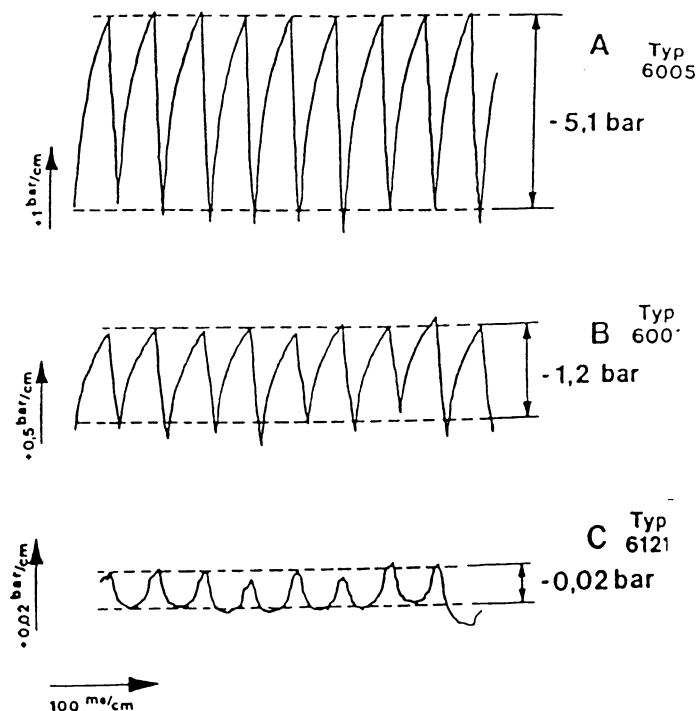
Membrana ima zelo važen vpliv na lastnosti PZE senzorjev. Odgovorna je za linearnost, histerezo, občutljivost in njeno stabilnost v času življenjske dobe senzorja, za napako pri meritvah v prisotnosti hitrih temperaturnih sprememb in za merilne napake zaradi zогlenitve v vmesnem montažnem prostoru.

V primeru uporabe pri motorjih z notranjim izgorevanjem v glavne razlikujemo 3 vrste membran (slika 17): membrana iz tanke pločevine (običajna, slika 17a), postružene (brez ali s toplotno zaščito, slika 17b) in membrane z dvema prstanoma (slika 17c).



Slika 17: Izvedbe membran za merilce tlaka pri motorjih z notranjim izgorevanjem: a) iz tanke pločevine, b) postružena, c) z dvema prstanoma

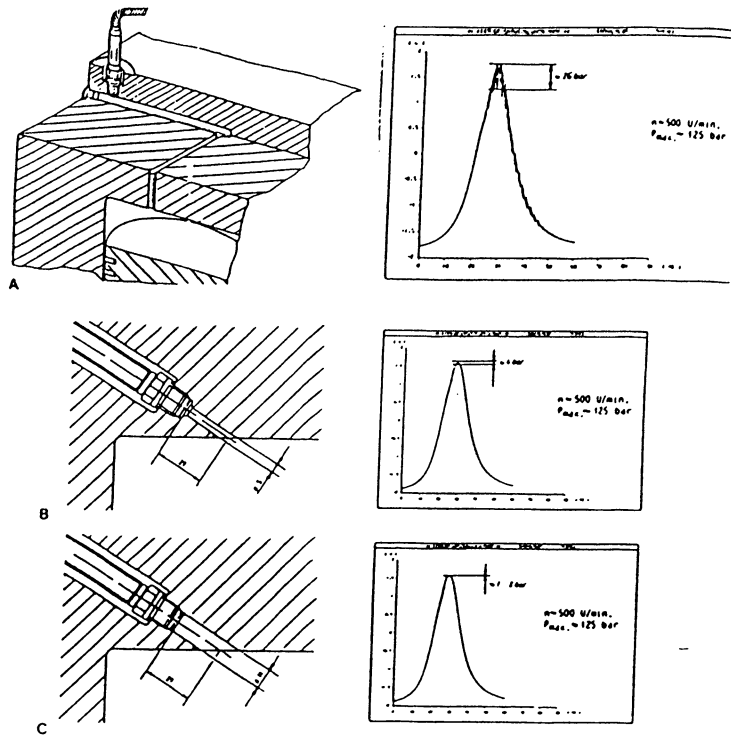
Postružene membrane omogočajo daljšo uporabo (življenski čas) v neprijaznem okolju kot pa membrane iz tanke pločevine. Na sliki 18 so prikazane napake zaradi temperaturnih šokov za tri konstrukcijsko različne membrane na primeru merjenja indiciranega tlaka.



Slika 18: Napaka zaradi temperaturnih šokov za tri konstrukcijsko različne membrane:
1-senzor z membrano iz tanke pločevine; 2-postružena membrana in nezadostno kompenzacijo za temperaturni šok, 3-postružena membrana z dodatno toplotno zaščito.

6. Primer vgradnje

Slika 19a kaže tlačni senzor 7013 (Kistler) uvit v odprtino za merjenje indicirnega tlaka velikega dizel motorja. Dolgi vezni kanal do izgorevalne komore povzroča tlačna nihanja, t.z. 'efekt piščali', ki popači rezultat merjenja. Slika 19b kaže isti senzor montiran bliže komore. Kratek, toda ozek vezni kanal še vedno povzroča imenovani efekt, sicer precej reduciran. Slika 19c kaže idealno vgrajen (isti) senzor: kratek, širok vezni kanal in postrani vgrajen senzor, ki ščiti membrano pred direktnim vplivom vročih izgorevalnih plinov.



Slika 19: Vpliv vgradnje tlačnega senzorja za merjenje indicirnega tlaka velikega dizel motorja

2. PZE tipala za dinamična merjenja

2.1 PZE tipala za dinamična merjenja tlaka

Zaradi delovanja tlaka p na PZE ploščico se na njeni površini A nabere naboj

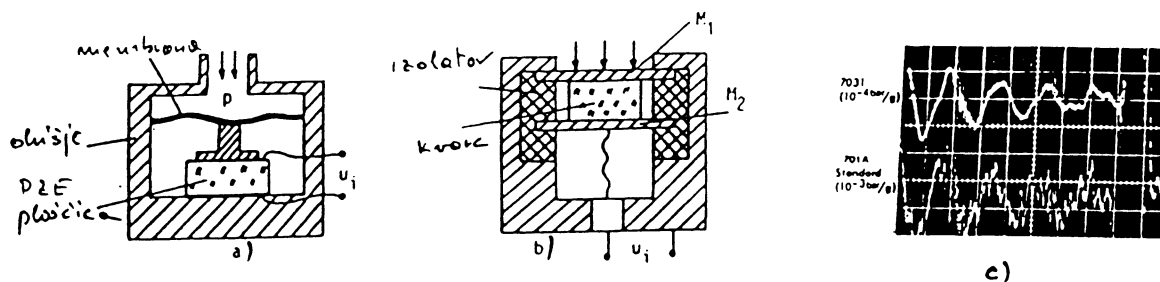
$$Q = d_{11} F = d_{11} p A .$$

Inducirana količina naboja je torej direktno sorazmerna tlaku in površini. Izhodna napetost senzorja u_i pri trenutni spremembi tlaka amplitude p je:

$$u_i = \frac{Q}{C} = d_{11} \frac{d p}{\epsilon_0 \epsilon} = S p ,$$

kjer je S občutljivost senzorja, ki je odvisna od velikosti PZE koeficienta d_{11} , debeline ploščice d in dielektrične konstante ϵ ploščice.

Navedeni zaključek principa delovanja za praktične PZE senzorje ni direktno uporabljiv. Namreč pri teh tlak praviloma ne deluje direktno na PZE ploščico, ampak posredno preko kovinske membrane (slika 1). Kovinska membrana predstavlja zaščito PZE elementa (mehansko in pred vplivom agresivnih fluidov). Dejanski tlak, ki mu je senzorski element 'podvržen' zavisi torej tudi od vzmetne konstante (togosti) membrane in konstrukcijskih faktorjev. S primerno izbiro membrane in PZE elementa ti senzorji zajamejo merilni obseg tlakov od blizu atmosferskega pa do 10 kbar.



Slika 1: a) Principielna shema PZE senzorja za tlak, b) način za kompenzacijo vpliva pospeškov, c) primerjava izhodnega signala kompenziranega in nekompenziranega tipala

Pri merjenju tlaka s PZE senzorji v pogojih velikih vibracij se postavlja problem občutljivosti na pospeške. Pri pospešenem gibanju membrana in drugi elementi v kontaktu s PZE ploščico delujejo nanjo z določeno silo, ki predstavlja izvor motnje merjenemu signalu (npr. merjenje tlaka v izpušni cevi). V teh situacijah se motnje v veliki meri da odpraviti s konstrukcijskimi rešitvami od katerih je ena prikazana na sliki 1b. PZE ploščica na tej sliki je prednapeta med dvema enakima membranama M_1 in M_2 . Na M_1 deluje zunanji (merjeni) tlak p , M_2 pa služi za kompenzacijo vpliva vibracij. Na sliki 1c je prikazana primerjava izhodnega signala kompenziranega (Kistler 7031) in nekompenziranega (Kistler 701A) zaradi vpliva pospeška (merjenje tlaka izpušnih plinov na istem mestu v močno vibrirajoči se izpušni cevi).

Dobre lastnosti PZE senzorjev za merjenje tlaka so:

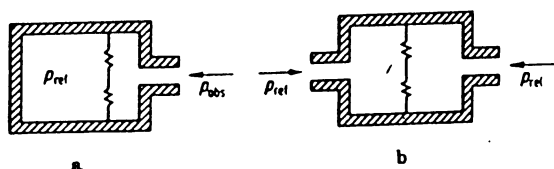
- majhne dimenzije

- visoka lastna frekvenca (do 200 kHz), kar omogoča dinamična merjenja pri sunkovnih spremembah tlaka (motorji z notranjim izgorevanjem, udarni valovi v plinih, eksplozije).

PZE materiali: kvarc, BaTiO₃, keramika.

Po svoji konstrukciji so PZE tipala za tlak podobni tistim za merjenje pospeška in sile, analiza dinamičnih karakteristik pa enaka. Kalibrira se jih s pomočjo manometra na bat.

Pri merilcih tlaka običajno ločimo dve vrsti tipal, absolutne in diferenčne (slika 2). Absolutni tlak p_{abs} se vedno nanaša na tlak 0, to pomeni, da kot referenčni tlak p_{ref} služi vakum (npr. barometer). Pri diferenčnih merilcih se tlak ne meri glede na vakum, ampak na referenčni tlak p_{ref} , za katerega ni nujno, da je konstanten. Če kot referenčni tlak služi tlak okolice (npr. tlačne posode), govorimo o relativnih merilcih tlaka. V vseh drugih primerih, kjer se meri tlačna razlika med dvema poljubnima tlakoma, uporabljamo diferenčne merilce tlaka (npr. šobe, zaslonke pri pretoku). V vseh teh uporabniških primerih se predpostavlja, da ti merilci lahko merijo tudi statični tlak. S PZE tipali ne moremo meriti statičnega tlaka. Lahko se meri le relativna kvazistatična in dinamična nihanja tlaka. Zato v tem primeru govorimo le o PZE tlačnih merilcih in pod diferenčnim merilcem razumemo konstrukcijo z dvema tlačnima priključkoma primerno za dinamične in kvazistatične diferenčne meritve.



Slika 2: Absolutno in relativno tlačno tipalo

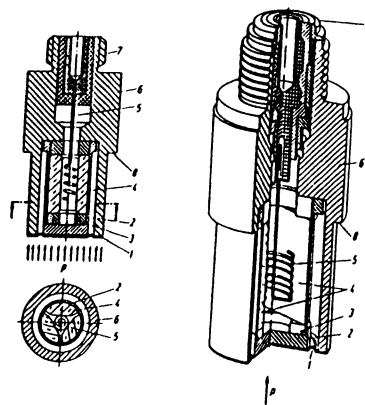
Po merilnem obsegu PZE tipala delimo na:

- nizekotlačne (do enega bara)
- za splošno uporabo (do nekaj sto barov)
- visokotlačne (čez 1 kbar)

2.1.1 Zgradba PZE tipala za tlak

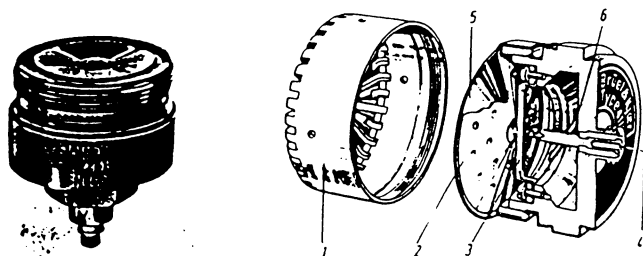
Slika 3 kaže konstrukcijo komercialnega PZE tipala za merjenje tlaka osnovanem na transversalnem (T) efektu. PZE element (4) ima obliko votlega valja. Tlak p se pretvori preko membrane (1) v silo, ki pritiska na čelno ploskev napenjalne puše (2). Sila se prenese preko vložkov (3) na čelno ploskev PZE elementa (sila vzdolž osi valja). Polarizacija (naboj) se pojavi na stenah plašča, pravokotno osi senzorskega elementa. PZE element in vložki (3) so prednapeti s pomočjo puše (2). Membrana (1) je neprodušno zavarjena na ohišje tipala (6). Naboj se pojavi na neobremenjenem plašču elementa z metalizirano notranjo površino, ki ga spiralno oblikovana elektroda (5) posname in dovaja na izolirano vtičnico (7). Zunanji plašč PZE elementa ni metaliziran, ker se naboj prenese na ohišje (ki je drugi vodnik) kapacitativno. Vložki (3) služijo za enakomernjšo porazdelitev tlačne napetosti na čelnih ploskvah PZE elementa in za temperaturno kompenzacijo. Naslon (8) služi pri montaži za tesnenje v izvedbah z navojem na zunanjem plašču ohišja.

Slika 3: Shema komercialnega tlačnega PZE tipala (T efekt)



2.1.2 Nizkotlačna PZE tipala

Za nizkotlačna PZE tipala se zahteva velika občutljivost. To se doseže z uporabo kvarca s T-efektom ali z PZE keramiko ter veliko delovno površino. Na sliki 4a je prikazano nizkotlačno tipalo za obseg (0 do 10) bar_{abs}, ki reagira že približno pri 10 μbar. Premer membrane je 30 mm, lastna frekvenca pa 13 kHz. Take karakteristike zadostujejo za večino nizkotlačnih meritev v tehniki. Za mikrofone pa je potrebna še večja občutljivost in tem širše frekvenčno območje. Na sliki 4b je prikazan mikrofoni (Bruel&Kjaer) s tlačnim elementom v obliki upogibne konzole, ki se sestoji iz dveh slojev PbZrTiO₃ (T-efekt). Pri upogibu se en sloj raztegne drugi pa stlači. Ker sta vezana paralelno, se občutljivost dodatno poveča tako, da tak mikrofoni reagira že pri 1 μbar. Frekvenčno območje (znotraj ± dB) je 3 Hz do 10 kHz



Slika 4: a) Nizkotlačno tipalo, b) mikrofoni

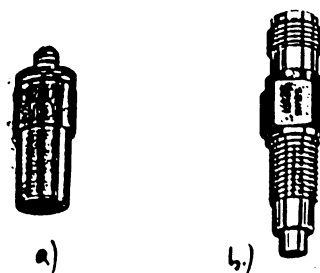
1-varovalna mreža, 2-dušilna ploščica, 3-upogibna konzola iz PZE keramike, 4-vtikač, 5-membrana, 6-kapilara za izravnavo počasnih sprememb zunanje tlaka

2.1.3 Izvedbe tlačnih PZE pretvornikov za splošno uporabo

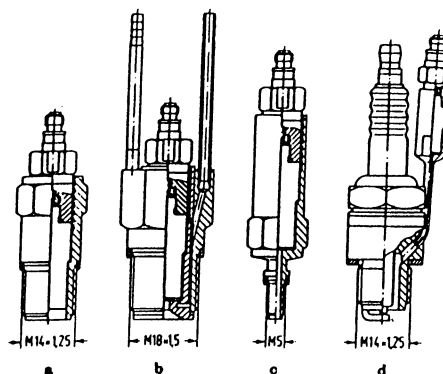
Za splošno uporabo z obsegi (0 do 100) bar ali (0 do 1) kbar obstaja večje število izvedb PZE pretvornikov. Skupno vsem je na ohišje pretvornika zavarjena membrana, kar omogoča njegovo vgradnjo npr. na notranjo steno tlačne posode. Lastne frekvence dosegajo vrednosti med (50 do 500) kHz. Po načinu montaže ločimo dve skupini (slika 5): z navojem (za direktno montažo na merjeni objekt, slika 5a) in brez navoja (slika 5b). Montaža slednjih se izvede preko ustreznih adapterjev (slika 6).

Slika 5: Izgled komercialnega PZE tlačnega tipala za splošno uporabo:

a) z navojem, b) brez navoja



Slika 6: Izvedbe adapterjev za tlačne PZE pretvornike: a) standardni, b) vodnohlajeni, c) iglasti, d) vžigalna svečka



Oba sistema imata dobre in slabe lastnosti. V prvem primeru je treba vrtati v merjeni objekt in urezati navoje z dokaj zahtevnimi tolerancami, da pri zategovanju pretvornika ne pride do prevelikih nateznih napetosti, ki lahko vplivajo na njegovo karakteristiko. Tega problema pri adapterskem načinu ni, oziroma se prevede na ohišje adapterja. Tolerance za izvrtino adapterja so manjše. Tak pretvornik pa zavzame nekoliko več prostora.

2.1.4 Visokotlačna PZE tipala

Visokotlačni PZE pretvorniki so tisti z območjem nad 1 kbar z uporabo v balistiki in visokotlačni hidravliki. Po konstrukciji so enako grajeni kot PZE pretvorniki za splošno uporabo. Poseben problem so napetosti, ki jih mora prenašati ohišje in PZE element. Gornja meja je 10 kbar. Na sliki 7 je prikazan visokotlačni pretvornik z obsegom (0 do 2.5) kbar, ki se uporablja za trajno kontrolo sprememb tlaka v sistemu za vbrizgavanje goriva pri dizelskem motorju.



Slika 7: Visokotlačni PZE pretvornik za merjenje sprememb tlaka v sistemu za vbrizgavanje goriva pri dizelskem motorju

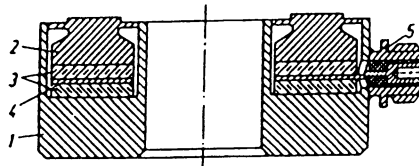
2.1.5 Visoko-temperaturna PZE tlačna tipala

PZE tlačni merilci so običajno grajeni za uporabo do največ 250 °C. Senzorji za področje visokih temperatur ($T > 250 \text{ °C}$) se imenujejo visoko-temperaturni tlačni pretvorniki. Za merjenja nad 250 °C se uporabljajo standardni pretvorniki z vodnim hlajenjem (direktno ali preko adapterja). Če to ne zadostuje ali, če vodno hlajenje ne pride v upoštevanje, je potrebno uporabiti pretvornike posebnih izvedb. Pri temperaturah $> 250 \text{ °C}$ teflon kot izolator odpove. Potrebno je uporabiti keramiko ali kapton. Problem nastopi tudi pri PZE elementih, katerih uporabnost se pri povišanih temperaturah reducira zaradi občutnega zmanjšanja njihove občutljivosti. Najbolj se obnese poseben rez kvarca, ki ni tako občutljiv na temperaturno degradacijo. Tak sensor je uporaben do 350 °C. Merilci, ki so podvrženi temperaturam plamena (npr. v izgorevalni komori motorjev) so opremljeni z dodatno dvojno membrano iz keramike, ki deluje kot toplotni ščit in izolator. Na ta način je možna uporaba s prekinjajočimi (intermitentnimi) temperaturami plamena do 2500 °C. Pri takih merilcih so napake, ki izvirajo zaradi temperature in temperaturnih gradientov, posebnega pomena. Z uporabo kombinacije materialov z različnimi lastnostmi v obliki skladovnice in prirejenega načina upogiba, se te efekte v veliki meri izniči.

2.2 PZE tipala za dinamična merjenja sile

Skoraj vsa tipala za silo vsebujejo nek elastičen element katerega deformacija je merilo za silo. Pri pasivnih tipalih (merilni trakovi, induktivni in kapacitivni sistemi) je potrebno to deformacijo meriti. Za doseg zadostne občutljivosti, je treba uporabiti elastičen in upogljiv element, da je ustrezna deformacija dovolj velika. Pri PZE tipalih je elastičen element kar senzor sam, ki pod vplivom sile daje ustrezen električen signal direktno (aktivno tipalo). Ker njegove deformacije ni potrebno meriti, je ta lahko za red velikosti manjša.

Shema najenostavnejše komercialne izvedbe PZE senzorja za silo je tz. merilna podložka prikazana na sliki 8. Obročasta osnovna plošča (1) je na vrhu postružena s tankimi valjastimi stenami. Dve tanki kvarčni ploščici (3) sta stisnjeni s pomočjo prstana (2), ki ustvari majhno prednapetost. Prednapeti prstan je zavarjen na ohišje (1). Izhodni signal se posname z elektrode (4) med ploščicama in vodi na vtičnico (5). V tem primeru sta kvarčni ploščici (L-efekt) rezani \perp na x os (x rez). Občutljivost nevgrajenih x -ploščice je 2.30 pC/N , občutljivost vgrajenih pa je, zaradi različnih vplivov, nekoliko manjša in znaša (2 pC/N). (V narisen primeru sta uporabljeni dve paralelno vezani ploščici, s čemer se doseže 2-kratna občutljivost, tj. 4 pC/N).



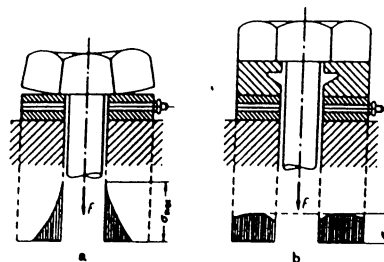
Slika 8: Shema PZE merilne podložke

Merilne podložke se izdeluje v obsegu nekaj kN do nekaj MN. Na sliki 9 je prikazan izgled merilnih podložk. Za obseg (0 do 7.5) kN je zunanji premer 10 mm, za obsega (0 do 1) MN pa 120 mm. Vzmetne konstante varirajo od $1 \text{ kN}/\mu\text{m}$ za majhne, do $100 \text{ kN}/\mu\text{m}$ za velike.

Slika 9: Zunanji izgled komercialnih merilnih podložk



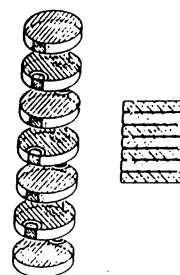
Pri vgradnji takih podložk za npr. merjenje prednapetosti vijakov (slika 10), je treba paziti, da se ne preseže maksimalna predpisana napetost za senzor, sicer počí. Dopustna tlačna napetost za kvarc je, $\sigma_{\text{dop}} \sim 150 \text{ N/mm}^2$. V kolikor je konica σ_{max} na sliki 10a manjša od σ_{dop} , senzor pravilno kaže. Problemu se izognemo konstruktivno s prstanom z notranjim utorom (slika 10b).



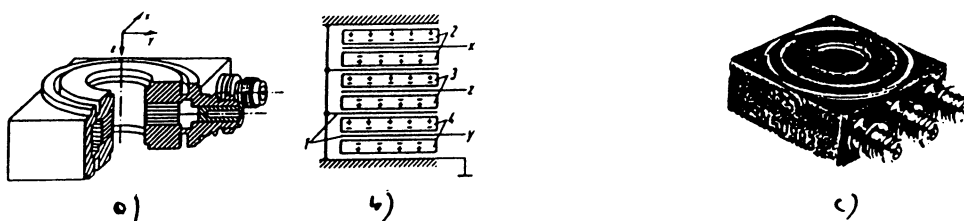
Slika 10: Merjenje prednapetosti vijaka

Minimalni prag za PZE merilce sile je 10 mN. Za povečanje občutljivosti se več elementov veže v serijo (mehansko). Električno je to paralelna vezava. Na sliki 11 je prikazan mikromodul s sedmimi ploščicami za L-efekt (občutljivost 14 pC/N).

Slika 11: Mikromodul s sedmimi kvarčnimi L-ploščicami



Na sliki 12 je prikazana shema in izgled tipala za sočasno merjenje vseh treh komponent sile.

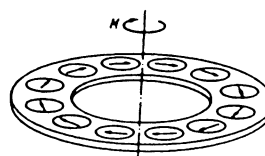


Slika 12: PZE tipalo za sočasno merjenje treh komponent sil; a) konstrukcija, b) električna shema, c) izgled komercialne izvedbe

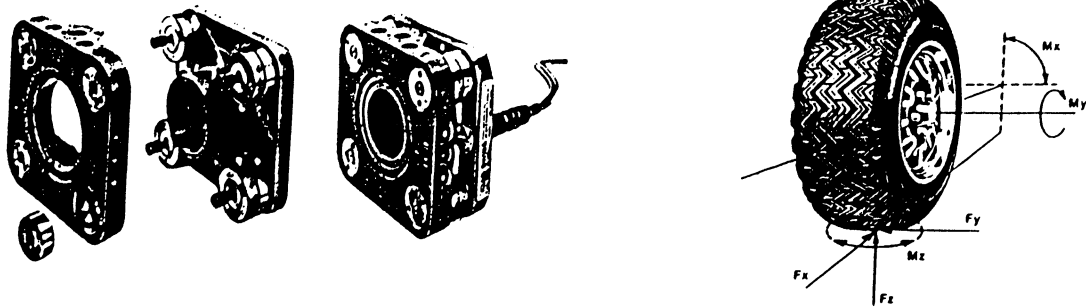
1- elektrode, 2- kvarčni ploščici za strig (merjenje F_x), 3- kvarčni ploščici za L-efekt (merjenje F_z), 4 - kvarčni ploščici za strig (merjenje F_y)

Na sliki 13 je prikazana shema sistema za merjenje vrtilnega momenta T . V tem primeru so kvarčne ploščice rezana za strig. Postavljene so v krogu tako, da leži najobčutljivejša smer za strig tangencialno na krog. Tipala morajo biti v tem primeru vgrajene z veliko prednapetostjo, da lahko prenašajo strižne sile s trenjem. Na posamezno tipalo delujoči vrtilni moment kreira tangencialne strižne sile. Ker so kvarčne ploščice vezane paralelno, je celotni izhodni signal sorazmeren delujočemu momentu.

Slika 13: PZE tipalo za merjenje vrtilnega momenta



Na sliki 13 prikazan sistem ima določene pomanjkljivosti in se v praksi uporablja omejeno. Diskusija o razlogih je izven obsega predavanj. V praksi (npr. dinamometer za merjenje radialnih sil na avtomobilih ali napravi za kontrolo centriranja gum) se je uveljavil t. z. šest-komponentni sistem (F_x , F_y , F_z) in (T_x , T_y , T_z), ki je sestavljen iz štirih tri-komponentnih tipal (slika 14). Štiri identična 3-komponentna tipala (slika 12) so vpeta med dvema jeklenima ploščama, ki med drugim ustvarita tudi ustrezno prednapetost.



Slika 14: Šest-komponentni dinamometer;
a) razstavljen, b) sestavljen, c) prikaz sil in momentov na kolo

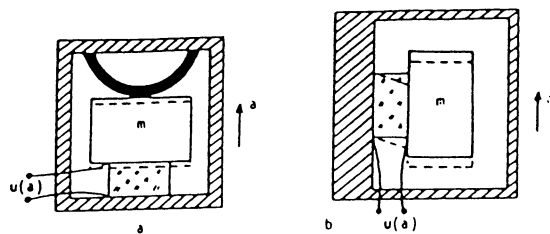
2.3 PZE tipala za merjenje pospeška

Pod pospeškom razumemo spremembo hitrosti na časovno enoto. SI enota je ms^{-2} . V praksi večkrat izražamo pospešek kot mnogokratnik g-ja, pospeška pri prostem padcu. Na sliki 15 sta prikazani osnovni shemi PZE tlačnega in strižnega akcelometra. Bistvena dela pretvornikov sta PZE ploščica in masa (seizmični element) m (slika 15). Pri pospešku a , masa m deluje na PZE ploščico s silo

$$F = - m a$$

pri čemer se na ploščici generira sili F sorazmerna količina naboja Q . Pri tlačnem pretvorniku seizmična masa pri vertikalnem pospešku povzroča debelinsko deformacijo PZE ploščice. Ploščica in element mase se pritrdita z lepljenjem, lotanjem ali z vzetjem s čemer pretvornik lahko meri pospešek v obeh smereh. Pri strižni verziji ploščica pri vertikalnem pospešku doživlja strižno deformacijo. Vlogo vzmeti igra kar ploščica sama. Kot PZE element se uporablja kvarc in keramični materiali (npr. BaTiO_3). Slednji imajo veliko občutljivost in jih je možno oblikovati v ploščice različnih form in dimenzij. Kvarc je manj občutljiv in se uporablja samo za zelo velike pospeške (10^3 do 10^5) g.

Slika 15: Osnovna shema akcelometra;
a) tlačni, b) strižni



Glede na uporabo, akcelometri delimo na:

- zelo občutljive za merjenja v geofiziki, gradbeništvu in tehniki;
- akcelometre za splošna merjenja vibracij;
- akcelometre za sunkovne pojave (npr. eksplozije).

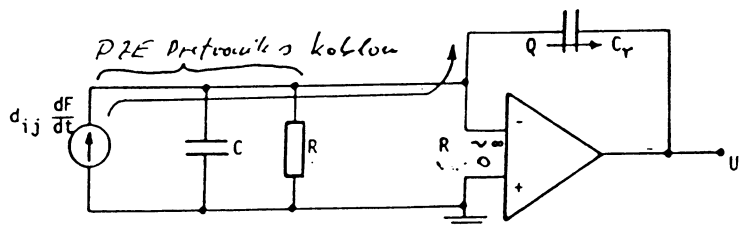
PZE akcelometri se konstruirajo tudi z dvema ali z več ploščicami v serijski ali paralelni vezavi. V serijski vezavi dobimo večjo izhodno napetost oz. občutljivost (ki pa ima tudi svojo slabo stran, ker zmanjša lastno kapacitivnost PZE senzorja in s tem vpliv veznega kondenzatorja ter merilnega instrumenta na izhodni signal).

Principielna zgradba komercialnega akcelometra (tlačnega in strižnega) je prikazana na sliki 16. Komercialni tlačni senzor (slika 16a) se sestoji iz dveh PZE ploščic za L-efekt (1), ki sta nasprotno orientirani. Ploščici sta z vijakom (2), ki deluje kot vzmet, vpeta med seizmično maso (3) in osnovno ploščo (4). Elektroda (5) prevzame signal in ga vodi na priključek (6). Ohišje (7) služi kot zaščita pred zunanjimi vplivi in nosi navoj (8) za montažo. Če se ploščica (4) pospeši, potem na PZE ploščici deluje sila, ki je sorazmerna pospešku. V osnovi gre za nihajni sistem z eno prostorsko stopnjo.



Slika 16: Izgled komercialnih PZE akcelometrov; a) miniaturni, b) troosni za tri prostorske stopnje

Lastne frekvence akcelometrov f_L so visoke (10 do 100) kHz. Meja uporabnosti je $f_{max} = 0.22 f_L$. Občutljivost S se izraža v pC/ms^{-2} in se giblje med $(10^{-2}$ do $10^3)$ pC/ms^{-2} odvisno od PZE materiala in merilnega obsega. Pretvorniki za male pospeške imajo velik S in majhno f_L , pretvorniki za močne sunke pa majhen S in veliko f_L . Za kolikor je časovna konstanta večja za toliko se spodnja frekvenčna f_{min} meja zniža. Zaradi tega je potrebno, da se kot indikatorji uporabljajo visokoomski napetostni predojačevalci z veliko vhodno upornostjo ($\sim 10 G\Omega$). Najboljše karakteristike pri nizkih frekvencah v tem pogledu (in tudi najpogosteje v uporabi) so tz. nabojni ojačevalci (charge amplifier) katerega shema je prikazana na sliki 17. Spodnja mejna frekvenca sodobnih naprav je (0.2 do 1) Hz.



Slika 17: Principielna shema PZE senzorja vezanega na nabojni ojačevalnik

Osnovni del nabojnega ojačevalca je pretvornik naboja v napetost, ki je po svoji strukturi operacijski ojačevalnik z zelo velikim ojačanjem (10^5) in zelo veliko vhodno impedanco ($\sim 10 G\Omega$). Vhod operacijskega ojačevalnika je zato vedno na tz. 'virtualni nuli'. Zato ves naboj Q ($= d_{ij} F$), ki se nabere na PZE ploščici zaradi delovanja sile F , steče čez kondenzator C_f povratne zanke, pri čemer nastane napetost

$$u_i = \frac{Q}{C_f} = -d_{ij} \frac{F}{C_f}$$

Z nabojno občutljivim ojačevalnikom se torej zbere ves naboj PZE senzorja, ker ojačevalnik prepreči pretakanje naboja skozi kapacitivnost kabla C_k ali upornosti izolacije R_k . Ker kapaciteto C_f lahko nadziramo in se s časom ne spreminja, uženemo s tem slabo poznavanje

upora in kapacitete kablov. Tudi časovna konstanta $\tau_r = R_r C_r$ je v tem primeru res znana. Osnovna odlika tega ojačevalca je, da je merjenje neodvisno od dolžine kabla (tudi do 100 m) in tudi ni nujno, da ima vrhunsko izolacijo (kot v primeru klasičnih ojačevalcev). Iz gornje enačbe sledi, da je občutljivost

$$S = \frac{u_i}{F} = - \frac{d_{ij}}{C_r}$$

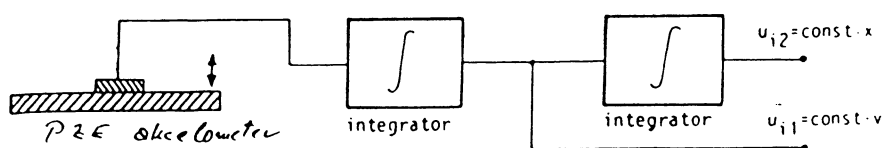
Vidimo, da lahko z izbiro kondenzatorja določamo občutljivost oz. merilni obseg, z izbiro R_r pa časovno konstanto za kvazistatične meritve. V praktičnem merilcu je paralelno C_r vezano še stikalo, ki služi za nastavljanje nule (null offset).

Delovne temperature keramičnih akcelometrov se gibljejo okrog 250 °C, specialne izvedbe do 450 °C. PZE akcelometri so lahki in majhni in zato ne obremenjujejo podloge, ki vibrira (vgradnja ne spreminja prvotnih vibracij).

Kalibracija ojačevalca se naredi s pomočjo kondenzatorja znane kapacitete in nabitega na določeni napetost S praznjenjem kondenzatorja na vходу ojačevalca se dovede določena količina naboja $Q = CU$ pri čemer se zabeleži maksimalna vrednost izhodne napetosti. Iz hitrosti zmanjševanja te napetosti se lahko določi časovna konstanta ojačevalca.

2.3.1 Uporaba akcelometra za merjenje hitrosti in poti

Na sliki 18 je principiarno pokazano kako lahko akcelometer uporabljamo za merjenje hitrosti in pomika merjenca. Izhodna napetost PZE sensorja, sorazmerna pospešku se vodi v dva kaskadno vezana integratorja napetosti. Prvi integrator daje signal u_{i1} sorazmeren hitrosti, drugi pa signal u_{i2} sorazmeren celotnemu pomiku merjenca.



Slika 18: Merjenje hitrosti in pomika s pomočjo akcelometra

Merjenje hitrosti in pretoka fluida

Problem merjenja hitrosti in pretokov fluida se pojavlja v številnih vejah tehnike kot so klasična in jedrska energetika, oskrba z vodo, odvajanje odpadnih voda, kemijska industrija in drugih panogah. Fluidi, katerih pretok ali hitrost se meri, so lahko plini, tekočine ali tekočine pomešane s trdimi delci. V industriji, pretvorniki in instrumenti za merjenje pretoka so najpogosteje sestavni deli regulatorji procesov ali deli sistemov za avtomatsko vodenje s pomočjo računalnika. V področju oskrbe z vodo, tekočimi ali plinskimi gorivi, pretvorniki za merjenje pretoka predstavljajo osnovne dele števcov s katerimi se meri količina pretečenega fluida. Glede na to, da se na osnovi rezultata, ki jih ti števci pokažejo, izvaja plačilo večjih denarnih zneskov, je jasno, da morajo le-ti biti dovolj točni in precizni.

Velikega pomena je tudi merjenje hitrosti zraka v prostem prostoru kakor tudi določanje smeri gibanja zraka. Take meritve so pomembne npr. pri določevanju relativnega gibanja letal glede na zrak. Razen tega je merjenje hitrosti in smeri zraka pomembno v meteorologiji, klimatizaciji prostorov, pogon generatorjev na veter, itd.

Absolutno merjenje pretoka tekočin je osnovano na določevanju količnika volumna ali mase tekočine in časa, ki je potreben, da se, pri ustaljenem pretoku, napolni določen rezervoar ali menzura. Druga vrsta metode je osnovana na merjenju hitrosti različnih delcev, ki jih fluid nosi s seboj (npr. laserska Dopplerska anemometrija - LDA). Absolutne meritve se lahko izvajajo tudi z ultrazvokom.

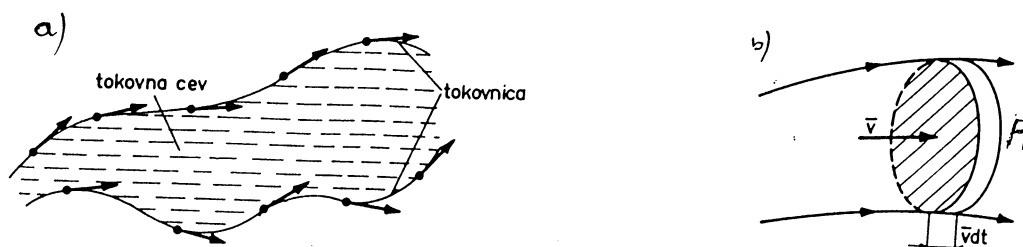
V vsakodnevni praksi se uporabljajo sledeči tipi merilcev pretoka:

- volumetrični
- turbinski
- merilci z dušilnimi elementi
- rotametri
- anemometri z vročo žičko
- LDA anemometri
- vrtinčni
- toplotni
- ultrazvočni
- Pitot-Prandtlova cev
- indukcijski, itd.

1. Osnove za gibanje tekočin

Obravnava gibanja tekočin je mnogo bolj zapletena kot razmeroma enostavno gibanje togega telesa. Posamezni deli tekočine se lahko različno gibljejo in njihova medsebojna razdalja se lahko spreminja. Zanima nas, kako se posamezni tekočinski deli premikajo, tj., radi bi dobili sliko hitrosti vseh tekočinskih delov in ugotovili, kako se ta slika spreminja s časom. Najenostavneje je, če tekočino zaznamujemo, npr. tekočino na različnih mestih obarvamo ali vanjo nasujemo žaganje. Tekočino potem v zaporednih trenutkih slikamo. Na ta način dobimo podatke o hitrostih posameznih delov tekočine v določenem trenutku in o časovnem spreminjanju hitrosti na določenem mestu tekočine.

Črte, ki ponazarjajo gibanje posameznih delov tekočine imenujemo tokovnice (slika 1a). Tangenta na tokovnico v določeni točki tokovnice pokaže smer hitrosti tistega dela tekočine v določenem trenutku. Več tokovnic skupaj tvori tokovno cev.



Slika 1: a) Tokovna cev, b) masni pretok

Pravimo, da je gibanje tekočine stacionarno, če se slika tokovnic s časom ne spreminja. Pri stacionarnem gibanju tekočine je hitrost v vsaki točki tekočine konstantna. Nasprotno, gibanje tekočine je nestacionarno, če se oblika in lega tokovnic s časom spreminjata. Hitrost tekočine na posameznih mestih ni konstantna. Značilno za stacionarno gibanje je, da skozi vsak prerez tokovne cevi steče enaka množina tekočine v časovni enoti.

Množino tekočine, ki v enoti časa steče skozi prečni prerez A (slika 1b), popiše masni tok q_m :

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \rho A \bar{v} = \rho q_v, \quad (1)$$

kjer so \bar{v} povprečna hitrost tekočine na območju prereza A , q_v volumski tok in ρ gostota tekočine.

Pri stacionarnem gibanju tekočine je masni tok konstanten ($q_m = \text{konst.}$). Če je tekočina nestisljiva ($\rho = \text{konst.}$), je konstanten tudi volumski tok ($q_v = \text{konst.}$). V tem primeru se produkt $A \bar{v}$ vzdolž tokovne cevi ne spreminja, $A \bar{v} = \text{konst.}$, oziroma:

$$A_1 \bar{v}_1 = A_2 \bar{v}_2. \quad (2)$$

Povečanemu prerezu tokovne cevi ustreza zmanjšana hitrost pretakanja tekočine skozi prerez tokovne cevi.

Izkušnje kažejo, da se tokovnice včasih lepo vijejo druga ob drugi in da se med gibanjem tekočine ne mešajo. Takšno gibanje tekočine imenujemo laminarno gibanje, to je gibanje v plasteh. Tekočina se giblje tako, kot da bi posamezne plasti drsele druga ob drugi.

V splošnem je gibanje tekočin bolj nemirno. Tekočinske plasti se mešajo in nastajajo vrtinci, ki tekočino močno mešajo. Takšno gibanje imenujemo turbulentno gibanje, to je gibanje v vrtincih. Zaradi tega pri takem gibanju nima smisla govoriti o tokovnih ceveh.

Ali je gibanje tekočine laminarno ali turbulentno, je odvisno od hitrosti gibanja tekočine in od notranjih sil, ki zavirajo relativno gibanje sosednjih tekočinskih plasti. Pri majhnih hitrostih je gibanje tekočine običajno laminarno, saj se počasi gibajoče plasti ne morejo veliko mešati. Nasprotno pa je hitro gibanje tekočine običajno turbulentno.

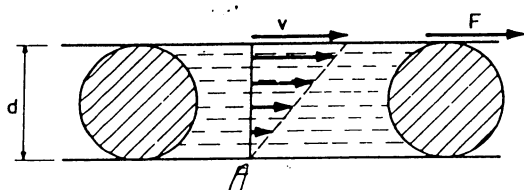
1.1 Laminarno pretakanje viskozne tekočine

Močne notranje sile med sosednjimi deli tekočine nasprotujejo večjemu relativnemu premikanju sosednjih plasti, kar pomeni, da nasprotujejo mešanju tekočine. Gibanje takih tekočin je zato laminarno. Takim tekočinam pravimo, da so viskozne.

Na sliki 2 je med vodoravnima ploščama površine A tekočina z viskoznostjo η . Valjasti opori na koncih plošče omogočata, da je razmik med ploščama vedno enak. Spodnja plošča naj miruje, zgornjo pa gibljemo s stalno hitrostjo v . Zato je potrebna določena sila F . Poskus pokaže, da je strižna napetost τ sorazmerna strižni hitrosti $\Delta v/\Delta y$:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}, \quad (3)$$

kjer je η dinamična viskoznost tekočine (enota: 1 Pas)



Slika 2: K definiciji zakona o viskoznosti

Viskozno tekočino potiskajmo s stalno silo skozi dolgo valjasto cev s premerom R (slika 3). Hitrost tekočine ob vstopu v cev naj bo po celotnem prerezu \bar{v} in dovolj majhna, da lahko gibanje obravnavamo kot laminarno. Plast tekočine tik ob steni cevi se ustavi in z viskozno silo zavira napredovanje sosednjih notranjih plasti. Čim bolj tekočina prodira v cev, tem debelejša postaja plast tekočine ob steni, kjer učinkuje zaviralna viskozna sila. Ker se plasti ob steni gibljejo počasneje, se osrednje plasti, pri katerih se viskozna sila ne čuti, gibljejo hitreje kot ob vstopu v cev. Masni tok tekočine mora namreč biti enak po vsem prerezu cevi, če je gibanje tekočine stacionarno, tj., če je potisna sila stalna. Ko se vpliv viskoznih sil vzpostavi po celotnem prerezu cevi, dobi prečni profil hitrosti pretakanja tekočine značilno parabolično obliko:

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4\eta L} (R^2 - r^2), \quad (4)$$

kjer je L dolžina cevi. Hitrost pretakanja tekočine je največja na sredini cevi ($r = 0$):

$$v_{\max} = v(r=0) = \frac{\Delta p R^2}{4\eta L}. \quad (5)$$

Celotni volumski tok skozi cev in povprečna hitrost pretakanja sta:

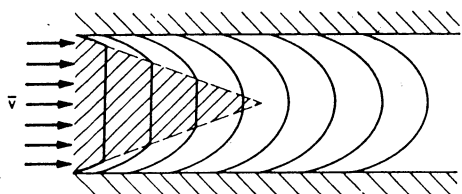
$$q_v = \frac{\pi R \Delta p}{8\eta L}, \quad (6)$$

$$\bar{v} = (1/2) v_{\max} \quad (7)$$

Enačbo (7) lahko zapišemo v obliki:

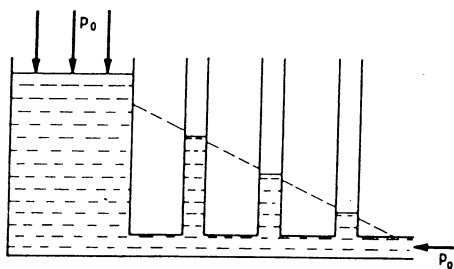
$$q_v = \frac{\Delta p}{R_p} \quad (8)$$

kjer je R_p tz. pretočni upor ($= 8\eta L/\pi R$). Viskozno tekočino lahko pretakamo, če jo poganjamo z razliko tlakov. (Enačba 8 ima obliko Ohmovega zakona!)



Slika 3: Profil hitrosti pri pretakanju tekočine skozi cev

Viskoznost tekočine je vzrok, da je potrebna tlačna razlika Δp , če želimo viskozno tekočino potiskati skozi cev. Torej tlak upada v smeri pretakanja (gibanja) tekočine. Upadanje tlaka vzdolž smeri gibanja tekočine je lepo ilustriran na sliki 4.



Slika 4: Upadanje tlaka v smeri pretakanja tekočine

1.2 Bernoullijeva enačba

Zanima nas kakšen je tlak v idealni tekočini, če se ne giblje enakomerno in, če prerez pretočne cevi ni stalen. Če je gibanje tekočine stacionarno in je poleg tega tekočina nestisljiva, mora biti volumski tok pretakanja stalen, tj., enak v vseh prerezih (slika 5):

$$q_v = A_1 \bar{v}_1 = A_2 \bar{v}_2 = \text{konst.} \quad (9)$$

Enačbi (9) pravimo kontinuitetna enačba nestisljive tekočine. Volumski tok stisljive tekočine ni stalen, četudi je gibanje stacionarno. V tem primeru se kontinuitetna enačba nanaša na masni tok. Stalnost masnega pretoka je pogoj za stacionarno gibanje:

$$q_m = \rho q_v = \rho_1 A_1 \bar{v}_1 = \rho_2 A_2 \bar{v}_2 = \text{konst.} \quad (10)$$

Preostane, da ugotovimo, kako je tlak na določenem mestu tekočine odvisen od hitrosti

tekočine na tistem mestu. Odgovor na to vprašanje dobimo s pomočjo izreka o ohranitvi energije, ki se zapiše:

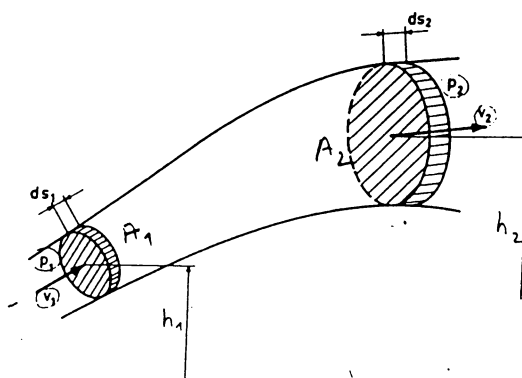
$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (11)$$

oziroma

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = \text{konst.} \quad (12)$$

Enačba (12) je tz. Bernoullijeva enačba, ki predstavlja zakon o ohranitvi mehanske energije, prirejen za gibanje idealnih tekočin. Bernoullijevo enačbo opišemo takole: Vsota tlaka, gostote kinetične i gostota potencialne energije je pri stacionarnem gibanju idealne tekočine vedno konstantna.

Slika 5: Tokovna cev različnega preseka

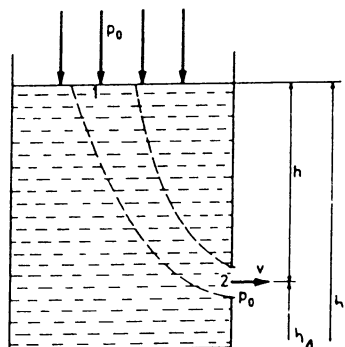


1.2.1 Primeri uporabe Bernoullijeve enačbe

Brez posebne razlage je v nadaljnjem tekstu podanih nekaj primerov uporabe Bernoullijeve enačbe.

a) Iztekanje tekočine iz posode (slika 6):

Slika 6: Iztekanje tekočine iz posode



Hitrost tekočine ob izstopu:

$$v^2 = 2 g h \quad (13)$$

Tekočina izteka iz posode s hitrostjo, kot če bi prosto padala z gladine do odprtine, tj., če bi padala za višinsko razliko h.

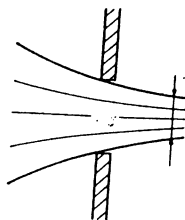
Volumski tok, ki teče skozi odprtino A_o , je: $q_v = Av$, pri čemer je A prerez curka iztekajoče odprtine, pri katerem je tlak tekočine enak zunanemu tlaku p_o (Slika 7). Zaradi

kontrakcije curka je ta prerez vedno manjši kot prerez odprtine. Razmerje

$$C = A / A_0 \quad (14)$$

je tz. koeficient kontrakcije curka. Koeficient C je močno odvisen od oblike odprtine in in kvalitete robov (0.65 za okroglo odprtino z ostrimi robovi).

Slika 7: Kontrakcija curka



b) Venturijeva cev:

Venturijeva cev je vodoravna cev, ki ima na sredini zožen prerez (Slika 7). Priključeni tekočinski manometer meri razliko tlakov na širšem in ožjem delu cevi. Razlika tlakov je:

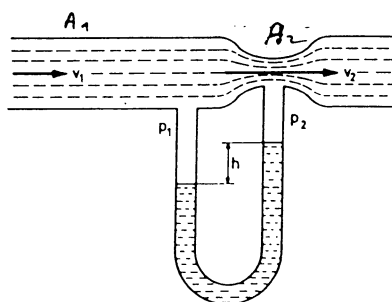
$$\Delta p = \rho_{\text{Hg}} g h = \frac{\rho_f (A_1^2 / A_2^2 - 1)}{2} v_1^2 \quad (15)$$

Mereč višinsko razliko glavin živega srebra h v manometru, lahko določimo hitrost pretakanja tekočine (npr. v_1). Venturijevo cev lahko uporabljamo za merjenje pretečenega volumskega toka:

$$q_v = A_1 v_1 = A_1 \left[2 \rho_f (A_1^2 / A_2^2 - 1) \right]^{1/2} \sqrt{\Delta p} = K \sqrt{\Delta p} \quad (16)$$

Kvadrat volumskega toka je sorazmeren tlačni razliki Δp . Sorazmernostna konstanta K je odvisna od gostote tekočine in od obeh prerezov cevi.

Slika 7: Venturijeva cev

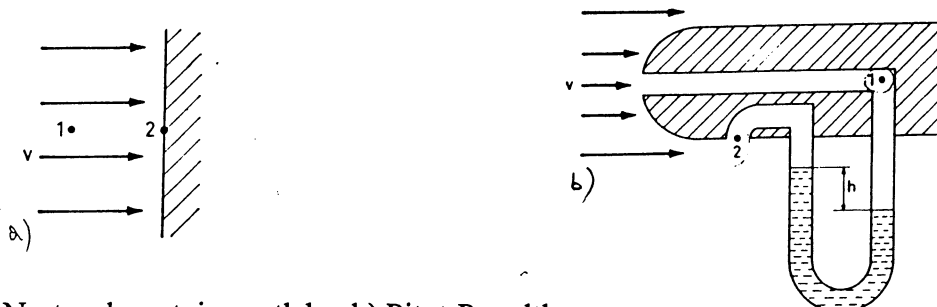


c) Zastojni tlak, Pitot-Prandtlova cev:

Večkrat se zgodi, da tekočina pri vodoravnem pretakanju zadene ob oviro in se ob njej ustavi (Slika 8a). V tem primeru tekočina pritiska na oviro z določenim tlakom, ki ga imenujemo zastojni tlak:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho_f v^2}{2} \quad (17)$$

Zastojni tlak je enak gostoti kinetične energije nemotenega gibanja tekočine, ki jo ovira ustavi. Zastojni tlak in s tem hitrost gibanja tekočine merimo s Pitot-Prandtlovo cevjo (slika 8b). Točka 1 je zastojna točka, tam se tekočina ustavi. Tekočina se mimo točke 2 giblje praktično nemoteno. Priklučeni manometer pokaže razliko tlakov Δp , ki je $\rho v^2/2$, kjer je v hitrost nemotenega gibanja tekočine.



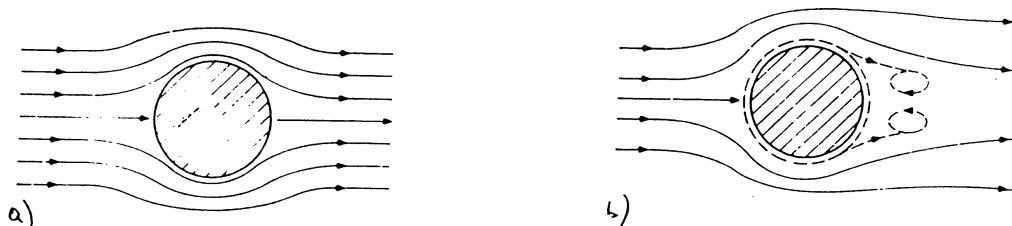
Slika 8: a) Nastanek zastojnega tlaka, b) Pitot-Prandtlova cev

1.3 Upor sredstva

Na sliki 9a je prikazana kroglasta ovira v tok neidealne tekočine. Vzdolž površine ovire se pilepi plast tekočine, ki skupaj z oviro miruje. Zaustavljena plast tekočine zavira napredovanje sosednjih plasti. V okolici ovire nastane gradient hitrosti. Sila, s katero tekočina zaradi svoje viskoznosti deluje na oviro, se imenuje viskozni upor:

$$F_n = 6 \pi r \eta v \quad (\text{za kroglasto oviro}) \quad (18)$$

Enačbo (18), zaradi linearne odvisnosti viskoznega upora od hitrosti tekočine, imenujemo linearni zakon upora.



Slika 9: Kroglasta ovira; a) v počasnem viskozem toku, b) v hitrem malo viskozem toku

Viskozni upor je pomemben pri počasnem laminarnem pretakanju tekočine z veliko viskoznostjo. Pri večjih hitrostih gibanja (slika 9b) pa je pomemben t.z. dinamični upor:

$$F_d = c \frac{A \rho v^2}{2}, \quad (19)$$

ki je sorazmeren zastojnemu tlaku in prečnemu prerezu ovire. Sorazmernostna konstanta c se imenuje koeficient upora, ki je odvisen od oblike ovire (pomembna je predvsem zadnja stran ovire!), npr. $c = 0.04$ ribji profil, 02 do 05 za kroglo in 1.1 za okroglo ploščo. Enačbo (19) imenujemo tudi kvadratni zakon upora, ker je dinamični upor sorazmeren kvadratu hitrosti gibanja.

Gibanje telesa skozi tekočino zavirata viskozni in dinamični upor. Prvi prevladuje pri počasnem gibanju v močno viskozni tekočini, drugi pri hitrem gibanju v malo viskozni tekočinah. Razmerje obeh uporov podaja Reynoldsovo število Re , ki je sorazmerno količniku med kvadratnim in linearnim zakonom upora:

$$Re \propto \frac{F_d}{F_\eta} \propto \frac{A \rho v^2}{r \eta v}, \quad (20)$$

ki je definirano z enačbo:

$$Re = \left(\frac{\rho}{\eta} \right) v d, \quad (21)$$

kjer je d prečna dimenzija gibajočega telesa. Če je $Re < 0.5$, pravimo da je tok laminaren. Za $Re > 1000$ je tok turbulenten. Za $0.5 < Re < 1000$ je tok turbulenten, toda upoštevati je treba oba zakona upora.

2. Volumetrični merilci pretoka

Osnova volumetričnih pretvornikov za merjenje pretoka plinov in tekočin je merjenje volumna pretečenega fluida. Fluid, ki vstopi v pretvornik se deli na elementarne volumne, ki v tej obliki preidejo skozi njega. Število elementarnih volumnov, ki preidejo pretvornik, je enolično povezano s številom obratov nekega rotirajočega elementa, ki jih registrira ustrezeni merilec vrtljajev. Trenutni pretok q_v je sorazmeren s kotno hitrostjo rotorja ω :

$$q_v \propto \omega, \quad (22)$$

medtem ko je celotna količina pretečene tekočine Q_v v nekem časovnem intervalu sorazmerna s številom N vrtljajev rotorja:

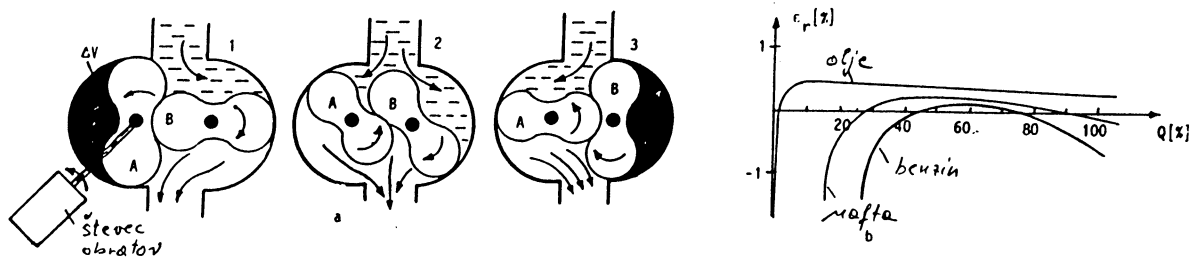
$$Q_v \propto N. \quad (23)$$

Na sliki 10 je prikazan eden od najpogosteje uporabljenih merilcev pretoka z dvema ovalnima rotorjema (batoma oblike lemniskate), ki se vrtita pod vplivom momenta sile zaradi razlike tlakov na vhodnem in izhodnem koncu. Na primer, v položaju 1 (slika 10a) moment deluje na rotor A, v položaju 2 deluje na oba rotorja, v položaju 3 samo na rotor B. V vsakem od teh položajev se rotorja medsebojno dotikata in onemogočata prehod fluida med površinami medsebojnega dotikanja. Med vsakim obratom rotorja zajameta elementarni volumen fluida ΔV (šrafirano polje) dvakrat in ga potiskata na izhod pretvornika. Skozi pretvornik na ta način preteče volumen fluida $4\Delta V$ pri vsakem obratu.

Za zmanjšanje nekontroliranega prehoda fluida skozi pretvornik morajo biti reže med rotorjema in komoro in reže med rotorjema zelo majhne (0.03 do 0.1) mm. Skozi te reže vendar preteče določena količina tekočine, ki predstavlja napako merjenja. Relativna napaka je:

$$\varepsilon_r = C_1 Q + C_2 / Q, \quad (24)$$

kjer sta koeficienta C_1 in C_2 odvisna od viskoznosti tekočine, mehanskega trenja rotorjev in geometrijskih parametrov. Na sliki 1b se vidi, da so napake precejšnje pri manjših pretokih.



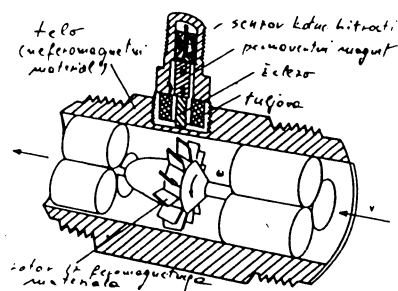
Slika 10: a) Shema merilca pretoka z rotorjema (batoma) oblike 'lemniskate',
b) relativna napaka merjenja za različne tekočine

Pri prehodu tekočine skozi pretvornik se pojavlja padec tlaka ($\Delta p \sim 0.5$ bar pri maksimalnem pretoku), kar predstavlja znatno izgubo energije, ki se jo po potrebi mora nadoknaditi s črpalko. Padec tlaka je približno sorazmeren s Q^2 . Slaba plat teh pretvornikov so slabe dinamične karakteristike in neuporabnost za fluide, ki vsebujejo trdne delce. Po drugi strani pa so precej natančni (~ 1 %, v posebnih primerih 0.01 %).

Obstaja večje število volumetričnih pretvornikov drugačne konstrukcije. Za vse velja, da za svoje vrtenje koristijo kinetično energijo fluida (če bi se vrteli pod vplivom nekega zunanega motorja, bi delovali kot črpalke).

3. Turbinski merilci pretoka

Turbinski merilci za merjenje pretoka so sestavljeni iz rotorja z dvema ali več lopaticami, ki se pod vplivom toka fluida vrtijo s kotno hitrostjo, ki je linearno sorazmerna hitrosti pretoka. V praksi se veliko uporabljajo za merjenje hitrosti v in pretoka q_v tekočin in plinov. Na sliki 11 je prikazan primer turbinskega pretvornika z ravnimi lopaticami. Rotor je pritrjen vležajen v osi telesa. Zaradi dobre aksialne simetrije hidrodinamičnih sil in majhnega mehanskega trenja v ležajih se rotor vrti s hitrostjo sorazmerno hitrosti fluida. Turbinski pretvorniki za električno merjenje pretoka so opremljeni z induktivnim merilcem kotne hitrosti, vgrajenim na zunanji steni cevi pretokometra (slika 11).



Slika 11: Shema turbinskega merilca pretoka

Stacionarni del induktivnega pretvornika se sestoji iz permanentnega magneta in tuljave. Stena cevi je iz nemagnetnega-, lopatice rotorja pa iz feromagnetnega materiala. Ob mimohodu posamezne lopatice se v tuljavici inducira napetostni sunek. Na ta način je

izhodna napetost oblike vlaka sunkov, katerih frekvenca je sorazmerna kotni hitrosti ω rotorja.

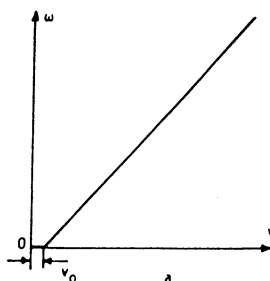
Opomba: Amplituda izhodne napetosti, ki znaša (10 do 100) mV prav tako raste s kotno hitrostjo. Zato je treba uporabiti merilec frekvenca ali števec vrtljajev, ki lahko registrirajo sunke tudi pri najmanjšem pretoku.

Pogonski moment rotorja zavisi (na kompliciran način) od nagiba lopatic, njihovih dimenzij in od preseka cevi. Rezultat analize je enostaven izraz za odvisnost kotne hitrosti rotorja od hitrosti fluida:

$$\omega = K(v - v_0) \quad \text{za } v > v_0, \quad (25)$$

$$\omega = 0 \quad \text{za } 0 < v < v_0, \quad (26)$$

kjer je K konstanta in v_0 minimalna hitrost fluida pri kateri se prične vrtenje rotorja (slika 12). Konstrukcijsko se naprava izdelava tako, da je v_0 čim manjši in, da je v normalnem režimu obratovanja $v \gg v_0$. Na ta način ima enačba (25) obliko $\omega = K v$. Razmerje največjega in najmanjšega pretoka pri turbinskih pretvornikih znaša ~ 10 . Konstanto K se dobi eksperimentalno s kalibracijo.



Slika 12: Odvisnost kotne hitrosti od hitrosti tekočine pri turbinskega merilcu

Obstajajo tudi drugačne konstrukcije turbinskih pretvornikov od tiste prikazane na sliki 11. Pri nekaterih tipih se permanentni magneti vgrajujejo v lopatic rotorja, medtem ko stacionarni del predstavlja zgolj tuljavica. V primeru plinov ali prozornih tekočin se za merjenje ω uporabljajo tudi optične metode.

Trenutni pretok q_v se določa z merjenjem frekvenca izhodnih sunkov, ki pri normalnih pretokih znaša ~ 300 Hz. Frekvenca izhodne napetosti se lahko prilagodi za telemetrične sisteme. Pretečena količina tekočine v določenem času $Q(\Delta t)$ je sorazmerna celotnemu številu sunkov N , enačba (23), ki se registrirajo s pomočjo digitalnih števecv.

Uporaba turbinskih pretokomerov je velika zaradi njihovih dobrih lastnosti. Predvsem sta to linearnost in točnost, ki v specificiranem obsegu lahko znaša pod (0.1 do 0.05) % od Q_{max} . Zaradi tega se ti uporabljajo tudi kot sekundarni etaloni za kalibriranje drugih pretokomerov.

Dinamične karakteristike so tudi odlične. Časovna konstanta za tekočine ima lahko majhne vrednosti (2 do 10) ms. Na ta način se lahko registrirajo dinamične spremembe pretoka do stotink Hz, pri čemer rotor doseže novo vrednost kotne hitrosti v intervalu manjšem od enega polnega obrata.

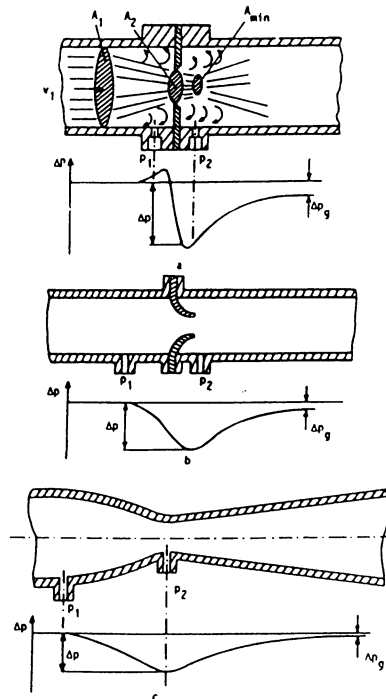
Turbinski pretvorniki se gradijo za širok razpon pretokov, pri čemer se maksimalna vrednost giblje začeniši pri $0,1 \text{ dm}^3/\text{s}$ pa vse do preko $1000 \text{ dm}^3/\text{s}$. Pri maksimalnih pretokih izguba tlaka lahko znaša tudi več kot 0.1 MPa .

4. Merjenje pretoka in hitrosti fluida z dušilnimi elementi

Merjenje pretoka fluida z dušilnimi elementi ('z zaslonkami in šobami' ali 'z merjenjem zajeznega tlaka') na osnovi spremembe tlaka na zoženem delu vodoravne cevi spada med klasične, vendar še pogosto uporabljene metode. Osnovni tipi zoženih cevi so zaslonke, šobe in Venturijeve cevi (slika 13). Zaslonka, ki se v praksi največ koristi, je ravna, tanka kovinska plošča s koncentrično postavljenjo krožno odprtino. Na določenih razdaljah pred in za zaslonko se nahajajo odprtine, na katere se priključi manometer s katerim se meri razlika tlakov $\Delta p = p_1 - p_2$. Z uporabo Bernoullijeve enačbe (12) za pretok tekočine (nestisljiva in brez trenja) v vodoravni cevi dobimo:

$$q_v = A_1 v_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (27)$$

ki je enačba (16) z malo drugačnim zapisom. A_1 in A_2 sta prečna preseka curka na mestih, kjer se meri razlika tlakov, ρ pa gostota tekočine.



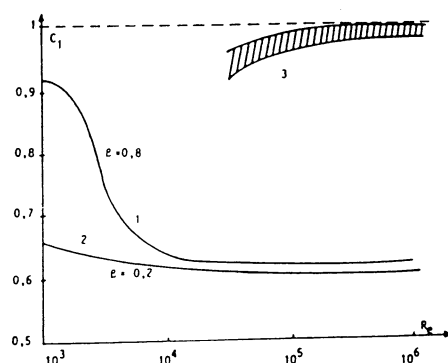
Slika 13: Tipični primeri merjenja pretoka z zaslonkami in šobami; a) zaslonka, b) šoba, c) Venturijeva šoba

Pri prehodu realnih tekočin skozi zaslonko pride, zaradi velikega gradienta tlaka, do nastanka vrtincev pred in izza zaslonke. Neposredno pred zaslonko pride do manjšega porasta tlaka zaradi zaustavljanja, ki se zatem hitro zmanjšuje do neke minimalne vrednosti

izza zaslonke (slika 13a). Na tem mestu je postavljena odprtina za priključek manometra, ki meri tlak p_2 . Glede na to, da je presek curka na mestu, kjer se meri p_2 različen od odprtine zaslonke, je v enačbo (27) potrebno uvesti korekcijski faktor, koeficient kontrakcije curka C , enačba (14), da se dobi dejanski pretok:

$$q_{v, \text{dej}} = C q_v \quad (28)$$

Koeficient C je predvsem odvisen od razmerja $\beta = \sqrt{A_1/A_2} = d/D$, kjer sta d in D premera odprtin zaslonke oziroma cevi in od Re števila, enačba (21), na mestu zaslonke. Koeficient C za različne vrednosti β in Re se določa eksperimentalno za različne premere cevi in oblike robov zaslonke. Glede nato, da je za te eksperimente potrebno veliko zahtevne opreme, se proizvajajo tipizirane oblike zaslonk in šob z določenimi merilnimi mesti za tlak in za katera obstojajo ustrezne meritve odvisnosti koeficienta C za različne vrednosti β in Re . Na sliki 14 je prikazana odvisnost $C(Re)$ pri $\beta = 0.8$ in 0.2 . Iz diagrama je razvidno, da se koeficient C , za vrednosti $Re > 10^4$, ki se v praksi največkrat pojavljajo, ne spreminja mnogo. Zato se ga za določeno cev z zaslonko v določenem območju lahko smatra za konstantnega.



Slika 14: Koeficient kontrakcije C ($\beta = 0.8$ in 0.2 , krivulji 1 in 2) v odvisnosti od Re ; šrafirano področje (3) predstavlja C za Venturijevo cev ($\beta = 0.25$ in 0.75).

Za zaslonko je značilen velik padec tlaka Δp in s tem v zvezi velika občutljivost. Po drugi strani, zaradi pojava vrtincev pred in izza zaslonke, pa nastopajo večje izgube energije, kar ima za posledico izgubo stalnega tlaka za Δp_{izg} , ki se izračuna po približni enačbi:

$$\Delta p_{\text{izg}} = \Delta p (1 - \beta^2) \quad (29)$$

Za tipične vrednosti β , ki se gibljejo od (0.2 do 0.8), je izguba tlaka:

$$\Delta p_{\text{izg}} = (0.96 \text{ do } 0.36) \Delta p \quad (30)$$

To izgubo je treba nadomestiti s pomočjo črpalk, kar predstavlja znatno gospodarsko izgubo v primeru velikih pretokov. Slaba stran zaslonke je tudi občutljivost odprtine na abrazijo zaradi delovanja trdnih delcev. Z abrazijo se spremenijo robovi zaslonke A_2 in s tem vrednost koeficienta C , kar povzroča napake pri merjenju. Po drugi strani je zamenjava nove zaslonke v obstoječi odprtini cevi enostavna, zaradi česar se ta način merjenja pretoka najpogosteje uporablja.

V pretoku skozi šobo (slika 13b) nastane veliko vrtincev za šobo. Merjeni tlak Δp in izguba tlaka Δp_{izg} sta manjša kot pri zaslonki. V primerjavi z zaslonko je ustrezní koeficient C šobe večji in se tudi počasneje spreminja v področju nizkih Re števil. Po drugi strani pa je instalacija šobe dražja in zahteva tudi več prostora.

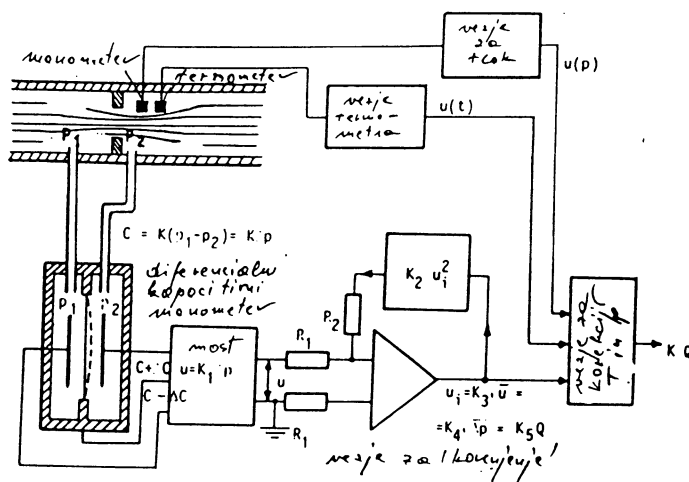
Pri dani zožitvi d/D se v Venturijevi cevi (slika 13c) pojavi najmanjša tlačna razlika Δp , tj. najmanjša občutljivost. Po drugi strani pa ta vnaša tudi najmanjše stalne izgube tlaka Δp_{izg} , ki znašajo (10 do 15) % Δp . Vrednost koeficienta C je ≈ 1 in se s spremembo β skoraj ne menja (slika 14). Občutljivost na abrazijo je majhna. Zahteva več prostora za vgradnjo in je dražja od ostalih tipov. Uporablja se prvenstveno za merjenja velikih pretokov, zlasti pa takrat, ko postane vprašanje prihranka na energiji pomemben dejavnik.

Pri merjenju stisljivih fluidov (plinov) enačba (27) ni direktno uporabna, ker je gostota na merilnih mestih tlaka različna. Pri stisljivih fluidih se v glavnem meri masni pretok

$$q_{m,dej} = \gamma q_{v,dej} \quad (31)$$

kjer je γ ekspanzijski faktor, ki upošteva odvisnost gostote od spremembe tlaka. Faktor γ se da, za Venturijevo cev in šobo, teoretično določiti, za zaslonko pa le eksperimentalno ali s pomočjo empiričnih enačb.

Na sliki 15 je prikazan primer linearizacije izhodnega signala merilca pretoka s pomočjo nelinearnega elektronskega ojačevalca s karakteristiko kvadratnega korena.

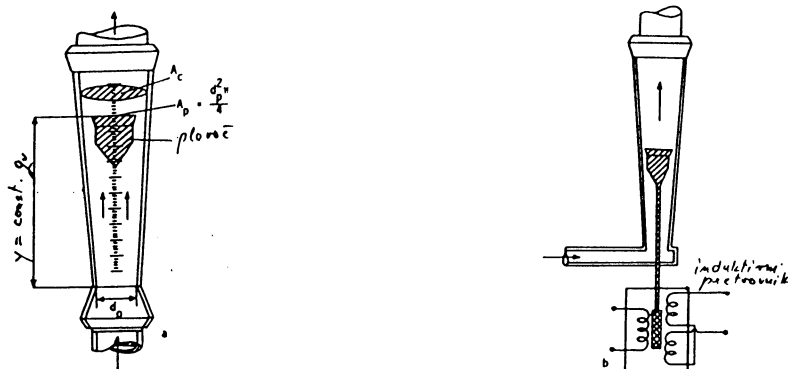


Slika 15: Linearizacija izhodnega signala merilca pretoka z zaslonko

5. Rotametri

Rotameter je enostavna naprava, ki se prvenstveno uporablja za vizualno merjenje pretoka tekočin in plinov. Osnovni deli rotametra so vertikalna prozorna cev konusne oblike in plovec krožnega preseka, ki se prosto giblje vzdolž cevi odvisno od hitrosti oz. pretoka (slika 16a). Ker je specifična teža plovca večja od specifične teže fluida, se plovec pri hitrosti $v = 0$, nahaja na dnu konusne cevi. Zaradi gibanja fluida se plovec dvigne do višine, ki je sorazmerna pretoku, pri čemer dovoljuje pretok skozi obročasto odprtino med plovcem in steno cevi. V uravnoteženem položaju je efektivna teža plovca izenačena s silo

zaradi razlike tlaka na obeh straneh plovca. Sila trenja zaradi viskoznosti je majhna v primerjavi s silo zaradi razlike tlakov in se zanemari.



Slika 16: a) Rotameter za neposredno merjenje pretoka prozornih fluidov, b) rotameter z električnim izhodnim signalom za merjenja pretoka neprozornih tekočin in za telemetrična merjenja

Na mestu največjega premera plovca, je cev zožena podobno kot pri cevi z zaslonko ali Venturijevi cevi. Razlika je v tem, da se zoženi presek rotametra povečuje s porastom pretoka. Vlogo prečnih presekov A_1 in A_2 v enačbi (27) igrata presek cevi A_c in kolobarjasta odprtina ($A_c - A_p$), kjer je A_p največji prečni presek plovca. Pri konstantnem pretoku je teža plovca, zmanjšana za silo vzgona, enaka sili razlike tlakov pod in iznad plovca:

$$g V_p (\rho_p - \rho_f) = A_p (p_1 - p_2) , \quad (32)$$

kjer je V_p volumen plovca, ρ_p in ρ_f gostota plovca oz. fluida. Iz enačbe (32) se vidi, da je padec tlaka pri rotametu konstanten in neodvisen od pretoka (kot je to primer pri ceveh z zaslonko ali šobo). Z zamenjavo razlike tlakov iz enačbe (32) v enačbi (27), dobimo:

$$q_v = \frac{C(A_c - A_p)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_c - A_p}{A_c}\right)^2}} \sqrt{\frac{2V_p g (p_p - p_f)}{A_p \rho_f}} \quad (33)$$

Glede nato, da je običajno $(A_c - A_p)^2 / A_c^2 \ll 1$, enačbo (33) lahko napišemo v obliki

$$q_v = K(A_c - A_p) , \quad (34)$$

kjer je K konstanta za dani fluid in plovec. Prečni presek konusa A_c v odvisnosti od višine y plovca je:

$$A_c = (d_0 + b y)^2 \pi / 4 , \quad (35)$$

kjer je d_0 premer spodnjega konusa in b konstanta za dano cev. Z zamenjavo $A_c(y)$ v enačbi (34) in z zanemarjenjem člena $(b y)^2$ dobimo:

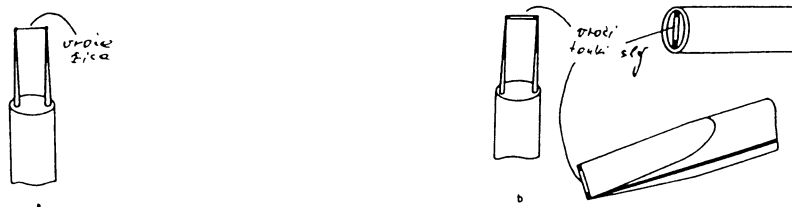
$$q_v = K (d_o^2 - d_p^2 + 2b y d_o), \quad (36)$$

kjer je d_p maksimalen premer plovca. Iz enačbe (36) sledi, da je pretok linearna funkcija višine. Na steno cevi se zato nanese linearna skala, ki omogoča direktno odčitavanje pretoka. Linearnost karakteristike in konstantni padec tlaka predstavljata dve dobri lastnosti rotametra. Praktične naprave so opremljene s plovci različnih velikosti in teže (iz materialov različnih specifičnih gostot), ki ustrezajo različnim pretokom in vrstam fluida. Uporabljajo se tudi posebne oblike plovcev, da se zmanjša vpliv spremembe viskoznosti fluida na merjenje pretoka.

Pri neprozornih tekočinah ni možno vizualno odčitavanje položaja plovca. V tem primeru se višino plovca lahko določa z nekim električnim senzorjem pomika. Ena od takih rešitev je prikazana na sliki 16b z diferencialnim induktivnim pretvornikom za merjenje večjih pomikov. Taki pretvorniki se uporabljajo za telemetrične naprave ali v sistemih za avtomatsko kontrolo procesov.

6. Anemometri na vročo žico

Ta sistem uporablja zelo tanko vročo žico kot senzor hitrosti toka plina in je v osnovi uporovni termometer (slika 17a). Hlajenje žičke je ob večji hitrosti plina večje, temperatura žičke pade ali pa jo moramo električno bolj ogrevati, če želimo, da žička ohrani prvotno temperaturo. Pri merjenjih hitrostnih fluktuacij v turbulentnem toku mora biti žička čim tanjša (5 do 10) μm in kratka (~ 5 mm), da je časovna (termična) konstanta senzorja čim krajša. Material žice je v glavnem Pt, uporablja pa se tudi W in Ni. Upornost žice v hladnem stanju je (2 do 10) Ω . Žička je pritrjena na dveh nosilcih majhnih dimenzij, zato da ne bi močno vplivala na hitrost pretoka na mestu, kjer je merilnik postavljen. Z ustreznim kompenzacijskim vezjem se časovna konstanta lahko zmanjša za več velikostnih razredov tako, da ti instrumenti lahko merijo izredno širok spekter hitrostnih fluktuacij (celo do 1 MHz). Namesto žičke se lahko uporablja tudi tanek sloj neparjenem na keramiki (slika 17b).



Slika 17: a) Anemometer na vročo žico, b) tipične oblike anemometrov z vročim tankim slojem

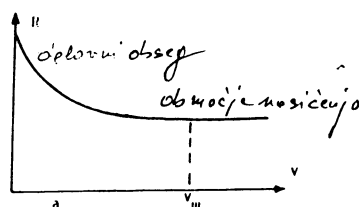
Delovanje anemometrov je osnovano na spremembi odvajanja toplote s segrete žice v odvisnosti od hitrosti okolišnjega fluida. Po načinu izvedbe jih delimo v dve grupi:

- a) Anemometri s konstantnim tokom;
- b) Anemometri s konstantno temperaturo.

V praksi se metoda b) veliko uporablja, metoda a) pa samo v specialnih primerih, ko se zahteva velika odzivna hitrost (npr. merjenje visokofrekventnih turbulentnih gibanj).

6.1 Anemometer s konstantnim tokom

Pri tem tipu anemometra se skozi žico (folijo) spušča konstanten tok I , ki senzor v mirujočem zraku privede na temperaturo T približno $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zaradi toka fluida pride do hitrejšega odvajanja toplote z žice, zaradi česar se temperatura (in upornost) zmanjša. Tipična odvisnost upornosti od hitrosti zraka v pri konstantnem toku I in pri konstantni temperaturi okolice, je prikazana na sliki 18. Iz diagrama se vidi, da je občutljivost pri majhnih hitrostih velika, ki pa se s porastom hitrosti zmanjšuje. Pri določeni mejni hitrosti v_m , ki znaša (10 do 15) m/s, krivulja odvisnosti $R(v)$ preide v območje nasičenja (upornost se le malo spreminja s porastom hitrosti fluida). Zato se metoda $I = \text{konst.}$ ne more uporabiti za merjenje večjih hitrosti.



Slika 18: Odvisnost upornosti segrete žice od hitrosti fluida pri konstantnem toku gretja

Pri ustaljeni hitrosti fluida pride do ravnovesja med dovedeno električno močjo $P_e = R(v) I^2$ in odvedeno toploto Q_p zaradi prestopa:

$$R(v) I^2 = \alpha_p A (T - T_f), \quad (37)$$

kjer so α_p koeficient prestopa toplote, A površina žičke in T_f temperatura fluida. Iz teoretičnih in eksperimentalnih raziskav se koeficient α_p v večini primerov lahko zapiše kot:

$$\alpha_p = C_0 + C_1 \sqrt{v}, \quad (38)$$

kjer sta C_0 in C_1 pozitivni konstanti, odvisni od oblike senzorja in vrste fluida. Upornost žičke je približno linearna funkcija temperature:

$$R(v) = R_f [1 + \alpha'_R (T - T_f)]. \quad (39)$$

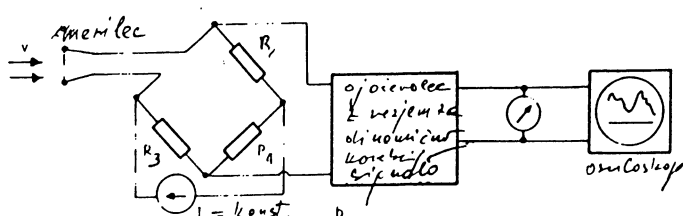
R_f je upornost pretvornika na temperaturi fluida, ko skozi njega ne teče tok. Koeficient upornosti α'_R se nekoliko razlikuje od linearnega koeficienta upornosti α_R (ki velja za začetno temperaturo žice $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Z zamenjavo temperaturne razlike $(T - T_f)$ iz enačbe (39) v enačbi (37) dobimo iskano odvisnost upornosti segrete žice od hitrosti fluida pri konstantnem toku gretja (slika 18):

$$R(v) = R_f \frac{C_2 + C_3 \sqrt{v}}{(C_2 + C_3 \sqrt{v}) - R_f I^2}, \quad (40)$$

kjer je $C_2 = C_0 A / \alpha'_R$ in $C_3 = C_1 A / \alpha'_R$. Z diferenciranjem enačbe (40) se lahko pokaže,

da je občutljivost večja pri manjših hitrostih in pri večjih tokovih gretja. V primeru $v \rightarrow \infty$ gre $R \rightarrow R_f$ (nasičenju).

Shema anemometra s konstantnim tokom je prikazana na sliki 19. Anemometrski senzor predstavlja eno vejo mostu, ki dela v neuravnoveženem režimu. Most se napaja z izvorom konstantnega toka. Če sta upornost senzorja R_1 in upornost R_2 znatno manjše od R_3 in R_4 , je tok gretja skoraj konstanten in približno enaka toku izvora. Pri določeni hitrosti fluida se most privede v ravnovesje s spremembo ene od vej mosta. Izhodna napetost je funkcija spremembe hitrosti v odnosu na hitrost pri kateri je bilo doseženo ravnovesje.



Slika 19: Shema anemometra s konstantnim tokom

Osnovni namen anemometrov s segreto žico je merjenje hitrih sprememb tokov kot so npr. turbulence, ki nastopajo v zračnih vetrovnikih (tunelih). Zato morajo le-ti imeti čim manjšo odzivno konstanto τ_A , kar se doseže z majhnimi dimenzijami. Pri miniaturnih izvedbah se doseže $\tau_A \sim 1$ ms.

6.2 Anemometer s konstantno temperaturo

Pri tej metodi se temperaturo senzorja 'drži' konstantno pri različnih pretokih fluida. Principielna shema mosta osnovanega na metodi konstantne temperature ($T = \text{konst.}$) je prikazana na sliki 20a. Na začetku merjenja pri hitrosti $v = 0$ (nulti hitrosti) toku gretja I_0 ustreza upornost senzorja R_0 . S spremenljivim uporom R_3 se most uravnoteži. Zaradi gibanja fluida se temperatura senzorja zmanjša. Tedaj se s spremenljivim uporom R_1 poveča tok gretja, s čemer se ponovno vzpostavi začetna temperatura, ki se indicira z nultim premikom galvanometra G v diagonalni veji mostu. Kot merilo hitrosti fluida služi tok I . Hitrost se lahko odčita tudi na skali spremenljivega upora R_1 .



Slika 20: a) Osnovna shema anemometra s konstantno temperaturo žice, b) karakteristika

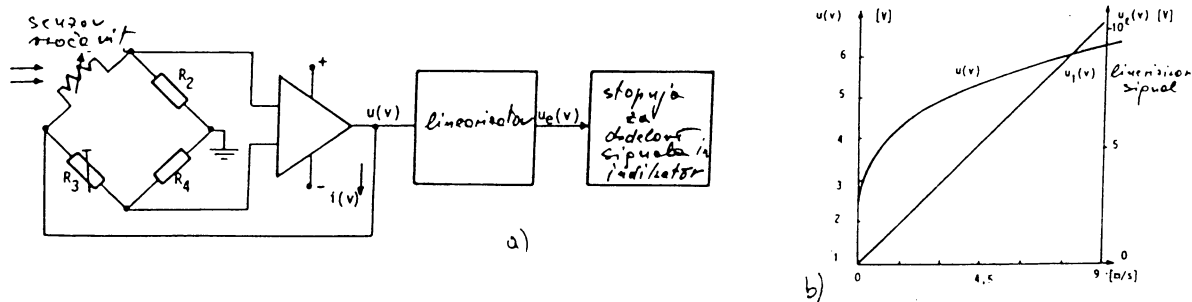
Izhajajoč iz enačb (37) in (40), ter upoštevaje, da se upornost žice 'drži' konstantno, je odvisnost toka od hitrosti $I(v)$:

$$I^2(v) = \frac{A}{\alpha'_R} \frac{R_o - R_f}{R_o R_f} (C_o + C_1 \sqrt{v}) . \quad (41)$$

Tok $I(v)$ predstavlja nelinearno funkcijo. Na diagramu $I(v) = f(\sqrt{v})$ je ta odvisnost premica (slika 20b).

Praktični anemometri s $T = \text{konst.}$ uporabljajo avtomatsko uravnoteženje mosta s pomočjo ojačevalca z velikim ojačanjem in anemometričnim mostom v krogu povratne vezave (slika 21a). Ojačevalec z velikim ojačanjem ima lastnost, da je njegova vhodna napetost zelo blizu vrednosti 0. To pomeni, da se na izhodu ojačevalca dobi napetost, ki povzroči takšno segretje senzorja, da bo most v ravnovesju pri različnih hitrostih pretoka. Ker imajo upornosti R_2 , R_3 in R_4 konstantne vrednosti, upornost senzorja v vsakem trenutku približno izpolnjuje pogoj ravnovesja $R_o = R_2 R_3 / R_4$. Če je npr. v začetnem stanju hitrost fluida 0, je na izhodu ojačevalca napetost U_o . Pri tem je senzor segret na temperaturo T_o , kateri ustreza upornost R_o . Če se hitrost fluida povečuje, temperatura in upornost težita, zaradi intenzivnejšega odvajanja toplote, da se zmanjšata. To privede do nastanka napetosti na izhodu ojačevalca. Ojačana napetost izzove porast disipacije žičke. Njena temperatura ponovno doseže prvotno vrednost in most preide v stanje blizu ravnovesja. Kot merilo hitrosti pretoka služi izhodna napetost ojačevalca, tj., napetost napajanja mosta. Temperatura niti T_o oziroma upornost R_o se določa z enim od uporov v mostu, npr. z R_3 kot nakazano na sliki 21a.

Izhodni signal anemometra $u(v)$ je produkt celotne upornosti mosta R_m in toka $I(v)$, $u(v) = R_m I(v)$. Tipična oblika izhodne napetosti $u(v)$, prikazana na sliki 21b, je nelinearna funkcija hitrosti. Zato se pri nekaterih napravah uporabljajo vezja za linearizacijo, ki po svoji strukturi predstavljajo nelinearne ojačevalce z nelinearnostjo inverzni tisti na sliki 21b. Na izhodu linearnizatorja se dobi napetost $u_1(v)$, linearno sorazmerna hitrosti, ki se prikaže na skali indikatorja. Po potrebi se signal obdeluje za določanje srednje in dinamične komponente napetosti.



Slika 21: a) Shema anemometra s konstantno temperaturo z avtomatskim uravnoteženjem mosta, b) tipična oblika karakteristik anemometra

Osnovna prednost metode konstantne temperature je širok merilni obseg, ker karakteristika v območju velikih hitrostih ne kaže nasičenja kot je to primer pri metodi s konstantnim tokom. V dinamičnem pogledu je ta anemometer kompliciran. Odzivne konstante dosežejo zelo nizke vrednosti (~ 0.01 ms).

6.3 Merjenje hitrosti pretoka pri spremenljivi smeri

Anemometer ima največjo občutljivost pri toku pretoka pravokotno na žico, ker je takrat hitrost odvajanja toplote z niti največja. Če se smer pretoka glede na nit spreminja, je potrebno uvesti korekcijo s pomočjo ekvivalentne hitrosti hlajenja v_e . Ta je enaka tisti hitrosti fluida \perp na žičko, ki povzroča enako odvajanje toplote kot pri hitrosti v pod kotom α . Če se vpadni kot malo razlikuje od 90° , je ekvivalentna hitrost:

$$v_e = v \sin \alpha . \quad (42)$$

Če vpadni kot znatno odstopa od 90° , se ekvivalentna hitrost izraža s točnejšo enačbo:

$$v_e^2 = v^2 (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha) , \quad (43)$$

kjer je k konstanta. Člen $k \cos \alpha$ predstavlja občutljivost na hitrost fluida \parallel (paralelno) z žičko. Ekvivalentna hitrost je vedno manjša od stvarne. Anemometer se kalibrira vedno pri toku \perp na žičko. Zaradi tega se pri spremenljivi smeri na skali anemometra odčitava v_e . Če je anemometer lineariziran, je izhodna napetost $u = C v_e$, kjer je C konstanta.

Dejanska vrednost hitrosti v pri dvokomponentnem pretoku (tok v ravnini) se lahko določi s pomočjo sonde z dvema prekrižanima nitkama postavljenih pod medsebojnim kotom 90° v ravnini toka. Primer take t.z. X sonde je prikazan na sliki 22a. Segrevane žičke X senzorja se vklopijo v dva linearizirana mosta (slika 22b). Ker so koti med hitrostjo fluida in nitko α in $\alpha + \pi/2$, so izhodne napetosti lineariziranih anemometrov:

$$u_1 = C v_{e1} = C v \sqrt{\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha} , \quad (44)$$

$$u_2 = C v_{e2} = C v \sqrt{\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha} . \quad (45)$$

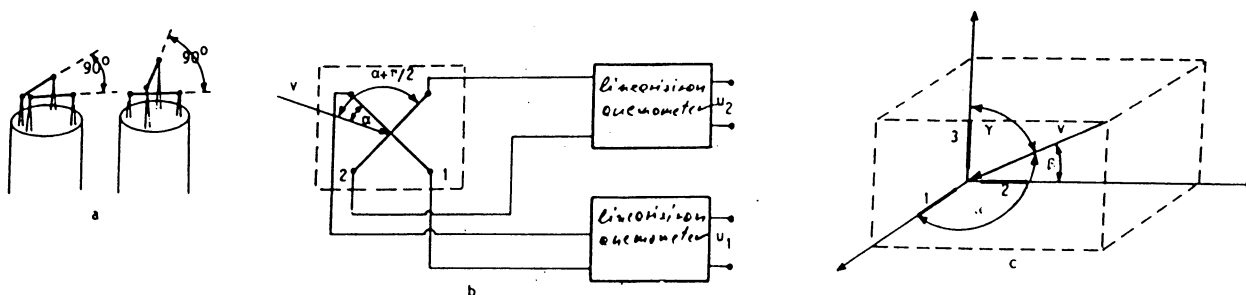
Signale u_1 in u_2 se vodi na vezje za kvadriranje s čemer se dobijo napetosti $u_1' = C_1 u_1^2$ in $u_2' = C_1 u_2^2$. S sumiranjem teh dveh napetosti se dobi:

$$u_1' + u_2' = C_1 C^2 (1 + k^2) v^2 . \quad (46)$$

Vežje za korenjenje signala daje:

$$u = C_1 \sqrt{u_1' + u_2'} = C_2 C \sqrt{C_1 (1 + k^2)} v \quad (47)$$

od koder sledi, da je signal u sorazmeren dejanski hitrosti fluida, neodvisno od kota α .



Slika 22: a) Anemometrijske sonde tipa X, b) principa merjenja hitrosti z X sondo pri 2-komponentnem toku, c) analiza principa merjenja 3-komponentnega pretoka

Za merjenje trikomponentnega toka se uporabi sonde s tremi medseboj \perp postavljenimi nitkami vključenimi v tri neodvisna anemometrijska sistema. Signali lineariziranih anemometrov (slika 22c) so:

$$u_1 = C v_{e1} = C v \sqrt{\sin^2 \alpha_1 + k^2 \cos^2 \alpha_1} , \quad (48)$$

$$u_2 = C v_{e2} = C v \sqrt{\cos^2 \alpha_2 + k^2 \sin^2 \alpha_2} , \quad (49)$$

$$u_3 = C v_{e3} = C v \sqrt{\sin^2 \alpha_3 + k^2 \cos^2 \alpha_3} . \quad (50)$$

S trigonometrijsko transformacijo se lahko pokaže, da je signal sorazmeren s hitrostjo fluida, neodvisno od kotov:

$$u = C_1 \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = C_1 C \sqrt{2 + k^2} v . \quad (51)$$

Obdelava signalov v anemometrijskih sistemih zahteva posebno elektronsko opremo zlasti še v primeru, ko so poleg konstantnega toka prisotne hitro spremenljive visokofrekvenčne komponente zaradi turbulence.

Miniaturni polprevodniški NTC in PTC termistorji se prav tako koristijo za merjenje pretoka. Senzorji so običajno oblike lopatice. Ker sta upornost in temperaturni koeficient termistorjev precej večji od kovine, se termistorski anemometri odlikujejo z veliko občutljivostjo.

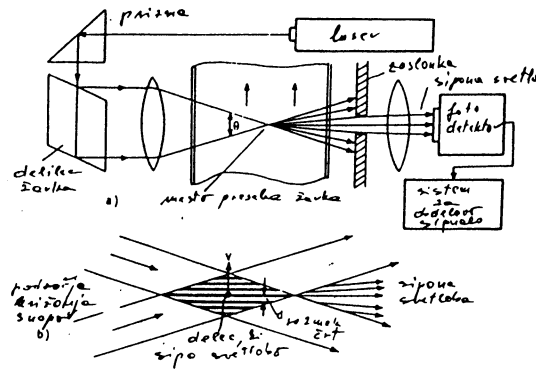
7. Laserski Dopplerjev anemometer

Laserski Dopplerjev anemometer (LDA ali LDV, V- velocimeter) služi za apsolutno merjenje trenutne hitrosti (velikost in smer) fluidov (plinov in tekočin). S to metodo se hitrost fluida meri praktično v eni točki, kar omogoča merjenje lokalne razporeditve hitrosti odnosno turbulence pri gibanju fluida skozi cevi ali pri merjenju odprtih tokov kot so gibanja raketnih plinov, raziskave plazme, itd.

Fizikalna osnova temelji na pojavi sipanja laserske svetlobe na delcih manjših od $1 \mu\text{m}$, ki se gibljejo skupaj fluidom. Sipani svetlobi na gibajočih se delcih se, zaradi Dopplerjevega efekta, spremeni frekvenca. Sprememba te frekvence zavisi od hitrosti fluida. Bistvena zahteva je, da je velikost delcev manjša od valovne dolžine svetlobe λ . Razlaga principa je težka. Najpreprosteje se to da razložiti na osnovi interferenčne slike.

Na sliki 23 je prikazana optična shema LDA anemometra, ki dela na principu optičnega 'glavnika' nastalega na preseku dveh koherentnih laserskih žarkov. Izvori valovanja so koherentni, če oddajajo valovanje enakih frekvenc in s stalno fazno razliko. Svetloba iz laserja gre skozi 90° odklonsko prizmo na delilec žarka, iz katerega izstopata dva koherentna svetlobna snopa (slika 23a). Svetlobna snopa nadaljujeta skozi lečo in se v določeni točki prozorne tekočine, v kateri hitrost se meri, sečeta. Na preseku laserskega žarka pride do interference, tako da se v volumnu velikosti $\sim 0.1 \text{ mm}^3$ formira niz stacionarnih svetlih in temnih črt, ki ustrezajo mestom lokalnega ojačanja in slabljenja laserskih žarkov (slika 23b). Če se koherentna žarka sečeta pod kotom θ , je razmak d med dvema svetlima oz. temnima črtama:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta / 2} . \quad (52)$$



Slika 23: a) Shema LDA anemometra, b) merilni prostor

Delec, ki se giblje skozi mesto preseka s hitrostjo v , svetlobo siplje. Pri tem se intenziteta svetlobe skozi zaslonko zmanjša. Na fotodetektorju dobimo sunke katerih perioda T je enaka času preleta med dvema interferenčnima črtama:

$$T = \frac{d}{v} = \frac{\lambda}{2v \sin \theta/2} \quad (53)$$

Torej, frekvenca svetlobnih sunkov je linearna funkcija hitrosti (hitrosti \perp na smer interferenčnih prog):

$$f = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta/2 \quad (54)$$

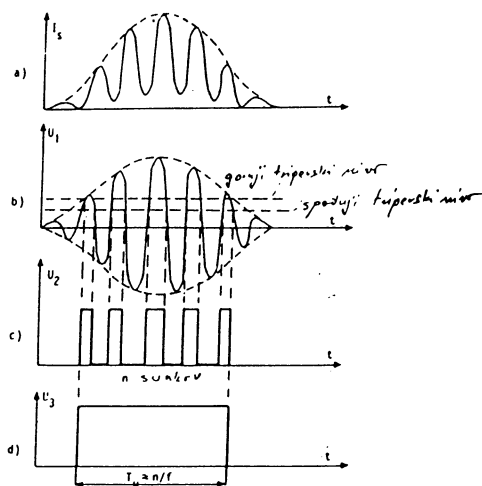
Naprava je narejena tako, da se direktni žarki absorbirajo na aperturi zaslonke. Na fotodetektor pade samo sipana svetloba. Mermi signal je odvisen od koncentracije delcev, ki se nahajajo v fluidu kot naravni sestavni deli (mikroskopski mehurčki v fluidu raztopljenih plinov), prašni delci ali dodana obarvana snov, če je njihova naravna koncentracija prenizka. V izpušnih plinih motorjev delci (saje) nastanejo v samem procesu izgorovanja. V primeru dovolj velike koncentracije se na detektorju pojavi kontinuiran signal s frekvenco podano z enačbo (54). Občutljivost df/dv je velika; pri $\lambda = 700 \mu\text{m}$ in $\theta = 15^\circ$ je 373 kHz/ms^{-1} .

Na sliki 24a je prikazan tipičen signal, ki ga daje fotodetektor. Signal ima obliko 'valovnega paketa' z envelope zvonaste oblike in sunki, katerih število je enako številu presečenih svetlih interferenčnih črt. Po prehodu skozi filter ima signal obliko prikazano na sliki 24b. Signal se nato vodi na vezje za oblikovanje sunkov s spodnjim in zgornjim pragom kot prikazano. Izhod je vlak določenih pravokotnih sunkov (slika 24c). Če je število sunkov n znano, lahko frekvenco določimo z merjenjem dolžine trajanja vlaka:

$$T_{vl} \approx \frac{n}{f} = \text{konst.}/v \quad (55)$$

Slaba plat laserskega Dopplerjevega anemometra je zelo draga oprema. Zato se uporablja kot absolutni sistem za kalibracijo drugih anemometrov, za znanstvene raziskave in merjenja kjer se to 'splača' (hitrost pretoka pri izgorovalnih procesih, struktura curka pri

vbrizgavanju, hitrost pretoka v plamenu, turbostrojih, ozkih kanalih, vetrovnikih, kemijskih reakcijah. Metoda ne zahteva kalibracije, v toku ni sonde in meri se željeno komponento. Slabe strani LDA metode je tudi zahteva po prozornem fluidu in vnosu delcev. Predpostavka je, da imajo ti delci enako hitrost kot fluid.

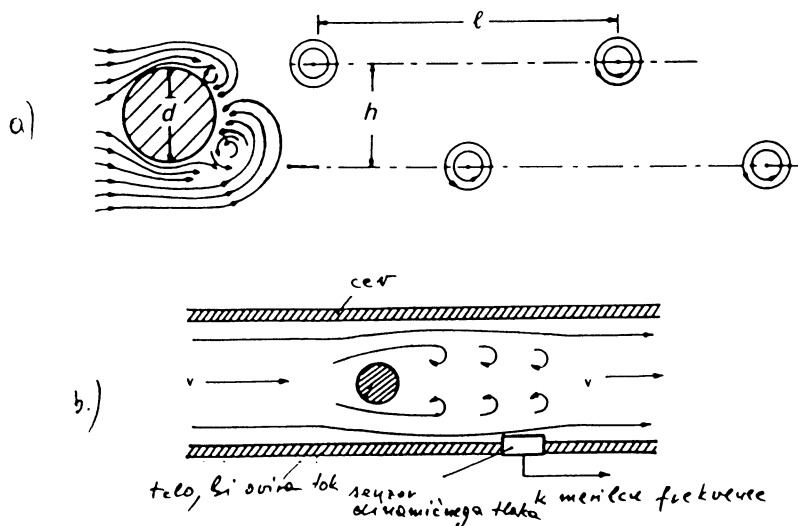


Slika 24: a) Intenziteta sipane svetlobe, b) filtrirana napetost fotodetektorja, c) izhodni signal, ki ga daje oblikovalec električni sunkov, d) končni signal katerega trajanje, obratno sorazmerno s hitrostjo, se meri

V predhodnem primeru je bil opisan sistem z enim žarkom (ene valovne dolžine). Možne so tudi 3-dimenzionalne meritve, kjer uporabljamo žarke treh različnih valovnih dolžin.

8. Vrtinčni merilci pretoka

Če se v pretoku fluida nahaja negibljiv predmet, se nizvodno objekta pojavljajo vrtinčna gibanja, katerih frekvenca je sorazmerna hitrosti fluida (slika 25). V naravi se ta pojav manifestira s tuljenjem vetra ali z 'žvižganjem' žic na daljnovodih. Efekt je poznan že več kot 100 let, merilci pretoka na tem principu pa so relativno novi.



Slika 25: a) Nastanek vrtincev, b) principielna shema vrtinčnega merilca pretoka

Frekvenca vrtničnega gibanja se lahko aproksimira z enačbo:

$$f = \frac{St v}{d}, \quad (56)$$

kjer je v hitrost, d karakteristična dimenzija objekta in St tz. Štrohalovo število, ki ima približno konstantno vrednost 0.185 za Re števila v območju (3×10^2 do 2×10^5). Vrtinci se pojavljajo v alternirajočem zaporedju (sliki 25a); po vrtincu spodaj (pod oviro) sledi vrtinec zgoraj (nad oviro), itd.

Osnovni deli vrtničnih merilcev pretoka so:

- telo, ki povzroča vrtince;
- detektor frekvence (pogostosti) vrtincev z indikatorjem;
- analogni ali digitalni merilec frekvence.

Senzorji frekvence so po konstrukciji pogosto senzorji tlaka. Najustreznejši so membranski s piezo-uporovnimi ali kapacitivnimi elementi. Razlike v tlaku pred oviro in za oviro znašajo ~ 10 Pa. Dejansko se ne meri tlačna razlika ampak šteje sunke, kar je boljše. amplituda V nekaterih primerih so lahko tudi miniaturni samosegrevani upori, ki, na principu anemometra s konstantnim tokom, menjajo svojo upornost s frekvenco vrtincev.

Uporabljajo se za veliko število raznih tekočin, razen za tiste z veliko viskoznostjo. Merilce odlikuje zelo široko razmerje najmanjšega in največjega pretoka (okrog 1 : 100). Prednost jim je tudi linearna karakteristika, kar omogoča njihovo uporabo v kontrolno-regulacijskih sistemih (plini, tekočine z velikimi pretoki, vroča para).

9. Toplotni merilci pretoka

Osnovni del toplotnega merilca pretoka je cev v kateri je nameščen grelec in dva termometra, ki merita temperaturo fluida pred in izza grelca (slika 26a). Če je moč grelca konstantna, se celotna energija grelca pri stacionarnem toku in zanemarljivih izgubah, odvaja s pretokom fluida, ki se segreje (za $\Delta T = T_1 - T_2$):

$$P = q_m c_p \Delta T. \quad (57)$$

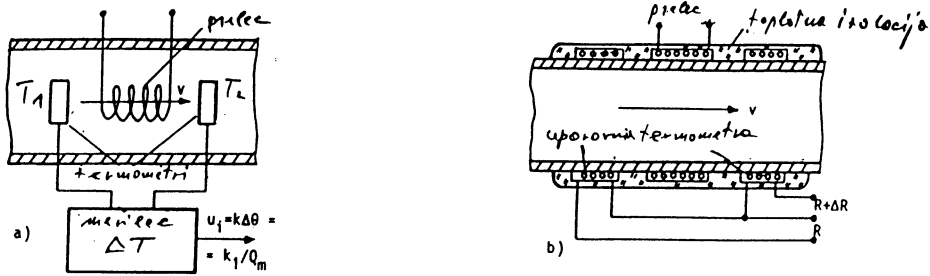
Če je izhodni signal termometra sorazmeren razliki temperature $U_i = k \Delta T$, velja:

$$U_i = \frac{k P}{c_p q_m}, \quad q_m > q_{m, \min}. \quad (58)$$

Enačba (58) velja za pretoke večje od neke minimalne vrednosti $q_{m, \min}$. Toplotni merilci pretoka dajejo izhodni signal, ki je obratno sorazmeren masnemu pretoku (za razliko od večine drugih naprav, ki merijo q_v). Razlika temperature ΔT je velikosti ≤ 1 °C. Zato se za razliko ΔT uporabljajo občutljivi senzorji kot npr. dva uporovna termometra vezana diferencialno v most.

Komercialni toplotni merilci pretoka po tej shemi se uporabljajo za precizne meritve majhnih pretokov plinov (0 do nekaj 1000) SLM (standardnih litrov /minuto). Na sliki 26b je prikazana varianta z grelcem in senzorji razlike temperatur postavljenih z zunanje strani

tako, da pretok fluida ni oviran. Karakteristike tega instrumenta se optimizirajo eksperimentalno z naravnavanjem položaja grelca in senzorja kakor tudi z izborom toplotnega upora med grelcem, fluidom in senzorjem. Tak merilec je primeren za merjenje večjih pretokov tekočin in plinov.

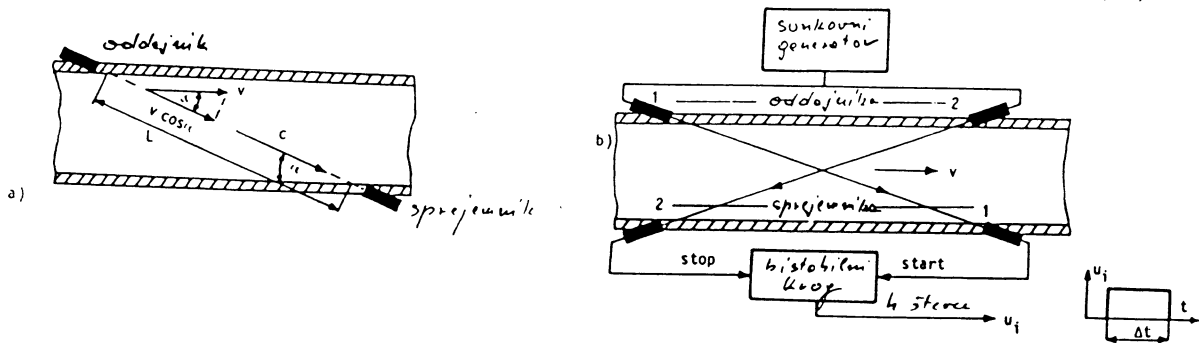


Slika 26: a) Shema toplotnega merilca masnega pretoka, b) toplotni merilec z grelcem in senzorjema na zunanji strani cevi

10. Ultrazvočni merilci pretoka

Osnova ultrazvočnih (UZ) merilcev pretoka je odvisnost hitrosti zvoka od hitrosti fluida v katerem se UZ razširja. Če je c hitrost UZ v mirujočem fluidu in v hitrost fluida, je hitrost razširjanja ultrazvoka v gibajočem fluidu (slika 27a):

$$\bar{c}' = \bar{c} + \bar{v} . \tag{59}$$



Slika 27: UZ merjenje pretoka; a) princip, b) shema sunkovnega diferencialnega merilca

Ker je vedno $c \gg v$, lahko vektorsko vsoto aproksimiramo z:

$$c' = c + v \cos \alpha , \tag{60}$$

kjer je α kot med smerjo razširjanja ultrazvoka in fluida. UZ visoke frekvence ima lastnost, da se na kratkih razdaljah giblje zelo usmerjeno, podobno kot svetlobni žarki. Na sliki 27b je prikazana ena od variant sunkovnega UZ merilca pretoka, osnovana z dvema oddajnikoma in dvema sprejemnikoma PZE pretvornikoma, postavljenima na razdalji L . Oba oddajnika se vzbujata istočasno s sunkom napetosti, ki generira kratek UZ sunek. Sprejemnik 1 se vzbudi v trenutku $t_1 = L / (c + v \cos \alpha)$, sprejemnik 2 pa v trenutku t_2

= $L / (c - v \cos \alpha)$. Električna sunka, generirana v PZE senzorjih, se koristita kot start/stop bistabilnega vezja, ki generira sunek v trajanju:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2L v \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \approx \frac{2L v \cos \alpha}{c^2} . \quad (61)$$

Trajanje sunka Δt , ki se meri s 'timer-jem', je torej sorazmerno hitrosti fluida. Če se namesto sunkov uporablja kontinuiran signal, se hitrost v lahko določi s fazno zakasnitvijo signala 2 glede na signal 1.

Glavni vzrok napake so spremembe hitrosti zvoka zaradi sprememb temperature in sestava fluida, ker v gornji enačbi c nastopa s kvadratom. UZ merilci se pogosteje uporabljajo za merjenja pretoka v tekočinah in manj v plinih. Njihova prednost je, da ne ovirajo pretoka. Frekvenca UZ za merjenja v tekočinah znaša (1 do 5) MHz, za merjenja v plinih pa (0.2 do 0.5) MHz.

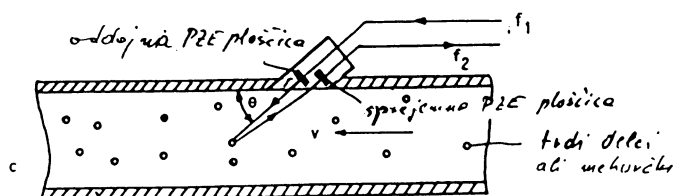
Na sliki 28 je prikazan princip Dopplerjevega ultrazvočnega merilca pretoka. V steni cevi sta vgrajeni dve glavi, vsaka s svojim PZE senzorjem. Ena deluje kot oddajnik, druga kot sprejemnik. Oddajnik pošlje UZ sunek frekvence f_1 , ki ga, po odboju na mehurčku ali trdem delcu, sprejme sprejemnik. Zaradi Dopplerjevega efekta je frekvenca sprejetega sunka f_2 spremenjena. Razlika frekvenc $\Delta f = f_1 - f_2 = f_D$, kjer je f_D Dopplerjev premik frekvence:

$$f_D = \frac{2 v \cos \theta}{c} f_1 . \quad (62)$$

Merjeno hitrost fluida je torej:

$$v = \frac{\Delta f}{2 f_1 \cos \theta} c . \quad (63)$$

Na delo takega pretvornika vpliva koncentracija delcev in njihova velikost in razporeditev hitrosti fluida po preseku. Točnost take naprave je majhna ($\pm 5\%$) in se zato uporablja bolj kot indikator.



Slika 28: Princip Dopplerjevega ultrazvočnega merilca

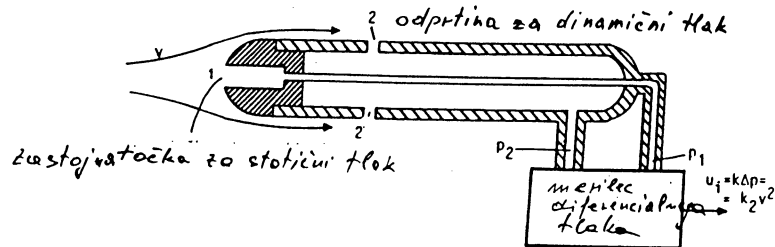
11. Pitot-Prandtlova cev

Pitot-Prandtlova cev predstavlja široko uporabljen senzor za merjenje hitrosti tako v odprtih kot v zaprtih pretokih fluida, zlasti plinov. Cev ima dve odprtini (slika 29). S pomočjo odprtine 1 se meri statični tlak, ker je na njej $v = 0$. S pomočjo odprtine 2 se

meri tlak p , ker je tu hitrost dejanska hitrost fluida. Z uporabo Bernoullijeve enačbe za razliko tlaka dobimo:

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2} . \quad (64)$$

Na izhodu diferencialnega pretvornika za merjenje tlaka, dobimo signal sorazmeren kvadratu hitrosti (podobno kot pri merilcih z dušilnimi elementi). Pitot-Prandtlova cev se uporablja za merjenje hitrosti avionov, pretokov plina v ceveh, kalibracijo anemometrov, itd.



Slika 29: Pitot-Prandtlova cev

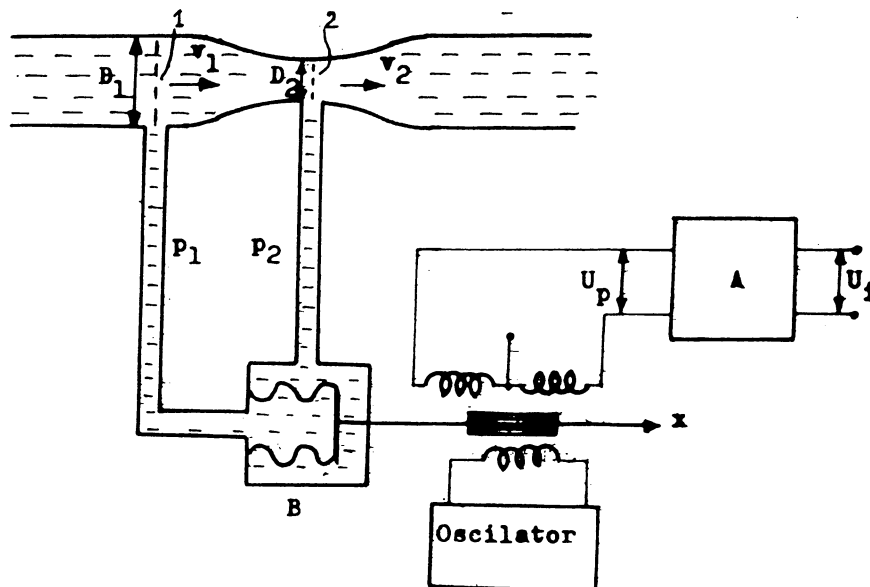
Naloga Fiz-mer: Pretok

1) Merjenje pretoka vode Q se vrši s pomočjo Venturijeve cevi, slika 1. Razlika tlakov v širšem in ožjem delu cevi se s pomočjo elastičnega elementa B pretvori v pomik x jedra induktivnega pretvornika. Izhodna napetost induktivnega pretvornika U_p se ojača z ojačevalcem A. Karakteristika elastičnega elementa je $x = K_1 \Delta p$, medtem ko je izhodna napetost induktivnega pretvornika $U_p = K_2 x$.

a) Izračunaj izhodno napetost U_p pri pretoku $Q = 10$ l/s.

b) Kakšno karakteristiko mora imeti ojačevalnik, da bo izhodna napetost U_i linearna funkcija pretoka.

Podatki: $D_1 = 16$ cm, $D_2 = 8$ cm, $C = 0.95$, $K_1 = 5 \times 10^{-4}$ mm/Pa, $K_2 = 0.5$ V/mm



2) Za merjenje hitrosti zraka se koristi anemometer s konstantno temperaturo vroče žice. Visokoomski voltmeter, paralelno priključen segrevani žici, pokaže napetost $U_1 = 1.1$ V pri hitrosti $v_1 = 4.5$ m/s in $U_2 = 1.3$ V pri hitrosti $v_2 = 9$ m/s. Določi napetost pri hitrostih $v_3 = 0$ in $v_4 = 12$ m/s.

Fiz-mer. :

Analiza plinskih komponent - nadzor nad izpušnimi plini

Vsebina:

- Sestavine izpušnih plinov
- Odvzemanje vzorcev plina
- Merjenje koncentracij NO_x ($NO + NO_2$)
- Merjenje nezgorelih ogljikovodikov HC
- Merjenje koncentracij CO , CO_2
- Merjenje SO_2
- Analizatorji O_2
- Merjenje koncentracij saj v dimnih plinih

Tabela 1: Glavni toksični onesnaževalci v izpušnih plinih

Onesnaževalec	Vir	Učinki
CO (ogljikov monoksid)	delno zgorelo gorivo	strupen plin za vdihavanje; CO pride v kri in se veže s hemoglobinom, kar povzroča slabšo oskrbo telesa s kisikom
HC (ogljikovodik)	nezgorelo gorivo, hlapi goriva, ki uhajajo iz sistema za dovod goriva	draži nos in oči; rakotvorna snov; smrad
C (ogljik)	delno zgorelo gorivo	dim poslabša vidnost; lahko prenaša rakotvorne sestavine; smrad
NO_x (oksidi dušika NO in NO_2)	zelo visoka temperatura povzroči vezavo dušika s kisikom	strupen; veže se z vodo v dušikovo kislino, ki povzroča težave s pljuči; draži nos in oči ter vpliva na živčni sistem; sestavina smoga
SO_2 (dioksid žvepla)	nastaja z zgorevanjem premoga in težkih goriv	strupen; veže se z vodo v žvepleno kislino, ki povzroča težave dihalnih organov
saje, delčki	produkt zgorlega goriva	draži nos in oči; smrad;
Pb (svinec)	oddatek k bencinu zaradi višjega oktanskega števila	strupen; povzroča zastrupitve in živčne težave

V l. 1992 je Svet EGS omejitve o izpušnih plinih izenačil s standardi v ZDA. Ustrezne vrednosti, ki morajo zdržati vsaj 80.000 km, izražene v g/km so:

$$HC = 0.41 \quad CO = 3.4 \quad NO_x = 1.0$$

Enote v uporabi pri merjenju onesnaženja zraka so volumske ali masne. Prava masna enota je kg/m^3 , primerna pa g/m^3 ali $\mu g/m^3$. Volumska enota največ v uporabi je 'parts per million' (ppm) definirana kot

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ volumen plina onesnaževalca}}{10^6 \text{ volumnov (zrak + plina)}} \quad \text{ali } 0.0001 \% \text{ volumna.}$$

Za konverzijo volumskih enot v masne je treba poznati molekularno maso onesnaževalca M_{ones} , da se lahko izračuna njegov volumen pri dani temperaturi T in tlaku p . Pri predpostavki idealnega plina se ustrezna konverzija izvede po enačbi

$$\frac{m_{\text{ones.}}}{V} = (\text{ppm}) \frac{M_{\text{ones.}} \cdot p}{RT} 10^{-6} .$$

$$\frac{m_{\text{ones.}}}{V} = \text{koncentracija onesnaževalca (v } g/m^3); \quad R = 8300 \text{ J/K (splošna plinska konstanta)}$$

Tabela 2: Masna koncentracija za 1 ppm važnejših onesnaževalnih plinov pri 1 atm

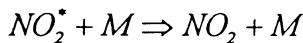
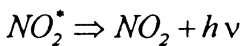
Onesnaževalec	Masna koncentracija (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	0 °C	25 °C
CO	1250	1145
NO		1230
NO ₂		1880
SO ₂	2860	2620

Merjenje koncentracij NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$)

Za analizo NO_x obstaja več metod od katerih se največ uporabljata dve:

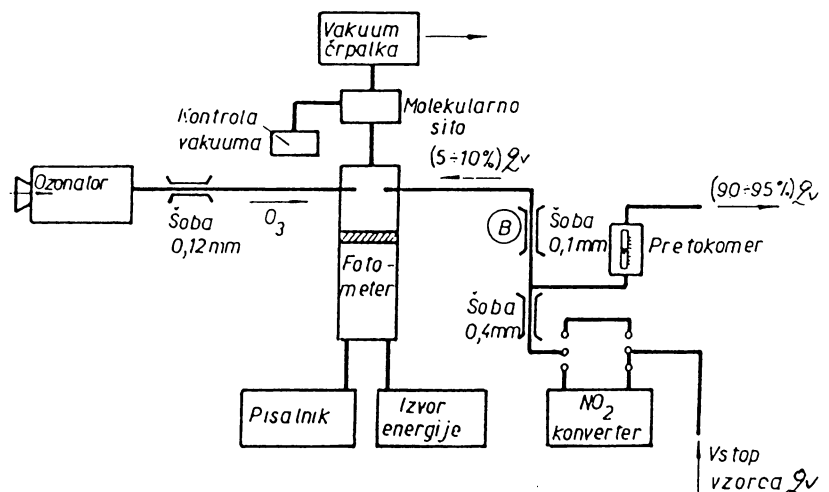
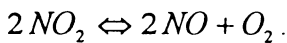
- Salzmanova (kemijska); obseg: (0 ÷ 5) ppm
- kemiluminiscentna

Kemična luminiscenca nastane pri reakciji NO z O_3 . Metoda temelji na registraciji infra-rdečega sevanja $h\nu$, ki se emitira, če se medsebojno pomešata NO in O_3 v reakcijski posodi v kateri obstoja visok vakuum. Osnovne reakcije so:



$$U_{\text{fol}} \propto q_V C_{\text{NO}}$$

Opisana metoda omogoča določanje koncentracije NO . Če je potrebno izmeriti koncentracijo NO_x , je treba prej izvršiti konverzijo NO_2 v NO , kar se odvija po naslednji reakciji:



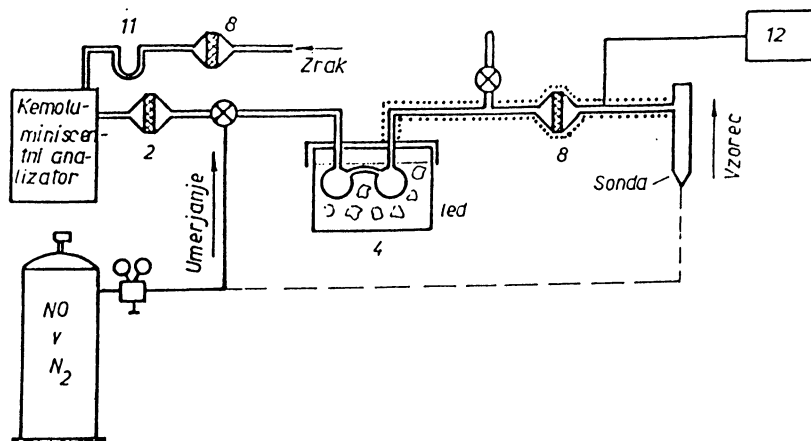
Slika 1: Shema NO_x analizatorja

Prednosti:

- relativno široko merilno področje koncentracij NO v NO_x , obseg nekaj ppb do 10000 ppm.
- možnost kontinuirane analize
- relativno visoka natančnost ($\pm 1\%$)

Slabe strani:

- zaradi majhnih pretokov skozi kapilarne cevke (doziranje plina v reakcijsko komoro) je potrebno zelo dobro čiščenje vzorca (izločanje delčkov, vlage in težjih frakcij NO_2 , slika 2)
- instrument je treba pogosto umerjati



Slika 2: Shema čiščenja plinov v NO_x analizatorju

2-fini stekleni filter ($2 \div 8$) μm , $\phi=60$ mm

3-teflonska cev (linija umerjanja)

4-kondenzacijska posoda

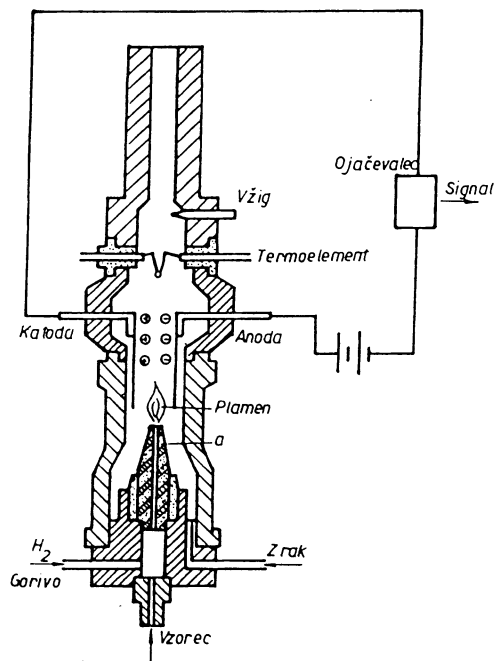
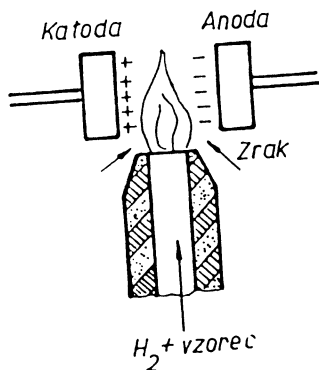
8-grobi stekleni filter; se segreva na $(110 \div 120)$ $^{\circ}C$,
poroznost $(110 \div 150)$ μm , $\phi = 80$ mm

11-kolona napolnjena s silika-gelom za odvzem vlage iz zraka

12-sistem za regulacijo temperaturne linije za odvzem vzorca

Merjenje nezgorelih ogljikovodikov HC

Za merjenje koncentracij nezgorelih HC se uporablja plamensko-ionizacijski detektor (Flame Ionization Detector - FID)



Slika 3: a) princip delovanja plamensko-ionizacijskega detektorja, b) shema tipičnega aparata

V primeru, da v gorilnik dovajamo H_2 in je okrog njega zrak, nastaja v plamenu majhna količina ionov. Če pa vodik dodajamo samo majhno količino HC komponent, začne ionski tok naraščati.

Važna sta dva dela: izvor ionov in ionski kolektor, ki ga sestavljata dve elektrodi med katerima je napetost ~ 400 V. Pozitivni ioni in elektroni (+ negativni ioni) se formirajo v plamenu, če so prisotni C atomi. Leti se zbirajo na katodi oziroma anodi, odvisno od predznaka njihovega naboja. Ionski tok povzroča na serijsko vezanem upor padec napetosti, ki se ojača in registrira. Padec napetosti ΔU je sorazmeren ionskemu toku I_{ion} , ta pa snovnemu pretoku HC oz. koncentraciji C_{THC} v plamenu.

$$\Delta U \propto I_{ion} \propto C_{THC}$$

S to metodo se lahko določuje koncentracijo:

- a) C_{THC} vseh prisotnih HC (THC - total HC) ali
- b) posameznih komponent HC v plinski zmesi s poprejšnjo ločitvijo v kolonah z uporabo plinske kromatografije (Gas Chromatography - GC, metoda s področja analitične kemije).

Prednosti:

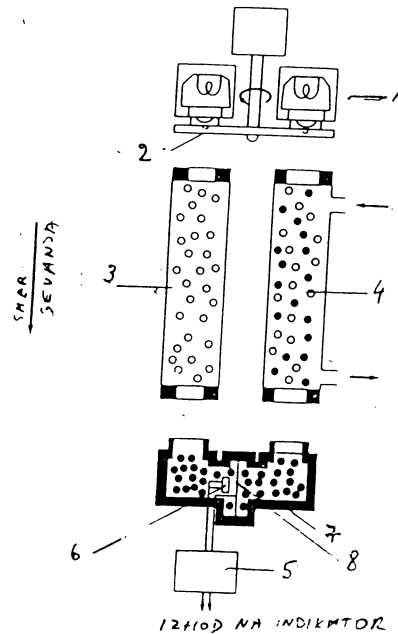
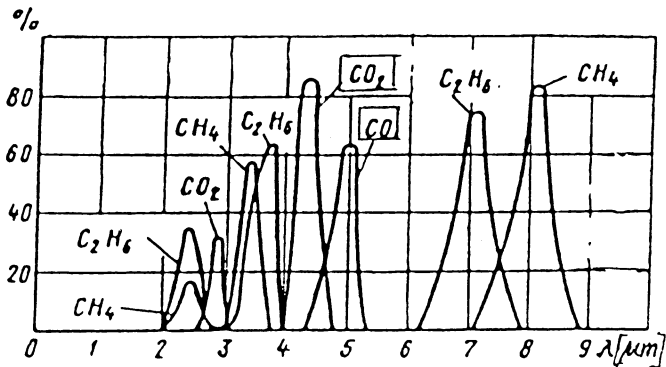
- visoka občutljivost (registrira koncentracije do 1 ppm),
- meritve so kontinuirane,
- hitro reagiranje (majhna inercija 0.1 do 0.2 s),
- široko področje linearosti (do 10^7 ppm),

Slabe strani:

- porušitvena metoda (po detekciji kontrola ni več možna)
- občutljiva na spremembe pogojev v detektorju (npr., presežek kisika v vzorcu).

Merjenje koncentracij CO, CO₂

Merjenje koncentracij CO in CO₂ temelji na absorpciji infrardečega (IR) sevanja (Nondispersive Infrared Analysator - NDIR).



Slika 4: Absorpcijski spekter izbranih plinov v IR spektralnem področju
Slika 5: Shema naprave za merjenje koncentracij CO in CO₂ na osnovi absorpcije IR sevanja

- 1-vir IR svetlobe 3-primerjalna celica 5-oscilator 7-detektor
- 2-zaslonka 4-merilna celica 6-kapacitivni senzor 8-membrana

Detekcija poteka na osnovi razlike jakosti sevanja, ki nastane zaradi absorpcije po zakonu:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda L}$$

kjer je k_λ koeficient absorpcije monokromatske svetlobe sorazmeren koncentraciji merjene komponente

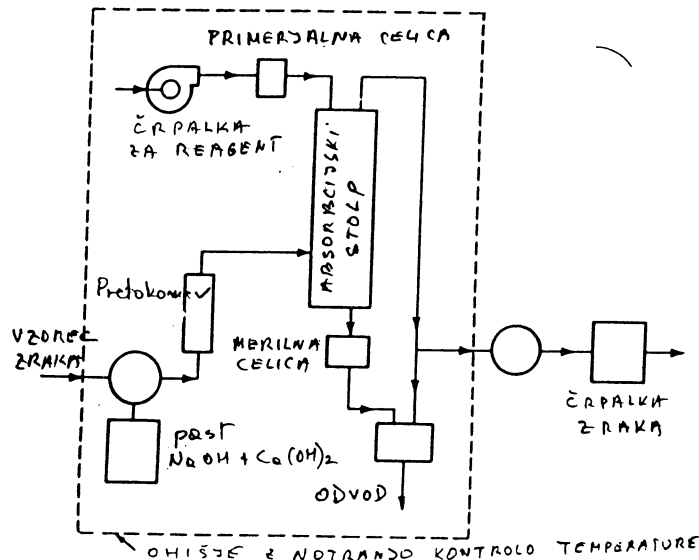
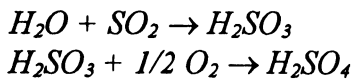
C_{CO} ali C_{CO_2} .

L = optična pot žarka skozi celico; I_0, I = jakost sevanja izvora oz. jakost po prehodu skozi celico

Sledi torej, da je $C_{CO} (C_{CO_2}) \propto \ln I/I_0$. Obseg: (0 ÷ 150) ppm

Merjenje SO_2

SO_2 spada med važnejše onesnaževalca, zato obstoja več metod za merjenje od katerih bomo opisali le metodo osnovano na merjenju električne prevodnosti. Merjenje elektroprevodnosti bazira na oksidaciji SO_2 in tvorbo sulfatnih ionov, ki spremenijo električno prevodnost raztopine sorazmerno koncentraciji C_{SO_2} . Z vodo kot reagent nastopajo naslednje reakcije:



Slika 6: Shema elektro-prevodnostnega analizatorja SO_2

Na prevodnostno celico se privede izmenična napetost. Z meritvijo toka I se določi upornost R oz. prevodnost, ki je sorazmerna C_{SO_2} :

$$I \propto 1/R \propto C_{SO_2}$$

Ničlo instrumenta dobimo, če pošljemo vzorec zraka čez past napolnjeno z mešanico $NaOH$ in $Ca(OH)_2$, ki v celoti absorbira v vzorcu prisoten SO_2 . Pri tem pogoju sta električna prevodnost referenčne in merilne celice enaki.

Kemijske metode:

- kolorimetrija
- coulometrija

Analizatorji O_2

1. Termo-magnetni analizator O_2

Če snov položimo v magnetno polje, se gostota magnetnega polja \vec{B} na območju snovi spremeni, in sicer se poveča ali zmanjša. Magnetno polje inducira v snovi tokovne zanke, katerih magnetni momenti se postavijo bodisi v smer zunanjega magnetnega polja ali v nasprotno smer. Vpliv snovi na gostoto magnetnega polja popišemo s permeabilnostjo μ :

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 = \mu \mu_0 \vec{H},$$

kjer je

\vec{B}_0 = gostota magnetnega polja v vakuumu

\vec{H} = magnetna poljska jakost (odvisna le od zunanjih električnih tokov)

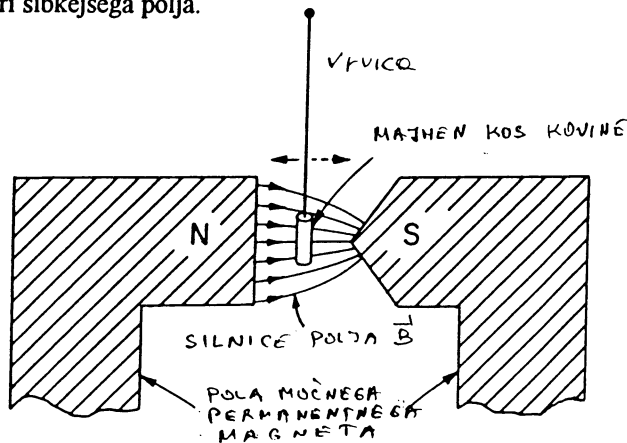
μ_0 = induksijska konstanta ($4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am)

Glede na vrednost permeabilnosti μ razdelimo snovi v tri skupine:

- diamagnetne snovi ($Bi, Cu, Ag, H_2O, CO_2, H_2$) z $\mu \approx 1$, vendar $\mu < 1$ in $1 - \mu \ll 1$. \vec{B} se oslabi, če v polje položimo diamagnetno snov.
- paramagnetne snovi ($Cr, Pt, Zn, O_2, N_2, zrak$) z $\mu \approx 1$, vendar $\mu > 1$ in $1 - \mu \ll 1$. \vec{B} se nekoliko ojači, če v polje položimo paramagnetno snov.
- feromagnetne snovi (Fe, Ni, Co), ki imajo izredno velik μ ($\mu \gg 1$).

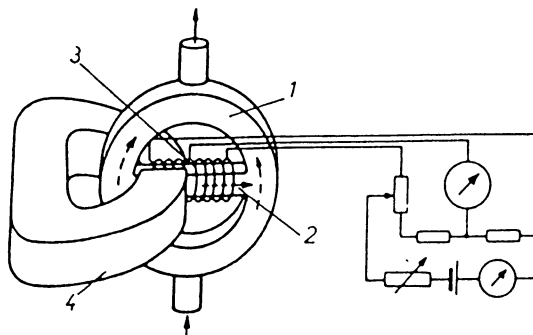
Feromagnetizem je potenciran paramagnetizem in je povezan z kristalno strukturo snovi.

Če snov položimo v homogeno magnetno polje, se \vec{B} sicer spremeni, toda na snov v celoti ne deluje nobena sila. Drugače je, če snov položimo v nehomogeno magnetno polje, to je polje, katerega gostota \vec{B} se s krajem spreminja. Na snov v nehomogenem magnetnem polju deluje magnetna sila \vec{F}_M , ki vleče snov v smeri močnejšega magnetnega polja, če je snov para- ali feromagnetna, medtem ko se diamagnetna snov premakne v smeri šibkejšega polja.



Slika 7: Obnašanje diamagnetne in paramagnetne snovi v nehomogenem magnetnem polju

Premik feromagnetne snovi koristimo za senzorje pomika, za merjenje električnega toka (A-meter na mehko železo), ipd. Rahlo privlačno magnetno silo \vec{F}_M (v smeri naraščajočega magnetnega polja - gradienta $\partial B / \partial x$) na paramagnetne molekule O_2 , uporabljamo v tz. termo-magnetnem analizatorju O_2 .



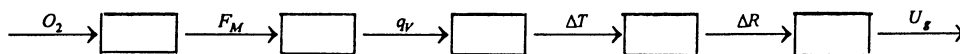
Slika 8: Termo-magnetni analizator O_2 (sistem Hartmann-Braun)

1- steklena cev 2- medeninasta cev 3- upora 4- permanentni magnet

Plinski vzorec se pretaka po stekleni cevi (1). V horizontalni cevi (2) sta dve veji Wheatstonovega mosta z uporoma (uporovne žice) R_3 in R_4 (3). Če v vzorcu ni O_2 , se skozi horizontalno cev ne pretaka noben plin. Most je v ravnovesju, kazalec indikatorja je na '0'. Če je v vzorcu plina tudi O_2 se le-ta pod vplivom magnetnega polja permanentnega magneta (4) vsesa v horizontalno cev. Sila F_M je podana z naslednjo enačbo:

$$F_M = C_{O_2} (\mu - 1) T_0^2 \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_0^2} \right) \frac{p}{p_0} B \frac{\partial B}{\partial x} \propto C_{O_2}.$$

S tem nastane pretok plina q_V , ki hladi upora in jima spreminja upornost. Prenos toplote oz. hlajenje uporov je sorazmerno pretoku q_V , ta pa koncentraciji C_{O_2} .



Slika 9: Strukturna shema principa delovanja termo-magnetnega analizatorja

Čas reakcije merilnega sistema je odvisen od njegove prostornine in znaša (20 ÷ 60) s.

Prednosti:

-instrument je enostaven in cenen.

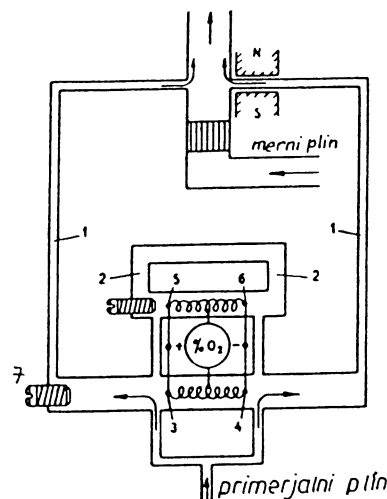
Pomanjkljivosti:

-stalno umerjanje analizatorja z najmanj dvema vzorcema,

-napaka ± 2% (velika) od merilnega območja, najmanjši merilni obseg (0 ÷ 1) %,

-majhna občutljivost.

2. Uporovno-magnetni analizator O_2 (sistem Maihak)



Slika 10: Shema uporovno-magnetnega analizatorja O_2

Aparat ima dva kanala, 1 in 2, ter termično sondo, ki je sestavljena iz dveh skupin uporov 3, 4 in 5, 6 (katerih upornost je odvisna od temperature), ki so sestavni del Wheatsonovega mosta ter jih grejemo s tokom mosta.

Primerjalni plin (zrak) teče skozi obe veji kanala 1 in vstopa iz nasproti ležečih reg v merni kanal. Tu se pomeša z mernim plinom (vzorcem) in izstopa iz instrumenta. Ena veja kanala 1 se nahaja v nehomogenem polju močnega permanentnega magneta. Pretočna upora v obeh vejah kanala 1 sta z ventilom 7 nastavljena tako, da sta v primeru enakosti koncentracij O_2 v primerjalnem (zrak) in mernem (vzorc) plinu enaka. Pretok je torej simetričen. V primeru, da je koncentracija O_2 v vzorcju večja, nastane v izstopni regi primerjalnega plina zaustavni tlak Δp (na strani magneta) zaradi paramagnetnega učinka:

$$\Delta p \propto B^2 (\mu_{pr} - \mu_{vz})$$

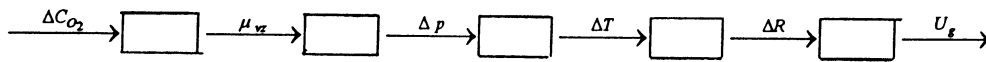
μ_{pr} = permeabilnost primerjalnega plina (npr. zrak v katerem je $C_{O_2}^{pr} = 20.8\%$)

μ_{vz} = permeabilnost O_2 sorazmerna koncentraciji $C_{O_2}^{vz}$ vzorca, ki jo želimo izmeriti

Razlika tlakov povzroči prečni pretok plina ob termični sondi 3, 4. Zaradi konvektivnega prenosa toplote se sonda ohladi, spremeni se upornost in ravnovesje Wheatsonovega mosta se podre, diagonalna napetost U_g pa je sorazmerna razliki koncentracij v primerjalnem in mernem plinu:

$$\Delta C_{O_2} = (C_{O_2}^{vz} - C_{O_2}^{pr})$$

Vrednosti U_g so velikosti nekaj mV za 1 % razlike ΔC_{O_2} .



Slika 11: Strukturna shema principa delovanja uporovno-magnetnega analizatorja

3. Analizator O_2 s trdim elektrolitom:

Če sta p in T , tlak in temperatura sistema plinske zmesi zajete v volumnu V , je parcialni tlak plina:

$$p_i V = n_i RT,$$

kjer je

p_i = parcialni tlak (koncentracija) 'i' komponente plina

n_i = število molov plinske komponente 'i'

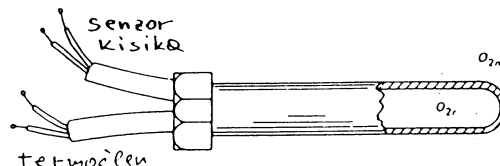
Koncentracija komponente 'i' je po definiciji:

$$C_i \equiv \frac{n_i}{n} p = \frac{n_i}{V} = \frac{p_i}{RT} \propto p_i \propto p_{vz}$$

n = skupno število molov

p_{vz} = neznani parcialni tlak oz. neznana koncentracija O_2 v plinski zmesi vzorca

Na sliki 12 je prikazan preprost senzor iz ZrO_2 keramike, ki se veliko uporablja za kontrolo zgorevanja v industrijskih pečeh (dimnikih) in motorjih z notranjim izgorevanjem (izpušna cev). Senzor se sestoji iz cevi narejene iz ZrO_2 keramike, ki je z obeh strani, notranje in zunanje, prevlečena s poroznima Pt elektrodama. Cev je na enem koncu zaprta. Na notranjo stran se dovaja zrak (primerjalni plin O_{2pr}), z zunanje strani pa senzor obliva merjeni plin (vzorec) z neznano koncentracijo kisika (O_{2vz}). Senzor vključuje tudi uporovni senzor temperature ali Pt/Rh termočlen, ker je za evalvacijo koncentracije potrebno poznati tudi T .



Slika 12: Senzor O_2 iz ZrO_2 keramike

Nad približno $500\text{ }^\circ\text{C}$ ZrO_2 postane prepusten za kisikove ione.

Rezultat je nastanek galvanskega člana, v tem primeru 'koncentracijskega člana', katerega galvanska napetost med elektrodama E_0 je podana z naslednjo (Nernst-ovo) enačbo:

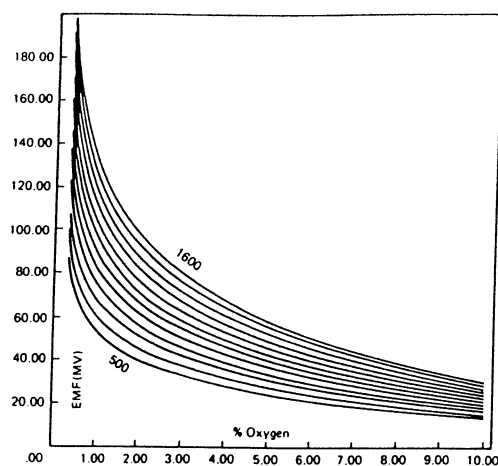
$$E_0 = 0.0215 T \ln \frac{p_{O_{2pr}}}{p_{O_{2vz}}} \quad (\text{v } mV),$$

kjer je

T = absolutna temperatura (v $^\circ\text{K}$)

$p_{O_{2vz}}$ = parcialni tlak (oz. koncentracija) O_2 (v %) v merjenem plinu (vzorec) zunaj cevi

$p_{O_{2pr}}$ = parcialni tlak (oz. koncentracija) O_2 v primerjalnem plinu (običajno atmosferski zrak $p_{O_{2pr}} = 21\%$)



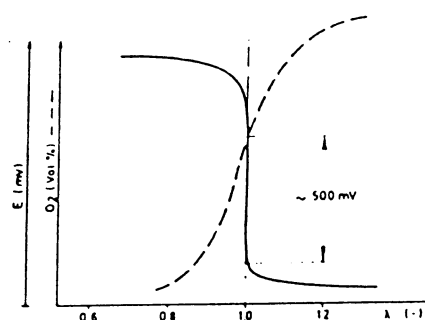
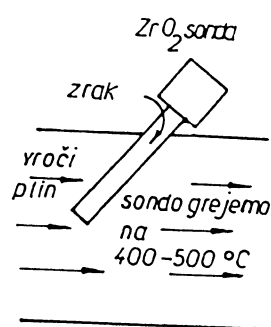
Slika 13: Odvisnost napetosti ZrO_2 sonde od koncentracije O_2 v mernem plinu (zrak kot primerjalni plin) in od temperature

Natančnost je tipično $\pm 1\%$, ko je koncentracija $C_{O_2} > 2\%$. Odzivni čas je ~ 5 s.

Primer praktične aplikacije direktnega merjenja v reakcijski posodi je λ -sonda vgrajena v izpušno cev avtomobila. λ je relativni razmernik zraka:

$$\lambda = \left(\frac{m_{zrak}}{m_{gor}} \right)_{dej} / \left(\frac{m_{zrak}}{m_{gor}} \right)_{steh}$$

Shema aplikacije je prikazana na sliki 14a. Zaprti cev obliva izpušni plin, notranjost pa čisti zrak. Ker je aktivnost ZrO_2 elektrolita odvisna od T in šele pri višjih temperaturah daje uporabne napetosti (slika 13), se sonda segreva (vzdržuje konstantna temperatura, ki se meri s termočlenom ali uporovnim elementom).



**Slika 14: a) Shema neposrednega merjenja koncentracije O_2 v izpušni cevi
b) odvisnost E_0 oz. C_{O_2} od λ .**

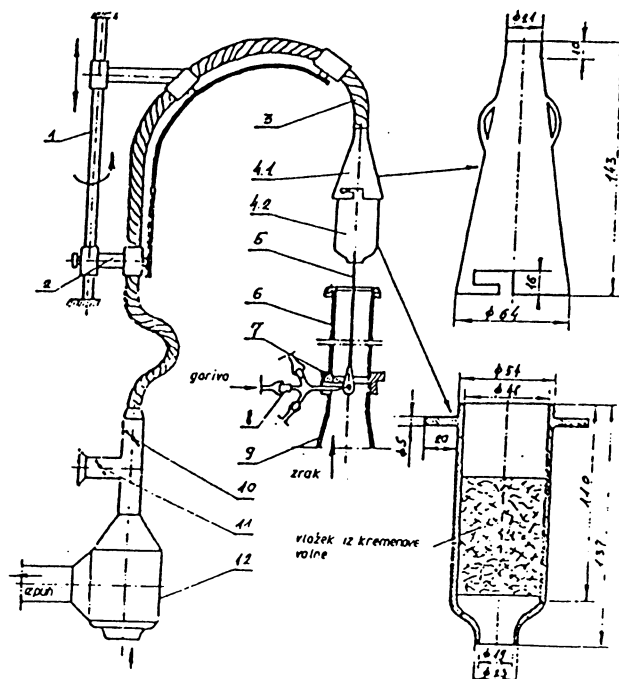
Iz enačbe (1) sledi, da je E_0 logaritemska funkcija, kar pomeni, da se z znižanjem koncentracije O_2 signal povečuje (slika 13). To omogoča zelo točno merjenje malih koncentracij, kar je pri ostalih sistemih problem.

Merjenje koncentracij saj v dimnih plinih

Velikost delcev saj znaša $(0.01 \div 0.1) \mu m$.

Gravimetrijska metoda

Gravimetrijska metoda je neposredna in je osnovana na merjenju teže vzorca saj, ki ga izločimo iz pretoka dimnih plinov. Na sliki 15 je prikazana naprava (laboratorijska uporaba) za odvzem vzorca saj v dimnih plinih.



Slika 15: Naprava za gravimetrijsko določevanje koncentracije saj v dimnih plinih

1-podpornik, 2-nosilec, 3-fleksibilna cev, 4.1-stekleni vložek, 4.2-stekleni zbiralnik, 5-tok dimnih plinov, 6-zgorevalna komora, 7-plamen, 8-dovod goriva, 9-končni vstopni del gorilnika, 10,11-loputa, 12-ventilator

Za tehtanje vzorca je potrebna natančna tehtnica (10^{-4} g). Iz toka dimnih plinov lahko vzamemo celotni ali časovni vzorec in ga usmerjamo skozi vložek iz kremenčeve volne, ki je vstavljen v posebni stekleni zvončasti nosilec. Pri pretoku skozi vložek se saje zadržijo na vati, plini pa izhajajo v izpuh. Razlika v teži vložka pred in po končanem odvzemu ΔG pomeni težo saj. Z meritvijo pretoka q_V dobimo celotno prostornino dimnih plinov ΔV ;

$$\Delta V = q_V \Delta t,$$

kjer je Δt čas odzemanja vzorca. Koncentracija saj (v g/m^3) je

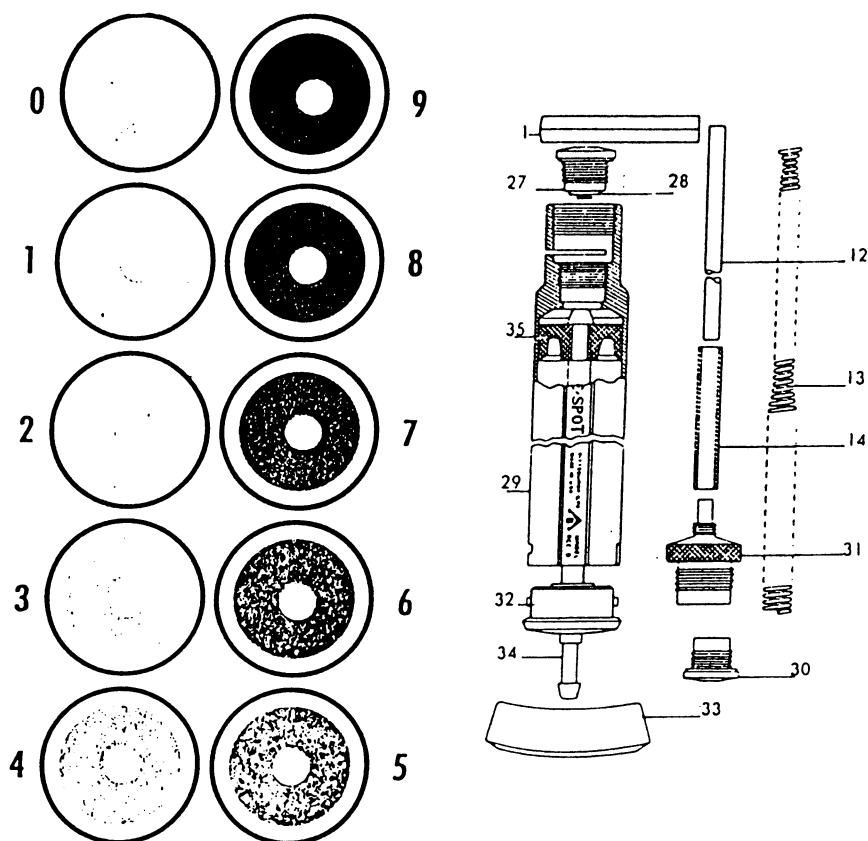
$$C_{saje} = \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{\Delta G}{q_V \Delta t}.$$

Metoda s filterskim papirjem

Pretok plinov spuščamo skozi filterski papir na katerega se vsedajo saje. Načeloma tudi obstaja možnost, da se maso saj, ki je ostala na filterskem papirju, določi s tehtanjem, vendar je v tem primeru razmerje $m_{\text{filter papir}} / m_{\text{saje}} \approx 1000/1$ zelo neugodno, kar povzroča veliko netočnost. Zaradi tega določamo koncentracijo saj indirektno s primerjavo z vzorcem. Glede na to obstaja več metod.

1) Primerjava počrnelosti filterskega papirja z vzorci različne črnosti, ki so kot fotografske slike nanizane v obliki lestvice od popolnoma bele (saj ni v dimnih plinih) do popolnoma črnega vzorca. En primer je tz. Baharachova tabela po kateri ima vsaka stopnja črnosti svojo redno številko (dimno število) od 0 do 9.

Tabela velja pri odvzemu $\Delta V = 36870 \text{ cm}^3$ vzorca dimnih plinov na 1 cm^2 filtrirane površine. Princip je zelo podoben Bosch-evi metodi določanja črnosti z razliko, da se ujemanje vzorca s tabelo določa vizuelno.

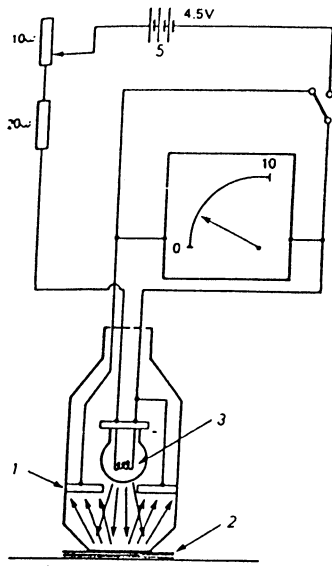


**Slika 16: a) Baharachova tabela za določanje črnosti dimnih plinov
b) Baharachova ročna črpalka za odvzem vzorca saj**

Legenda: 1-objemka, 12-sesalna cev, 14-cev, 27-tesnilo, 28-ventil, 29-valj, 30-pokrov, 31-vijak, 32-pokrov valja, 33-ročaj, 34-drog, 35-tesnilo bata

Odvzemanje delnega časovnega vzorca poteka s posebnimi napravami, ki lahko jemljejo vzorec v določenih časovnih intervalih. Sestavljene so iz črpalke za sesanje dimnih plinov, mehanizma za pomik papirnega traka in drugih enot, odvisno od zahtev. Navadna Baharachova ročna črpalka je prikazana na sliki 16b.

2) Na dizel motorjih se v ta namen uporablja t.z. Bosch-ova metoda (Bosch³ namreč proizvaja naprave za odvzem vzorca izpušnih plinov in instrumentov za določanje črnosti filterskega papirja). Podobno kot v primeru metode 1) se delni časovni vzorec odvzema s pomočjo črpalke z batom (slika 16b). V izrez 'A' črpalke postavimo filterski papir površine 8 cm^2 . Pri aktiviranju bata se na njegovi poti v zgornjo mrtvo točko vsesa $(280 \div 330) \text{ cm}^3$ plinov. Saje ostanejo na filterskem papirju. Vrednotenje črnosti papirja določamo z merjenjem dela svetlobnega toka, ki ga saje absorbirajo (oziroma, ki se reflektira od beline filterskega papirja) s pomočjo fotoojačevalca oblike prstana (slika 17). Svetlobni tok pada na filterski papir na katerem je sajasti madež. Koncentracija se izraža z enotami od 1 (popolnoma bel papir) do 10 (popolnoma črn papir). Metoda je primerna za določevanje koncentracije saj v produktih zgorevanja pri stacionarnih pogojih obratovanja. Instrument se običajno umerja po 10-ih meritvah. Priložena tabela daje gravimetrijski ekvivalent Bosch-ovih enot (Tabela 3).

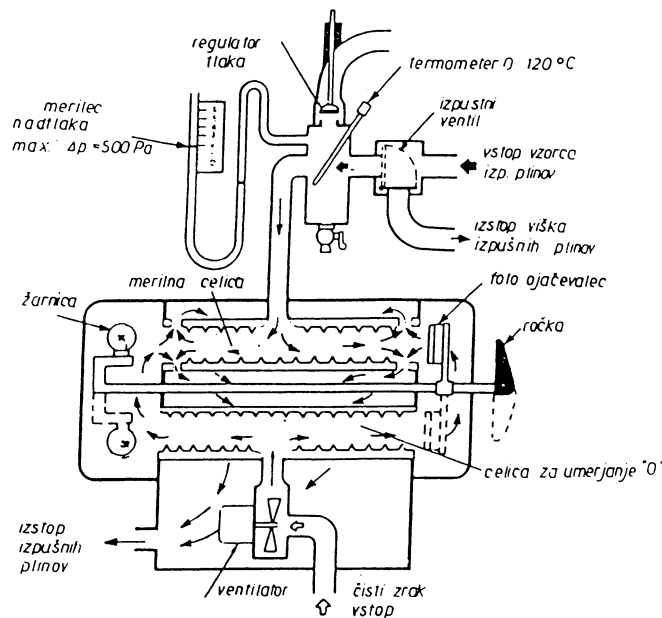


Bosch.	Masna konc. g/m ³	Bosch.	Masna konc. g/m ³
1,0	0,028	4,0	0,279
1	0,033	1	0,295
2	0,037	2	0,311
3	0,041	3	0,329
4	0,046	4	0,347
5	0,051	5	0,366
6	0,056	6	0,386
7	0,062	7	0,407
8	0,068	8	0,429
9	0,074	9	0,450
2,0	0,079	5,0	0,474
1	0,086	1	0,499
2	0,092	2	0,525
3	0,099	3	0,551
4	0,107	4	0,579
5	0,115	5	0,607
6	0,123	6	0,636
7	0,131	7	0,666
8	0,139	8	0,698
9	0,139	9	0,730
3,0	0,156	6,0	0,763
1	0,166	1	0,796
2	0,175	2	0,832
3	0,186	3	0,869
4	0,197	4	0,906
5	0,209	5	0,943
6	0,22	6	0,980
7	0,236	7	1,019
8	0,249	8	1,058
9	0,264	9	1,097
4,0	0,279	7,0	1,136

Slika 17: Fotojačevalec za določanje saj po metodi Bosch
Tabela 3: Gravimetrijski ekvivalent Bosch-ovih enot

3) Metoda absorpcije svetlobe (metoda Hartridge)

Osnovna prednost te metode je, da se merjenje koncentracije saj v izpušnih plinih motorja (ali drugega energetskega postroja) vrši kontinuirano.



Slika 18: Shema Hartridge-ovega aparata za merjenje koncentracije saj v izpušnih plinih

Izpušni plini vstopajo v dimno cev dolžine 407 mm. Fotocelica je postavljena na eni strani cevi in meri jakost svetlobe, ki prihaja iz izvora (žarnice) postavljene na drugi strani cevi. Merimo absorpcijo svetlobe do katere pride zaradi delnega slabljenja pri prehodu skozi dimne pline, če ti vsebujejo lebdedeče saje. Ventilator polni dimno cev s svežim zrakom, kadar se vrši umerjanje (dimna vrednost 0). Ta zrak se nato pretaka med odprtim delom cevi in fotocelico oziroma izvorom svetlobe na drugi strani dimne cevi in s tem preprečuje vsedanje delcev saj iz izpušnih plinov na površine celice oz. žarnico. Dimna cev je lahko odprta ali zaprta s steklenimi okenci.

Hartridge-ov aparat deluje po istem principu kot prej opisana naprava za merjenje koncentracije CO, torej po zakonu:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda L} \quad (1)$$

kjer je sedaj $k_\lambda \propto C_{saje}$ (C_{saje} = koncentracija saj)

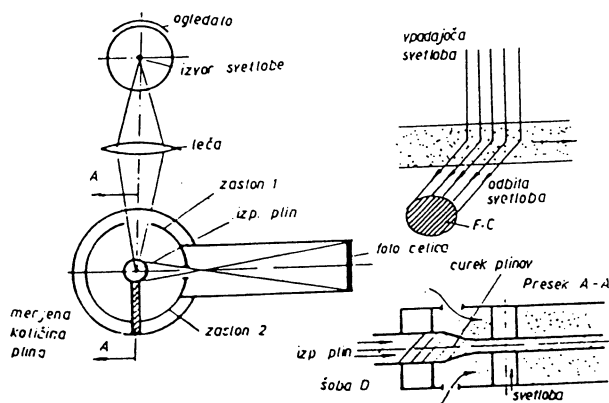
Z logaritmiranjem enačbe (1) dobimo $C_{saje} = konst. \ln(I_0/I)$. (2)

Iz enačbe (2) sledi, da koncentracija saj v izpušnih plinih (in s tem dimno število) raste z I po logaritmični zakonitosti, kar je tudi zakonitost po metodi s filterskim papirjem.

Metoda z odbojem daje direktno koncentracijo saj v g/m^3 . Točnost merjenja koncentracije saj je $(10 \div 20)$ %, ker velikost delčkov tudi vpliva na točnost rezultatov. Granulacija saj se namreč spreminja od motorja do motorja z obremenitvijo in s hitrostnim režimom.

4) Metoda odboja svetlobe

Ta metoda se predvsem uporablja v ZDA. Prostornina vsesanih izpušnih plinov je črno zasenčena. Izpušni plini vstopajo skozi šobo D v obliki curka v sveži zrak (preseki A-A). Ta prostornina curka je osvetljena s svetlobo, ki prihaja iz svetlobnega izvora določene jakosti. S fotocelico, ki je postavljena normalno na curek, merimo jakost od delčkov saj odbite svetlobe, ki je indikacija koncentracije saj v izpušnih plinih. Sveži zrak preprečuje vsedanje delčkov saj na sosednjih površinah. Naprava je primerna za neprekinjene meritve (celo na vozilu v gibanju).



Slika 19: Naprava za merjenje koncentracije saj (dima) v izpušnih plinih po principu odboja svetlobe

Fizikalne meritve: MERJENJE VLAŽNOSTI

Uvod:

Poznavanje vsebnosti vlage v plinih, tekočinah in trdnih snoveh je pomembno za delovanje in/ali avtomatsko kontrolo večjega števila industrijskih procesov. Zrak, ki ni nasičen s paro sprejema vlago iz okolnih objektov z izparevanjem in s tem povzroča njihovo sušenje. Nekatere snovi imajo lastnost, da absorbirajo vlago iz zraka in s tem spremenijo svoje lastnosti oz. kvaliteto (npr., cement). V tekstilni industriji tkanine v gibanju v suhi atmosferi povzročajo statično elektriko, le-ta pa motnje operaterjem in merilnim instrumentom. V proizvodnji elektronskih komponent je zelo suha atmosfera posebne važnosti, prav tako v lesni, prehrabeni in farmacevtski. Merjenje vlažnosti se intenzivno opravlja v meteorologiji in klimatizaciji bivalnih prostorov.

Podatke o vlažnosti je možno dobiti na več načinov od izbire katerega je odvisno tudi podajanje merjenih vrednosti. V vsakdanji praksi se največkrat navaja relativna vlažnost R_v , ki je definirana kot razmerje dejanske mase vodne pare m_p v danem volumnu in mase pare m_{np} , ki bi na temperaturi T nasičila zrak (v istem volumnu):

$$R_v = m_p(T) / m_{np}(T) \quad (1)$$

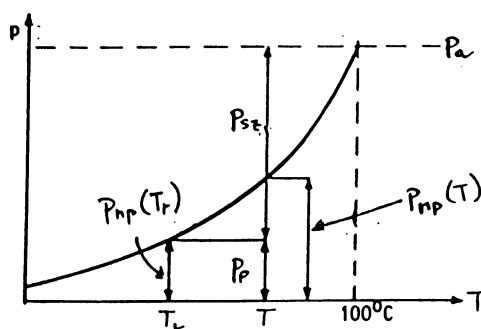
Če privzamemo, da se para obnaša kot idealni plin, velja

$$R_v = (p_p V/RT) / (p_{np} V/RT) = p_p / p_{np} \quad (2)$$

kjer sta p_p parcialni tlak pare in p_{np} parcialni tlak nasičene pare pri isti temperaturi T . R_v se običajno podaja v %. Atmosferski tlak zraka p_a lahko namreč izrazimo kot vsoto parcialnih tlakov, tlaka suhega zraka p_{sz} in tlaka pare p_p ,

$$p_a = p_{sz} + p_p \quad (3)$$

Vsaki temperaturi T ustreza neka maksimalna možna količina pare, ki jo zrak lahko vsebuje. Pri tej maksimalni vlažnosti pravimo, da je zrak nasičen z vodno paro. V kolikor se v tak zrak dovede dodatna količina pare, se le-ta kondenzira v obliki rose. Na sliki 1 je prikazana temperaturna odvisnost tlaka nasičene vodne pare $p_{np}(T)$ v zraku, ki se s temperaturo močno spreminja; npr., $p_{np}(T=100^\circ\text{C}) = p_a = 101.3 \text{ kPa}$ in $p_{np}(T=0^\circ\text{C}) = 0.613 \text{ kPa}$. Na izbrani temperaturi T je prikazan atmosferski tlak p_a , ki je vsota ustreznih parcialnih tlakov, suhega zraka p_{sz} in pare p_p .



Slika 1: Odvisnost tlaka nasičene vodne pare od temperature zraka

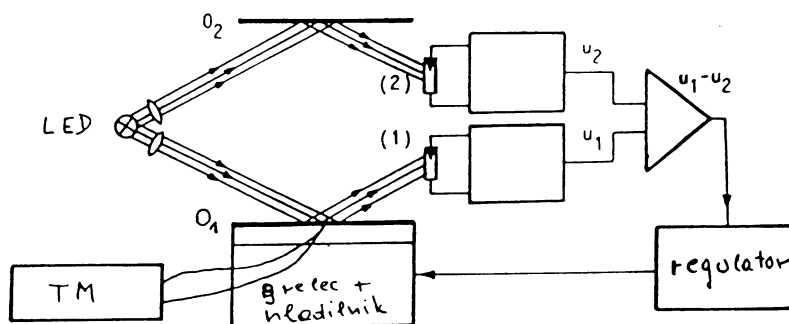
Apsolutna vlažnost je številčno enaka masi vode na enoto volumna in se izraža v g/m^3 . Merjenje apsolutne vlažnosti je osnovano na gravimetrični metodi, tj. na merjenju teže določenega volumna zraka. Najprej se meri teža zraka z normalno vsebnostjo vlage. Nato se z močnim absorberjem vlage upije vsa vlaga in izmeri teža suhega zraka. Iz razlike tež se dobi maso vlage v danem volumnu. Obstaja več variant opisane metod. Te meritve so najbolj natančne ($\sim 0.1\%$) in se opravljajo samo v večjih metroloških laboratorijih.

Merjenje relativne vlažnosti zraka z določanjem temperature rosišča:

Vsaki vrednosti parnega tlaka p_p v zraku s temperaturo T in relativno vlažnostjo $R_v < 100\%$, ustreza temperatura $T_r (< T)$ pri kateri tlak p_p predstavlja tlak nasičene pare $p_{np}(T_r)$. Temperatura T_r se dobi iz diagrama na sliki 1 grafično kot abscisa presečne točke horizontale in krivulje tlaka nasičene pare. Temperatura T_r se imenuje temperatura rosišča. Na ta način se relativna vlažnost lahko izrazi kot

$$R_v = p_{np}(T_r) / p_{np}(T). \quad (4)$$

Na površini predmetov katerih temperatura je manjša ali enaka T_r se vlaga kondenzira v obliki rose ali kapljic. To je osnova merjenja relativne vlažnosti zraka s pomočjo določanja temperature rosišča. Blokova shema ene od avtomatskih naprav za merjenje relativne vlažnosti zraka po tej metodi je prikazana na sliki 2.



Slika 2: Blokova shema naprave za avtomatsko merjenje relativne vlažnosti zraka z določanjem temperature rosišča

Svetloba LED diode se deli na dva enaka žarka, ki se po odboju na ogledalih O_1 in O_2 usmerita na dva enaka fotoelektrična detektorja katerih izhoda sta napetosti sorazmerni jakosti vpadne svetlobe. Obe napetosti se vodita na diferencialni ojačevalnik izhod katerega je sorazmeren razliki jakosti svetlobe z obeh fotocelic. Temperatura ogledala O_1 (fino polirana površina kovine) se nastavlja s pomočjo hladilne naprave (npr., Peltier elementa) in primerne grelec. Meri se jo z majhnim uporovnim senzorjem postavljenim tik pod odbojno površino. Ko je temperatura T ogledala $> T_r$, sta napetosti na fotocelicah enaki in signal na izhodu regulatorja enak nič. Pri tem se aktivira hlajenje, ki ohladi površino ogledala do temperature rosišča T_r . V tem trenutku na površini ogledala O_1 nastane sloj vlage (rose), ki zmanjša jakost svetlobe na fotocelici 1. Regulator tedaj da signal, ki aktivira grelec dokler temperatura ogledala ne poraste nad T_r . Sloj rose izhlapi, napetosti se izenačita in hlajenje se ponovno aktivira. Na ta

način temperatura ogledala oscilira okrog temperature rosenja T_r , ki se jo odčituje s pomočjo vgrajenega termometra. Pri sobnih temperaturah je točnost merjenja temperature $T_r < 1$ °C, pri vrhunskih napravah pa ~ 0.1 °C. Iz tabel ali diagrama se nato odčitata ustrezna tlaka nasičene pare na temperaturi rosišča $p_{np}(T_r)$ in temperaturi okolice $p_p(T)$. Z deljenjem njunih vrednosti se dobi relativna vlažnost (enačba 4). Zaradi točnosti in kompleksnosti se avtomatske naprave za merjenje vlažnosti z metodo določanja temperature rosišča uporabljajo v laboratorijih kot etaloni.

Psihometer:

Fizikalni princip psihometra je pojav, da imajo vlažni predmeti zaradi izparevanja nekoliko nižjo temperaturo od suhih predmetov. V zraku nasičenem s paro voda izpareva in se kondenzira z enako hitrostjo. V takem zraku so vsi predmeti vlažni in imajo enako temperaturo. Osnovna dela psihometra sta dva termometra od katerih je eden suh in kaže temperaturo zraka T , drugi pa ovit z ovlaženim stenjem katerega en konec je v stalnem kontaktu z destilirano vodo v majhnem rezervoarčku in kaže temperaturo $T_v < T$. S tema dvema temperaturama se, s pomočjo ustrezne tabele, določita tlaka nasičene pare $p_{np}(T)$ in $p_{np}(T_v)$ in izračuna relativna vlažnost po enačbi

$$R_v = [p_{np}(T_v) - A(T - T_v)p_a] / p_{np}(T), \quad (5)$$

kjer je p_a atmosferski tlak in A konstanta, katere vrednost zavisi predvsem od hitrosti zraka. Pri hitrostih $(3 \div 5)$ m/s ima A približno konstantno vrednost 6.7×10^{-4} °C⁻¹. Praktični psihometri so opremljeni z majhnim ventilatorčkom, ki proizvaja zračni tok v navedenem obsegu hitrosti čez vlažni termometer. Za merjenje temperatur se običajno uporabljata dva enaka Pt uporovna termometra, vsak zase vezan v Wheatstonov most. Oba mosta pa sta povezana tako, da je izhodni signal naprave že kar umerjen na relativno vlažnost, ki se odčita na skali naprave. V novejših napravah je vgrajen mikroprocesor, ki iz podatkov temperature in enačbe 5, izračuna R_v , njeno vrednost pa prikaže na prikazovalniku.

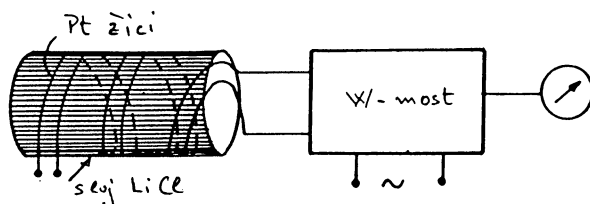
Električni pretvorniki vlažnosti:

Nekateri porozni materiali imajo lastnost, da oddajajo vlago v zrak ali absorbirajo vlago iz zraka do vzpostavitve ravnotežnega stanja pri čemer so njihove električne karakteristike, prevodnost ali dielektrična konstanta, funkcije vlažnosti. Na tem principu deluje vrsta uporovnih in kapacitivnih pretvornikov za merjenje vlažnosti.

Uporovni pretvorniki: Tipičen primer uporovnega pretvornika je prikazan na sliki 3. Okrog valja iz plastike (izolacijski material) sta z določenim razmakom (brez dotika) oviti dve Pt žici. Po površini valja je nanešen sloj LiCl, ki tvori prevodno pot med žicama. Z dvigom vlažnosti električna prevodnost sloja ponovljivo narašča, upornost pretvornika pa se pri tem zmanjšuje. Odvisnost ni linearna. Upornost se meri z neuravnovešenim ali avtomatsko uravnovešenim mostom z izmeničnim napajanjem katerega izhod se kalibrira na relativno vlažnost. Spodnja meja merjenja R_v je $(1 \div 5)$ %, zgornja $(95 \div 100)$ %. °C.

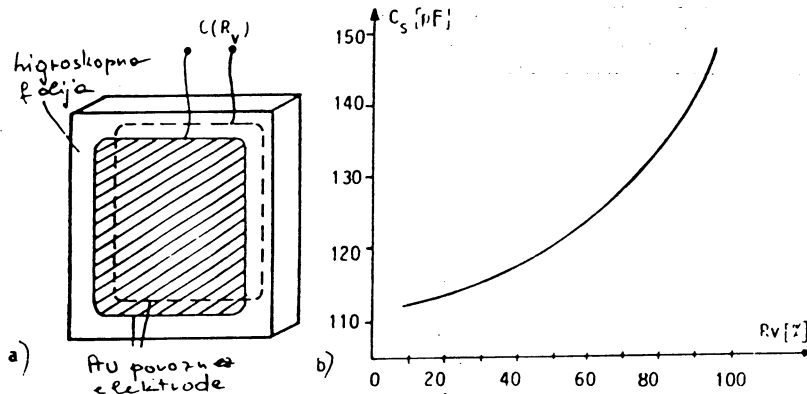
Opomba: Ker so spremembe upornosti z vlažnostjo so zelo velike je en sam pretvornik lahko

uporaben le v ozkem obsegu vlažnosti (10 % celotnega obsega). Natančnost je $\sim 1.5\%$, odziv ~ 3 s, velikost $\phi 25 \times 50$ (mm), temperaturno območje $(-40 \div 70)^\circ\text{C}$. Za večji obseg je potrebno več senzorjev (7 do 8 v enem kosu) s prevlekami soli v določenem intervalu za pokritje celotnega območja vlažnosti.



Slika 3: Principielna shema uporovnega pretvornika za merjenje vlažnosti

Kapacitivni pretvorniki: Kot primer kapacitivnega pretvornika je na sliki 4a prikazan pretvornik z dielektrično higroskopno folijo. Na obeh straneh folije je nanešen tanek sloj zlata, ki s folijo tvori ploščati kondenzator. Sloj iz zlata ima tudi lastnost, da prepušča molekule pare, ki se absorbirajo v dielektrični foliji in s tem spreminjajo dielektrično konstanto folije. Na sliki 4b je prikazana tipična odvisnost kapacitivnosti pretvornika od relativne vlažnosti pri frekvenci 100 kHz.



Slika 4: a) Principielna shema kapacitivnega pretvornika za merjenje vlažnosti zraka, b) odvisnost kapacitivnosti pretvornika od relativne vlažnosti

Kapacitivni pretvorniki vlažnosti se vežejo v izmenični most v katerem majhne spremembe kapacitivnosti povzročajo spremembo amplitude napetosti ali v LC oscilator pri katerih se kot izhodna veličina uporablja sprememba frekvence. Kapacitivni pretvorniki so, zaradi majhnih dimenzij, primerni kot žepni digitalni higrometri. Približne karakteristike takih merilcev so: obseg vlažnosti $(10 \div 90)\%$, obseg dovoljenih temperatur $(0 \div 50)^\circ\text{C}$, odzivni čas $(2 \div 5)$ min in točnost 2% .

Ostali električni higrometri:

PZE higrometer: Kot senzor služi kvarčni kristal premazan s slojem higroskopne snovi. Kristal je vključen v oscilator, ki oscilira na rezonančni frekvenci pretvornika. Pri povečanju vlažnosti se zaradi absorpcije poveča masa kristala in s tem zniža lastna frekvenca kvarca. Blokovna shema PZE higrometra je slična shemi kvarčnega termometra.

Elektrolitski higrometer: Pri tem senzorju se kontinuirano pretaka (pretok $\sim 100 \text{ cm}^3/\text{min}$) vzorčeni plin skozi analizatorsko cev. V cevi sta dve spiralno naviti Pt žici. Prostor med žicama je izpolnjen z močnim desikantom (higroskopni sloj fosforjevega pentoksida P_2O_5). Na konca žic se priključi dc napetost. Vлага, ki jo absorbira pentoksid se zaradi elektrolize razkroji v kisik in vodik in na ta način zapušča higroskopni sloj. Med žicama steče določen elektrolitski tok, ki pada dokler se hitrost elektrolize in hitrost absorpcije vlage ne izenačita. Kot merilo vlažnosti je jakost toka pri čemer se napetost pretvornika drži konstantno. Karakteristike: obseg ($0 \div 2000$) ppm, natančnost 5 %, odziv $\sim 30 \text{ s}$.

Higrometri z dlako:

Nekaterim materialom (lasje, živalska dlaka, koža in večina sintetičnih vlaken) se dolžina poveča sorazmerno relativni vlažnosti zraka. Na tem principu deluje večje število enostavnih pretvornikov in instrumentov za merjenje vlažnosti zraka. Naprimer, običajni higrometri za uporabo v stanovanjskih prostorih imajo kot senzor šop kakih 10 las ali sintetičnih vlaken. Vlakna so prednapeta in s svojim raztezanjem ali krčenjem premikajo mehanizem s kazalcem, ki na ustrezni kalibrirani skali kaže relativno vlažnost. Pri kalibraciji opravljeni na temperaturi ($15 \div 20$)°C točnost takega higrometra znaša ($3 \div 4$)% v obsegu temperatur ($8 \div 35$)°C. Zunaj navedenega temperaturnega obsega se merjenje lahko opravlja le pri pogoju kalibracije na teh temperaturah. Mejne temperature uporabnosti higrometrov z dlako so ($-10 \div +60$)°C in se morajo relativno pogosto kalibrirati z nekim od absolutnih merilcev vlažnosti.

Merjenje vlažnosti trdnih in zrnatih materialov:

V proizvodnji in trgovini z materiali kot so bombaž, volna, žitarice, itd., je poznavanje njihove vlažnosti neobhodno. Vlažnost teh materialov se definira kot

$$v = m_v / m_c ,$$

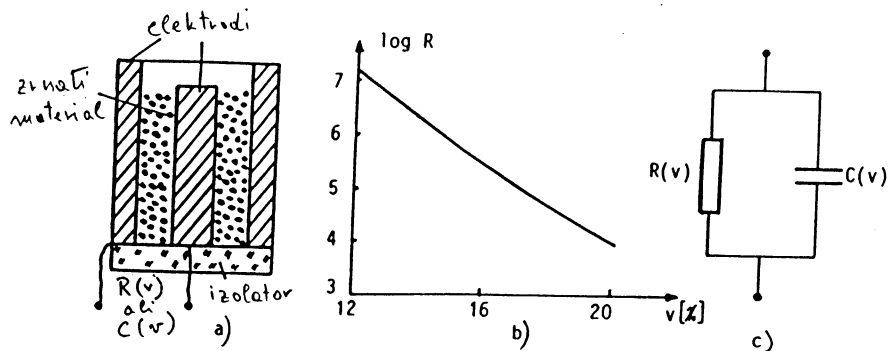
kjer je m_v masa vode in m_c celotna masa opazovanega vzorca trdnega in zrnatega materiala. Elementarni in zanesljiv način merjenja vlage je merjenje teže enega vzorca v normalnem in posušenem stanju s čemer se dobi teža vode. Materiali se sušijo z daljšim segrevanjem na temperaturah nekoliko nad $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ali z vakuumiranjem. Ko teža opazovanega vzorca preneha naraščati pomeni, da je vsa prosta vlaga izparela. Te gravimetrijske meritve so dolgotrajne in neprimerne za uporabo v industriji ali trgovini, kjer so se zato uveljavile predvsem električne meritve s pomočjo uporovnih in kapacitivnih pretvornikov.

Uporovni pretvorniki: Sestojijo se iz dveh elektrod na fiksni razdalji med katerima se nahaja material, ki se ga meri. Praškasti ali zrnati materiali (npr., žitarice) se sipljejo v prostor med elektrodama (ploščate ali koaksialne oblike, slika 5a). Upornost pretvornika z zrnatim materialom z vlažnostjo upada po približni enačbi

$$R(v) = A \exp(-kv) ,$$

kjer sta A in k pozitivni konstanti. Za žitarice je karakterističen širok obseg upornosti, ki se pri

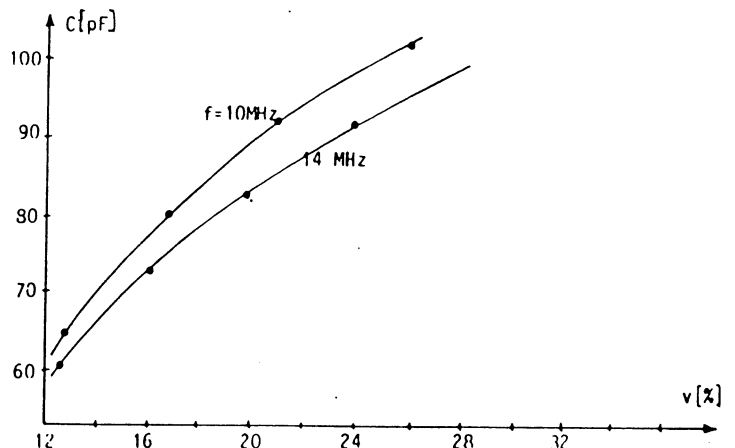
vlažnostih (10 ÷ 25)% giblje med nekaj deset MΩ in nekaj deset kΩ (slika 5b).



Slika 5: a) Koaksialni senzor za merjenje vlažnosti žitaric, ki se lahko uporablja kot uporovni ali kapacitivni pretvornik, b) odvisnost upornosti vzorcev žitaric od njihove vlažnosti, c) poenostavljena ekvivalentna shema pretvornika.

Po konstrukciji so merilci vlažnosti oblike Ω -metrovi z izmeničnim napajanjem. Enosmerno napajanje se redko uporablja, ker pride do elektrolize vode in polarizacije elektrod zaradi ionskega karakterja prevajanja. Poenostavljena ekvivalentna shema pretvornika je prikazana na sliki 5c. Poleg omske upornosti $R(v)$ ima pretvornik še kapacitivno komponento $C(v)$, ki se prav tako spreminja z vlažnostjo. Da bi se merila samo omska komponenta se uporabljajo zgolj nizke delovne frekvence (mrežna do nekaj sto Hz). Upornost pretvornika se lahko menja za 3 do 4 velikostne rede. Zato se kot elementi za uravnavesenje uporabljajo potenciometri z logaritemsko karakteristiko s katerimi se doseže približno linearno kalibrirana skala relativne vlažnosti. Pri porastu temperature upornost pada in je zato potrebna korekcija relativne vlažnosti ($\sim -0,1\% / ^\circ\text{C}$).

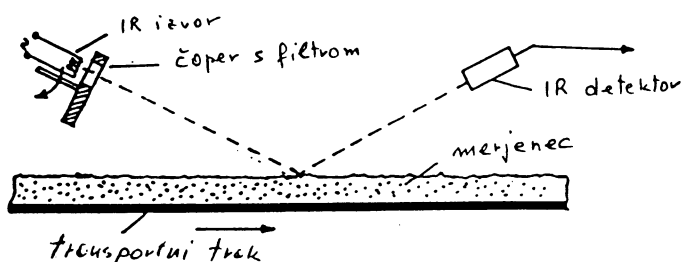
Kapacitivni pretvorniki: V principu imajo enako obliko kot koaksialni uporovni pretvornik prikazan na sliki 6a. Dielektrik kondenzatorja predstavljajo vlažna zrna in zračni žepi med zrni. Del vode v zrnih se nahaja v obliki proste vode, del v obliki kemijsko vezanem stanju. Makroskopsko, kapacitivnost $C(v)$ s povečanjem vlažnosti narašča. Delovna frekvenca se izbere tako, da ima 'šantirana' upornost $R(v)$ v ekvivalentni shemi (slika 6c) čim manjši vpliv na impedanco kroga [$R(v) \ll C(v)$]. To se doseže z visokimi delovnimi frekvencami nekaj 10 MHz. Na sliki 7 je prikazana odvisnost $C(v)$ tipičnega koaksialnega pretvornika pri 10 in 14 MHz.



Slika 2: Odvisnost kapacitivnosti pretvornika od vlage zrn za dve delovni frekvenci

Jedrski (nuklearni) merilci vlažnosti: Delujejo na principu termalizacije hitrih nevtronov na molekulah vode vsebovanih v merjenem materialu. Merilec se sestoji iz izvora hitrih nevtronov in detektorja termičnih nevtronov. Merjeni material se postavi med njiju. Število termičnih nevtronov je direktno sorazmerno vsebnosti vlage. Pri tem je potrebno upoštevati tudi koncentracijo atomov vodika vezanih v materialu v obliki drugih spojin. Preciznost teh merilcev je dobra, pri žitaricah ~ 5% v obsegu vlažnosti (0 ÷ 20)%.

Infrardeči (IR) merilci vlage: Služijo za določevanje vlažnosti trdnih teles, tekočin in plinov. Fizikalna osnova je lastnost molekul vode da močno absorbirajo IR sevanje v območju valovnih dolžin (1 ÷ 2) μm . Pri trdnih snoveh se uporablja metoda refleksije IR žarkov s površine. Naprava se sestoji iz IR izvora s čoperjem in optičnim filtrom, ki prepušča sevanje zgolj v obsegu (1 ÷ 2) μm , slika 7. Sekani žarki se odbijajo s površine merjenega materiala na fotocelico. V kolikor je vlažnost površinskega sloja večja, toliko manj se ga odbije na sprejemno fotocelico. Na tem principu se meri vlažnost zrnatih ali praškastih snovi, ki potujejo na tekočem traku. Pri tekočinah in plinih se uporablja metoda transmisije.



Slika 7: Princip dela IR merilca vlažnosti v trdnih snoveh

Za merjenje vlage v trdnih snoveh se uporablja tudi jedrska magnetna resonanca (NMR).

HRUP

1. UVOD

Narava je sama po sebi zadostna in se sama tudi obnavlja in uravnava, če ni nikakršnih dejavnikov, ki posegajo v njeno samo-nadziranje. Z začetkom moderne dobe je človek čedalje bolj posegal v naravne procese. Napredek in razvoj sta botrovala k vse večjim zahtevam in hkrati k večjemu onesnaževanju. Onesnaževanje tako niso postali le odpadki, ki so vidni in otipljivi, ampak tudi nevidni kot npr. hrup.

Modernizacija prinaša ljudem mnoge novosti s katerimi si le-ti olajšavajo vsakdanjik, a hkrati s tem pa tudi mnoge negativne posledice, med katere sodi od vsepovsod prihajajoči hrup. Raziskave in študije so pokazale, da je prekomeren hrup posledica mnogim težavam, ki pestijo ljudi v središču ali okoli virov hrupa. Te kažejo, da je več kot polovica celotne evropske populacije obremenjena s čezmerno ravno hrupa (65 dBA podnevi in 50 dBA ponoči), in kar četrtina jih je izpostavljena hrupu, ki presega 65 dBA in katerega poglavitni krivec je promet. Vendar slika izpostavljenosti hrupu ni enaka po vsej Evropi. Zlasti v zadnjih nekaj letih se čedalje več pozornosti posveča odpravljanju ali pa vsaj ublažitvi dejavnikov, ki povzročajo prekomeren hrup.

Dejavnikov oz. razlogov za takšno stanje je veliko. Sam razvoj avtomobilske industrije je bil veliko hitrejši od prometne infrastrukture. Trdimo lahko, da so hitro stopnjo motorizacije vseh slojev prebivalstva pogojevali mnogi dejavniki, med njimi zlasti iz leta v leto ugodnejši pogoji nakupa osebnih vozil, relativno nizka cena pogonskega goriva, hiter razvoj podjetništva, neusklajenost prostorskih aktov z območji varstva pred hrupom, neusklajenost na področju urejanja prostora in prometa, neracionalna raba vseh vrst vozil, pomanjkanje in zastarelost javnih prevoznih sredstev, nedoslednost organov odločanja, nadzorovanja in kaznovanja itd.

Hrup se kljub novim tehnologijam ne znižuje, temveč z leti počasi raste. To potrujeta tudi dejstva, da se hrup širi v manj hrupna območja in da se večja gostota virov hrupa. Tu se lahko doda tudi povečanje po različnih potrebah (povečanje prevoznih kapacitet v tako cestnem, železniškem kot tudi letalskem prometu), kot tudi neprimerne gradnje urbanih sosek, ki so sedaj zaradi prostorske stiske vse bolj, če ne že ob sami prometni infrastrukturi. Tako je sedaj hrup postal preglavica mnogim in se zaradi tega s tem problemom ukvarja čedalje več strokovnjakov. Jasno je, da zdravstvene težave ne povzročajo samo slab in onesnažen zrak, čedalje manj pitna voda, umetna ali nenaravna živila. Za kvaliteto življenja je potrebno tudi mirno in spokojno okolje.

1.1 Vplivi hrupa na človeka

Hrup lahko vpliva na organizem na tri načine:

1. okvari lahko slušni organ;
2. škodljivo deluje kot stresni dejavnik na kardiovaskularni in nevrovegetativni sistem, oseba postane nervozna, razdražljiva, moteno je njegovo spanje, lahko je utrujen;
3. posledica so lahko obolenja prebavil in obtočil, poveča se hitrost dihanja in srčnega utripa ali pa hrup moti oz. onemogoča opravljanje nekaterih vrst dela, moti koncentracijo, študij, sporazumevanje, signalizacijo.

Najpogostejše težave, ki se pojavljajo so: utrujanje, občutek stalne utrujenosti, splošna slabost, zaspanost, razdražljivost, nespečnost, psihična napetost. Škodljivi učinki hrupa na zdravje so odvisni od:

- ravni zvoka,
- frekvence zvoka,
- časovne izpostavljenosti,
- oblike zvoka (kontinuirani ali diskontinuirani),
- asociativne vsebine zvoka,
- individualne občutljivosti (10 % ljudi je čezmerno občutljivih).

Glavni viri hrupa poleg prometa so še: industrija, proizvodne naprave in orodja, zunanje okolje, rekreativne dejavnosti - komunalni nemir in glasba. Več kot 10 % populacije razvitega sveta ima pomembne težave s sluhom, vsak drugi človek nad 65 let ima po navedbah strokovnjakov že težave v komunikaciji oz. je naglušen, z izgubo sluha po Fowlerju, ki je večja od 55,7 %. Zaskrbljujoči pa so tudi podatki, da ima več kot 10 % oseb, mlajših od 25 let, že prizadet sluh, pri dveh tretjinah pa je vzrok okvare sluha akustična travma. V tabeli 1 so prikazane posledice ob daljši izpostavljenosti viru hrupa pri različnih nivojih.

Tabela 1: Vpliv hrupa na človeka

NIVO HRUPA (dBA)	VPLIVI NA ČLOVEKA (ob daljši izpostavljenosti)
30-60	-zmanjšana koncentracija; -težave pri komunikaciji; -vedenjske težave (agresija, socialni konflikt); -nespečnost;
60	-stresne reakcije povezane s fiziološkimi spremembami;
85	-možnost poškodbe srednjega ušesa.

Največ ljudi postane stresno prizadetih zaradi hrupa izven dela, od tega kar 60 % jih ogroža cestni hrup. Zato postaja varstvo pred hrupom v urbanih okoljih sodobnih družb vse pomembnejše, saj se vse večji del mestnega prebivalstva, pa tudi prebivalstva zunaj mestnih območij ob specifičnih hrupnih objektih, čuti ogrožen. Škodljiv hrup je tisti, pri katerem dnevna ali tedenska izpostavljenost presega 85 dBA. Koliko časa je lahko določena oseba lahko izpostavljena viru hrupa ne da bi utrpela trajnih posledic za naše zdravje je prikazano v tabeli 2.

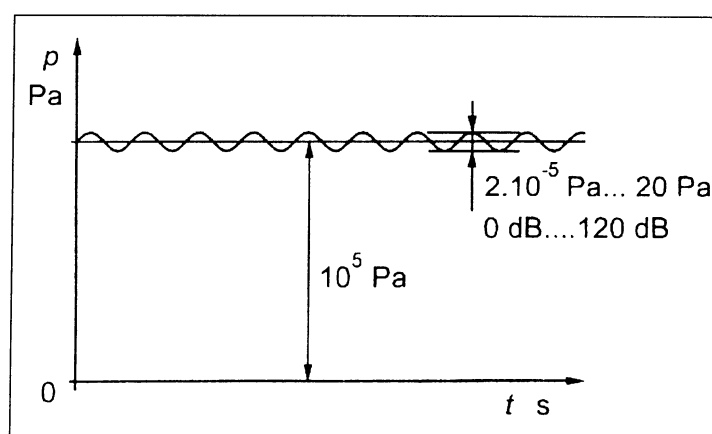
Tabela 2: Dovoljen čas izpostavljenosti hrupu glede na raven hrupa

Izpostavljenost na dan	Raven hrupa (dBA)
8 h	85
6 h 21 min	86
5 h 2 min	87
4 h	88
3 h 10 min	89
2 h 31 min	90
48 min	95
15 min	100
5 min	105
1 min	110
0,5 min	115

2. TEORETIČNE OSNOVE ZVOKA IN HRUPA

2.1 Definicija zvoka in hrupa

Zvok ali zvočno valovanje je pojav, ki nastane pri mehanskem nihanju materialnih delcev v nekem mediju, ki ima maso in elastičnost, v slišnem področju frekvenc. Taki mediji so plini, tekočine in toga telesa. Nihanje materialnih delcev se kaže kot periodično nihanje tlaka (gostote in hitrosti delcev) okrog neke ravnotežne lege (slika 1). Ravnotežna lega pri zvoku v zraku je atmosferski tlak 10^5 Pa . Zvočni tlak je dinamičen tlak, ki je glede na statičen tlak okolice razmeroma majhen in se spreminja od nekako $20 \mu\text{Pa}$ do 20 Pa . Pri normalnem govoru je amplituda zvočnega tlaka okrog 0.1 Pa na razdalji 1 m od govornika in znaša komaj milijoninko statičnega tlaka okolice.



Slika 1: Nihanje zvočnega tlaka

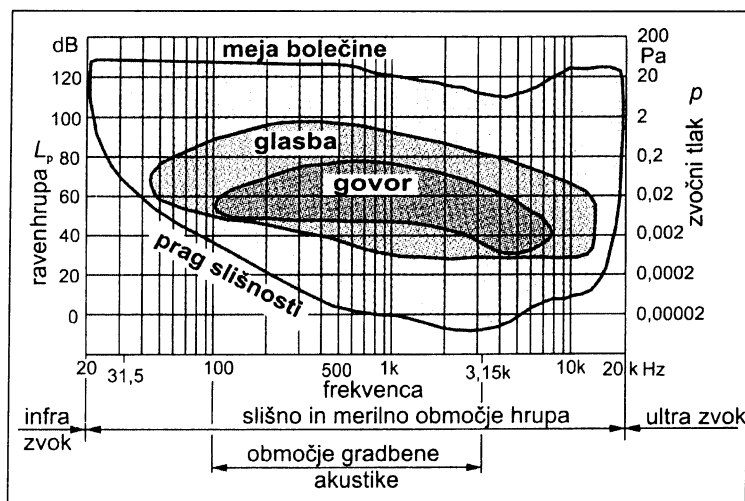
Hrup je ena od oblik zvočnega valovanja. Vsako zvočno valovanje nosi določeno informacijo. Če je ta informacija razumljiva, koristna ali prijetna, potem je to zaželena informacija, ki se ji reče signal ali melodija. Če pa je informacija nerazumljiva, nekoristna ali moteča, potem je to nezaželena informacija, ki se ji reče hrup, šum ali trušč. Hrup je torej nezaželena oblika zvoka, katerega definicija ni odvisna od jakosti zvoka ali njegove frekvence, ampak od poslušalca samega, njegovega trenutnega razpoloženja, utrujenosti, zdravstvenega stanja, starosti, spola ter od časa in kraja.

Hrup je torej predvsem subjektivna kategorija, ki negativno vpliva na zdravje in počutje ljudi. Prekomeren hrup povzroča poškodbo sluha, utrujenost, vpliva na koncentracijo pri delu, študiju in počitku, povzroča psihofizične motnje, ipd. Učinek hrupa je odvisen od njegove ravni. Daljša izpostavljenost hrupu na 80 do 90 dBA običajno povzroča poškodbo ali izgubo sluha. V teh primerih si odgovorni prizadevajo za zmanjševanje hrupa ali pa za zaščito človeka pred hrupom.

2.2 Dinamično območje ušesa

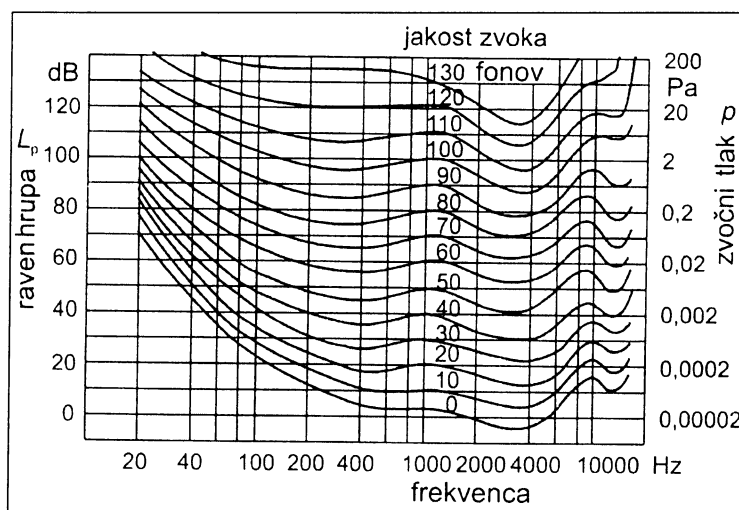
Človeško uho zazna najrazličnejše tone, zvene, šume in njihove lastnosti, vendar samo v določenem obsegu frekvenc in jakosti (višine) zvočnega tlaka [12,13]. Mlad, zdrav človek sliši v frekvenčnem območju med 20 in 20000 Hz (slika 2 in 3). Pod 20 Hz je polje neslišnega (infra) zvoka, nad 20000 Hz pa polje neslišnega (ultra) zvoka. Slišnost ušesa je omejena tudi po jakosti, saj se lahko sliši le zvok z zvočnim tlakom od $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ (prag

slišnosti) do 20 Pa (meja bolečine), ali izraženo z ravniyo zvočnega tlaka od 0 do 120 dBA . Navedeni vrednosti veljajo le pri frekvenci 1000 Hz , pri drugih frekvencah so te vrednosti drugačne, saj slišnost človeškega ušesa ni enakomerna pri vseh frekvencah in se tako meja slišnosti kot meja bolečine spreminja s frekvenco. Najnižji prag slišnosti je pri približno 3000 Hz , zato uho najbolj sliši v frekvenčnem območju med 1000 in 4000 Hz . Pod 1000 Hz slišnost ušesa hitro upada. Zelo hitro pa vpada za frekvence nad 16 kHz (slika 2).



Slika 2: Frekvenčno območje spektra slišnega zvoka

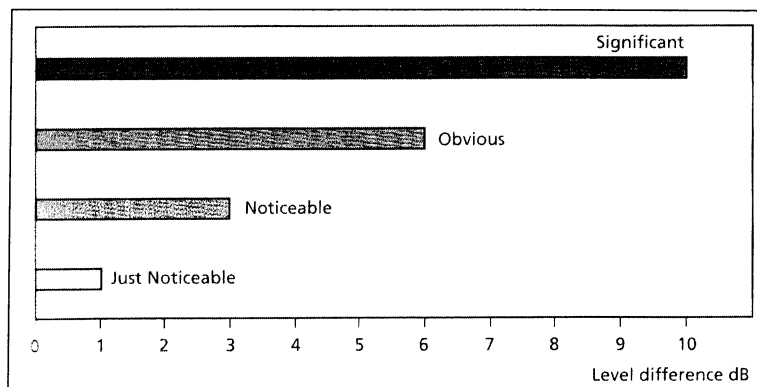
Navedeno pomeni, da dva zvoka enake ravni pri različnih frekvencah po subjektivni oceni nimata enake jakosti. Zaradi tega je bila vpeljana enota za subjektivno oceno jakosti zvoka *fon*, medtem ko je *decibel* merilo za objektivno oceno jakosti zvoka. *Fon* je po definiciji enak *decibelu* le pri frekvenci 1 kHz . Pri drugih frekvencah se jakost zvoka v *fonih* razlikuje od jakosti (vrednosti ravni) zvoka v *decibelih* (slika 3). Odstopanja slišnosti ušesa od izmerjene vrednosti z mikrofonom se korigira s pomočjo A-vrednotene (utežene) krivulje, ki dejansko prilagodi frekvenčno karakteristiko (spekter) mikrofona frekvenčni karakteristiki človeškega ušesa.



Slika 3: Standardizirane izofonske krivulje

Slišnost ušesa izražena z ravniyo zvočnega tlaka, kot že navedeno, obsega vrednosti od praga slišnosti pri 0 dBA do meje bolečine pri 120 dBA in čez. Čeprav povečanje za 6 dB

predstavlja 2-kratno povečanje tlaka, je potrebno povečanje za 8 do 10 dB, da tak zvok postane subjektivno znatno glasnejši (slika 4). Najmanjša sprememba, ki se jo lahko zazna je ~ 1 dB.



Slika 4: Percepcija zvoka

3. FIZIKALNE OSNOVE ZVOČNEGA VALOVANJA

3.1 Širjenje zvočnih valov

Zato, da se lahko ustvari in prenaša zvočno valovanje v nekem mediju, mora medij imeti dve lastnosti: vztrajnost in elastičnost. Vztrajnost je lastnost, ki omogoča enemu elementu medija prenašati vzbujeno nihanje na sosedne elemente in je v zvezi z gostoto medija (tj., z maso elementa). Elastičnost je lastnost, ki vzbuja silo na premaknjenem elementu in ga potem vrne v njegovo ravnovesno lego. Vsako zvočno valovanje je definirano s:

- frekvenco f ;
- valovno dolžino λ ;
- hitrostjo širjenja zvoka c .

Lastnost osnovnega tona nekega zvočnega valovanja je določena s številom tlačnih sprememb na sekundo pri katerih motnje zvočnega tlaka nihajo med pozitivno in negativno vrednostjo. Frekvenca f je merilo teh nihanj in pomeni število ciklov ali sprememb na sekundo. Enota je s^{-1} ali Hz (hertz). Frekvenca vsiljenega valovanja je odvisna le od vzbujanja, ki povzroča valovanje.

Valovna dolžina λ je razdalja med dvema analognima točkama pri transversalnem nihanju (slika 5a) oz. med dvema zaporednima hriboma in zgoščinama pri longitudinalnem (slika 5b). Odvisna je od medija v katerem se valovanje širi in od vira valovanja. Valovna dolžina je razmerje med hitrostjo zvoka in frekvenco zvoka

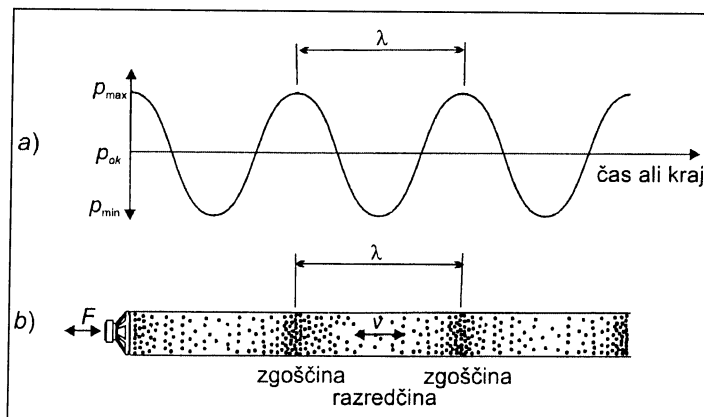
$$\lambda = \frac{c}{f} = cT, \quad (1)$$

Kjer je T čas, ki ga potrebuje valovanje, da prepotuje razdaljo enako valovni dolžini λ . To je tudi perioda, čas potreben za celoten cikel in je enak recipročni vrednosti frekvence ($T = 1/f$).

Zvočno valovanje se širi od izvora s hitrostjo zvoka c , ki je definirana z enačbo

$$c = \lambda f \quad (2)$$

Dejanska hitrost zvoka je karakteristična za dani medij in je odvisna od vrste in lastnosti medija v katerem se valovanje širi. Določa se s pomočjo enačb v tabeli 3.



Slika 5: a) Sinusna krivulja transversalnega valovanja, b) zgoščine in razredčine longitudinalnega valovanja

Tabela 3: Enačbe za določanje hitrosti zvoka skozi različne medije

Vrsta medija	Plini	Tekočine	Toga telesa
$c \text{ (m/s)}$	$\sqrt{\gamma (p / \rho)} = \sqrt{\gamma RT}$	$\sqrt{K / \rho}$	$\sqrt{E / \rho}$

V tabeli 1 je γ izentropski koeficient (1,4 za zrak), ρ gostota medija, R plinska konstanta, T absolutna temperatura, p tlak, K stisljivost in E elastični modul. Produkt ρc se imenuje tudi specifična akustična impedanca. Vrednosti za hitrost zvoka, gostoto in specifično akustično impedance v nekaterih medijih pri $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ so podane v tabeli 4. Po tej tabeli je hitrost zvoka v zraku 343 m/s.

Tabela 4: Hitrosti zvoka, gostota medija in specifična akustična impedanca za izbrane medije

Medij	$c \text{ (m/s)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho c \text{ (kg/m}^2\text{s)}$
Zrak	343	1,2	413
Voda	1450	1000	$1,48 \cdot 10^6$
Steklo	5600	2700	$13,5 \cdot 10^6$
Železo	5170	7900	$41 \cdot 10^6$
Beton	4000	2000	$8 \cdot 10^6$
Les	4000-5000	500	$2 \cdot 10^6$
Guma	60÷150	1000÷2000	$(0,6\div3) \cdot 10^5$

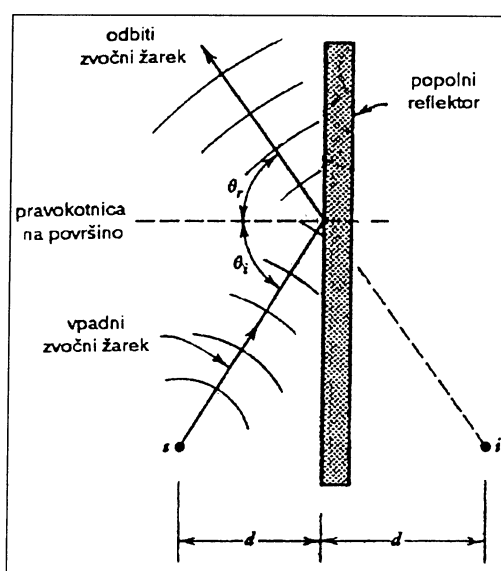
3.2 Odboj zvočnih valov

Zvočni valovi, ki se neovirano širijo skozi zrak, slej ko prej naletijo na oviro (snov), ki prekine njihovo napredovanje. Od površine take ovire se zvočni valovi delno ali v celoti odbijejo. Ravna stena, ki popolnoma odbija valovanje, povzroči nastanek odbitega valovanja (slika 6). Novo nastalo valovanje ima enako moč kot vpadno valovanje in navidezen vir, ki je na nasprotni strani stene na enaki oddaljenosti kot pravi vir valovanja. Zvočni tlaki vpadnega

in odbitega valovanja se seštevajo, kar je potrebno upoštevati pri meritvah intenzitete zvoka ob ali blizu odbojnih površin. Za odboj zvočnega valovanja veljata dva zakona:

- vpadni kot θ_i je enak odbojnemu kotu θ_r ;
- smer vpada, smer odboja in pravokotnica na površino ležijo v isti ravnini.

Zanimiv primer odboja zvočnih valov je stoječe valovanje, ki se pojavi med dvema vzporednima površinama. Zvočni valovi se odbijajo od stene na takšen način, da se na določenih mestih ojačijo, na drugih pa izničijo, kar tudi zelo slabo vpliva na akustične lastnosti prostora. To se lahko prepreči z drugačno geometrijo prostora kot tudi z večjo zvočno absorpcijo na površinah sten.



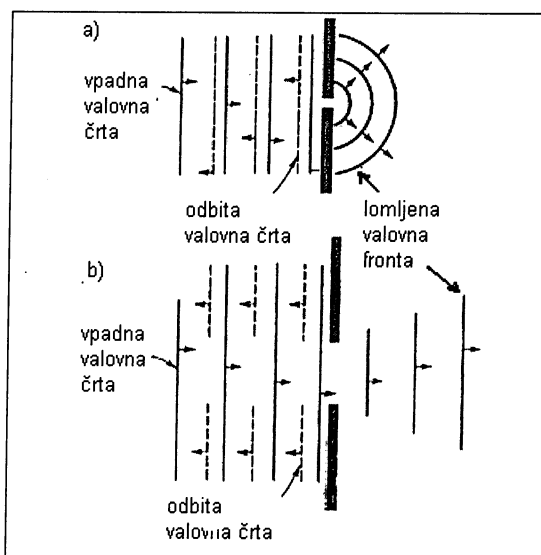
Slika 6: Primer zakona odboja zvočnih valov

3.3 Uklon zvočnih valov

Zvočni valovi se upogibajo okrog robov sten in lahko potujejo skozi najmanjše odprtine v stenah. Ta lastnost se imenuje uklon. Stopnja uklona je odvisna od valovne dolžine in od dimenzij ovire. Večja je valovna dolžina glede na dimenzije ovire, večji je uklon.

Na sliki x je prikazan primer uklona ravnega zvočnega valovanja pri prehodu skozi odprtino. Pri majhni odprtini (slika 7a) se večina vpadnega valovanja odbije. Uklonjeni valovi potujejo skozi odprtino tako, kot da je v odprtini točkasti izvor valovanja z zmanjšano zvočno energijo, ker večino energije vsebuje odbito valovanje. Pri večji odprtini (slika 7b) potuje valovanje skozi odprtino brez izgube energije. Na robovih se ukloni in s tem se poveča površina valov, zato je intenziteta na uklonjenem delu manjša kot na ravnem delu.

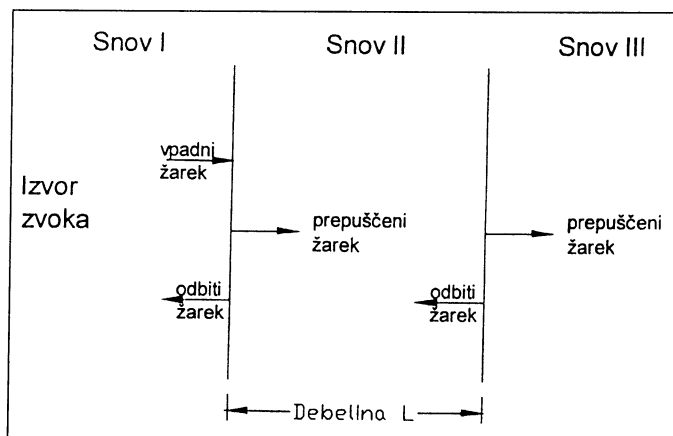
Uklon pride bolj do izraza pri zvokih z nizko frekvenco, ki imajo večjo valovno dolžino. Zaradi tega se za protihrupno ograjo sliši nižje tone kot pa pri neposrednem cestnem hrupu.



Slika 7: Uklon ravnega valovanja pri prehodu skozi odprtino

3.4 Absorpcija in transmisija zvočnih valov

Pri vpadu zvočnega valovanja na oviro, se poleg odbitega valovanja pojavi tudi prepuščeno valovanje. Prepuščeno valovanje potuje skozi oviro z zmanjšano energijo. Izguba (absorpcija) energije se pojavi zaradi tega, ker vpadni zvok povzroči nihanje molekul ovire ob površini in njeni notranjosti. Zaradi trenja molekul se del nihajne energije spremeni v toplotno energijo. Zmanjšanje energije na ta način je izrazitejše pri materialih, ki imajo porozne odprtine ali razpoke, zaradi česar imajo zvočni valovi zlomljeno pot in zelo veliko stka s površino ovire. Pri absorpciji zvočne energije so učinkoviti blago (tekstil), mineralna volna in posebne akustične plošče.



Slika 8: Širjenje zvoka skozi tri različne snovi

Splošni primer potovanja zvočnih žarkov skozi tri različne medije je prikazan na sliki x. Zvočno valovanje prihaja iz prve snovi. Na stiku med I in II snovjo nastaneta odbiti in prepuščeni žarek. Prepuščeni žarek potuje naprej do meje s snovjo II in III, kjer zopet nastaneta odbiti in prepuščeni žarek. Intenziteta odbitega in prepuščenega žarka je odvisna od gostot snovi, hitrosti širjenja zvoka v teh snoveh in debeline L srednjega medija.

3.5 Vrste zvočnih valovanj

Zvočna valovanja se delijo glede na smer gibanja materialnih delcev, glede na smer širjenja valovanja in glede na obliko spektra zvoka.

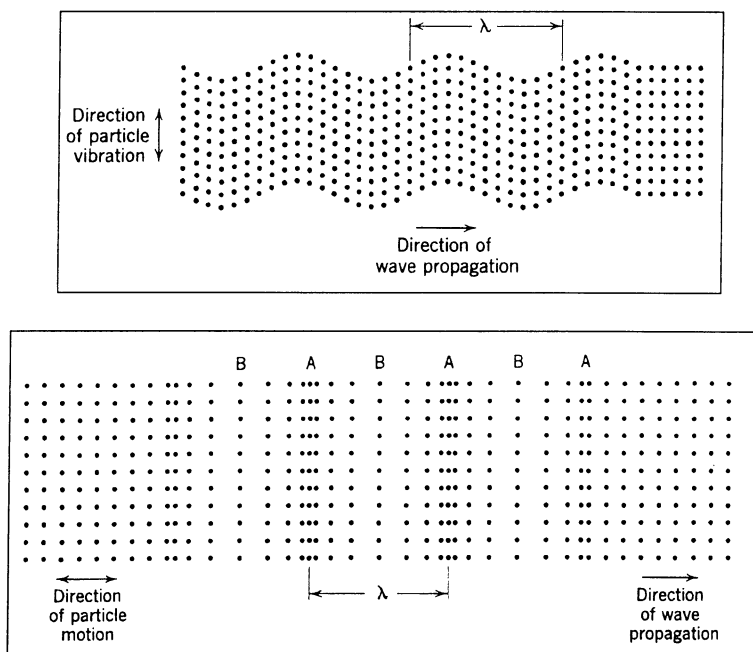
3.5.1 Vrste valovanj glede na smer gibanja materialnih delcev

Glede na smer gibanja materialnih delcev se zvočna valovanja deli na:

- transverzalno (prečno);
- longitudinalno (vzdolžno).

Če motnja, ki se jo vsili sistemu (snovi), povzroči, da se posamezni delci premikajo prečno glede na smer širjenja valovanja, potem je to transverzalno valovanje (slika 9, zgoraj). Tako valovanje se lahko širi le skozi trdne snovi. Transverzalno valovanje se lahko predstavi s sinusno krivuljo pri kateri je največji odmik v smeri navzgor ($p = p_{max}$) hrib, največji odmik v smeri navzdol pa dol valovanja ($p = p_{min}$) (slika 5a).

Če pa se delci premikajo vzdolž smeri širjenja motnje, potem je to longitudinalno valovanje (slika 9, spodaj). Tudi longitudinalno valovanje se lahko zapiše v obliki sinusnega valovanja. V tem primeru se namesto hriba in dola govori o zgoščini in razredčini (slika 5b). Longitudinalno valovanje se širi skozi vse snovi.



Slika 9: Transverzalno (zgoraj) in longitudinalno (spodaj) valovanje

3.5.2 Vrste valovanj glede na obliko širjenja valovanja

Glede na obliko širjenja se zvočna valovanja deli na:

- enodimenzionalno; ravno, krogelno (sferično) in cilindrično valovanje;
- kompleksno valovanje;
- stojno valovanje.

Enodimenzionalno ravno valovanje potuje samo v smeri ene dimenzije in ima valovne fronte vzporedne med seboj. Prosto potujoče valovanje je tisto valovanje, ki se širi naprej brez interference z valovanji, odbitimi od drugih objektov ali zaradi sprememb v mediju.

Enodimenzionalno krogelno valovanje nastane pri pulzaciji točkastega zvočnega vira in kadar ni odbijajočih (reflektirajočih) površin blizu zvočnega vira ali sprejemnika. Valovanje ima obliko krogle, ki enakomerno pulzira navzven in navznoter v obliki sinusoide okrog ravnotežne lege. Površina v obliki žoge se radialno zmanjšuje in povečuje, pri čemer povzroča zvočno valovanje, ki se širi na vse strani. Ker se površina z oddaljenostjo od središče krogle povečuje, se zvočni tlak znižuje obratno sorazmerno z razdaljo od vira.

Enodimenzionalno cilindrično valovanje je bolj kompleksne narave, nekje vmes med ravnim in krogelnim. Nastane v zelo dolgem valju. Če površina valja enakomerno pulzira v radialni smeri okrog neke ravnotežne lege, nastane zvočno valovanje, ki seva navzven kot cilindrično valovanje. Zvočni tlak se znižuje z oddaljenostjo od vira obratno sorazmerno z razdaljo od valja. Na dovolj veliki razdalji od vira sta krogelni in cilindrični valovanji podobni ravnemu valovanju.

Kompleksno valovanje nastane v primeru kombinacije ravnega, sferičnega in/ali cilindričnega valovanja ali v primeru večjega števila različnih zvočnih virov ali s kombinacijo vrste zvokov čistih tonov. Celotni zvočni tlak dveh ali več zvočnih valovanj v istem prostoru se dobi z enostavnim seštevanjem učinkov posameznih valovanj (princip superpozicije).

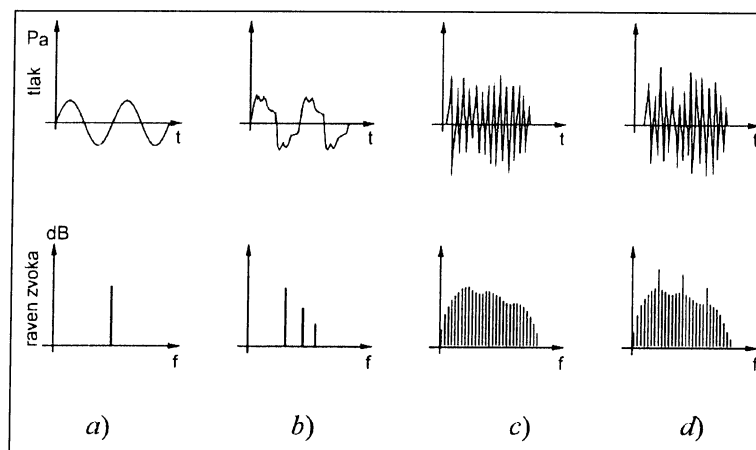
Dve ravni zvočni valovanji z enakima amplitudama in frekvencama, od katerih eno potuje naprej drugo nazaj, se po principu superpozicije seštevata tako, da pride do stojnega zvočnega valovanja. Pri stojnem valovanju vsi deli snovi nihajo z enako frekvenco, amplituda pa se s krajem spreminja. Na mestih, na katerih je enaka nič, so vozli, na katerih je največja, so hrbti. Praktično se stojno valovanje pojavi po odboju valovanja od toge stene.

3.5.3 Vrste zvočnih valovanj glede na obliko spektra

Spekter v splošnem predstavlja potek neke fizikalne veličine (npr. zvočnega tlaka, zvočne intenzitete, zvočne moči, ipd) v odvisnosti od frekvence. S pomočjo spektra in spektralne analize se določi sestava zvočnega valovanja oz. hrupa. Glede oblike zvočnega spektra zvočna valovanja se deli na (slika 10):

- ton;
- zven;
- širokopasovno obliko spektra brez izrazitih tonov diskretnih frekvenc;
- širokopasovno obliko spektra z izrazitimi toni diskretnih frekvenc.

Zvočni spekter določa sila, ki zvočno valovanje vzbuja. Če ima nihanje zvočnega tlaka obliko ene same sinusoide, je tak zvok ton (slika 10a, zgoraj). V frekvenčnem spektru je ton prikazan diskretno z eno samo črto (slika 10a, spodaj). Če je zvok sestavljen iz več sinusnih valovanj z različnimi frekvencami, ki so med seboj v celoštevilčni (harmonični) zvezi, je to zven. Zven ima črtast (linijski) spekter (slika 10b). Ton in zven sta mogoča samo v laboratorijskih razmerah. V praksi nastopa le neperiodično zvočno valovanje z velikim številom naključnih frekvenc in amplitude. V tem primerih je govora o šumu, hrupu in trušču. Šum ima zvezen (kontinuiran) široko-pasovni spekter (slika 10c). Procesni v strojih so posledica različnih vzbujevalnih sil in je zato slika spektra pogosto kompleksna, kombinacija širokopasovnega in linijskega (slika 10d).



Slika 10: Ton, zven, šum in kompleksen zvok

Hrup cestnih vozil, letal pri vzletanju in pristajanju itn. so primeri neperiodičnega vira hrupa. Neperiodičnega hrupa se ne da razstaviti v vrsto čistih tonov, ki bi bili v harmonični zvezi, ampak samo v neskončno število tonov, ki imajo različne amplitude (slika 10c). Pri kompleksnem valovanju se sestavo hrupa določi s spektralno (frekvenčno) analizo. Pri frekvenčni analizi se vrednost zvočnega tlaka (ali raven zvočnega tlaka) nekega zvočnega valovanja določi v vsakem od vrste pasov znotraj celotnega frekvenčnega območja. Vrednosti se narišejo kot funkcija centralne frekvence posameznega pasu. Širine pasov so enake, proporcionalne s centralno frekvenco posameznega pasu ali pa se podrejajo kakšni drugi zakonitosti glede na potrebe. S frekvenčno analizo se pridobijo informacije o amplitudah zvočnega tlaka pri dani frekvenci ali frekvenčnem pasu.

3.6 Zvočni tlak, zvočna intenziteta in zvočna moč

3.6.1 Zvočni tlak

Zvočni tlak p pomeni spremembo motnje okrog ravnotežnega tlaka, npr. atmosferskega tlaka p_0 (slika 1). Matematični zapis spremembe zvočnega tlaka v odvisnosti od kraja in časa se dobi iz valovne enačbe, ki je v splošnem parcialna diferencialna enačba drugega reda. Valovno enačbo se rešuje bodisi analitično ali numerično. Splošne rešitve so odvisne od primera do primera odvisno od poenostavitvev, tj., ali gre za enodimenzionalno (ravno, kroglno, cilindrično), kompleksno ali stojno valovanje.

Zvočni tlaka zaradi hrupa na določenem mestu je sestavljen iz vrste pozitivnih tlačnih motenj (zgoščin) in negativnih tlačnih motenj (razredčin), merjeno od vrednosti ravnotežnega tlaka. Ker bi bila vsota pozitivnih in negativnih odklonov od ravnotežne lege enaka nič, je povprečje teh praktično neuporaben parameter. Zaradi tega se v praksi računa dejanski zvočni tlak ali *RMS* (root mean square) vrednost zvočnega tlaka p_{RMS} , ki pomeni koren iz vsote srednjih vrednosti kvadratov zvočnih tlakov v času vzorčenja. Za kompleksno zvočno valovanje je to podano z enačbo

$$p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [p(t)]^2 dt} \quad (3)$$

Izbira časovnega intervala T vpliva na napako in frekvenčno območje.

3.6.2 Zvočna intenziteta

Zvočna intenziteta I je definirana kot zvočna energija, ki gre skozi enoto površine v enoti časa. Dobi se jo iz produkta zvočnega tlaka p in hitrosti delcev u . Zvočni tlak in hitrost delcev nista nujno v fazi, npr., če se meri v bližini zvočnega vira ali v bližini reflektirajoče površine. V drugih območjih, kjer prevladujejo valovanja, ki se širijo neposredno od zvočnega vira, to je v primeru prostega zvočnega valovanja, se lahko predpostavi, da sta p in u v fazi. V tem primeru je I podana z enačbo

$$I = \overline{pu}, \quad (4)$$

kjer črta nad produktom pomeni časovno povprečje. Iz te enačbe sledi, da je zvočna intenziteta ravnega (sinusnega) vala enaka

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c}, \quad (5)$$

kjer je $p_{RMS} = p_0 / \sqrt{2}$ in p_0 njegova amplituda.

Večina zvočnih valovanj je tridimenzionalna. Če so kroglična (sferična), potem so veličine zvočnega valovanja odvisne samo od časa t in razdalje r od centra od vira. Tudi v tem primeru je intenziteta I podana z enako enačbo (5) kot za ravno valovanje. Bistvena razlika med ravnim in sferičnim valovanjem je v določanju intenzitete zvočnega valovanja v poljubni točki. Pri ravnem valovanju je I neodvisna od razdalje od zvočnega vira, ker je površina valovne fronte konstantna. Pri sferičnem valovanju pa se površina valovne fronte stalno povečuje s širjenjem valovanja na vse strani od zvočnega vira. Za površina je se povečuje s kvadratom razdalje od sferičnega vira, saj je površina krogle $S = 4\pi r^2$. Na razdalji r od sferičnega vira, ki seva enako v vse smeri, se intenziteto I lahko določi iz moči W vira

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c} \quad (6)$$

3.6.3 Zvočna moč

Zvočna moč je merilo za zvočno energijo, ki jo seva zvočni vir. Zvočni moč je v danih obratovalnih razmerah konstantna. Zvočna energija se od zvočnega vira prenaša v obliki zvočnih valov. Zvočni valovi prodirajo skozi medij, ki obdaja zvočni vir, na vse strani. Če ne bi bilo ovir in izgub v mediju, potem bi celotna sevana moč šla enakomerno razporejena skozi površino, ki obdaja vir. Čim večja je razdalja od vira, tem večja je obdajajoča površina okrog vira in tem manjša je moč na enoto površine, ki gre skozi nek element površine. Za neusmerjen sferični zvočni vir je

$$W = IS = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c} 4\pi r^2 \propto P_{RMS}^2 r^2 \quad (7)$$

Če je zvočni vir usmerjen, potem se zvočna intenziteta spreminja po površini v različnih smereh. V tem primeru se celotno zvočno moč W dobi z integriranjem po celotni površini.

3.7 Zvočne ravni

Zvočno valovanje, ki se širi skozi medij, je lahko preprosto sinusno valovanje ali pa superpozicija vrste valovanj enakih ali različnih frekvenc, faz in amplitud.. V poljubni točki prostora, po katerem se širi zvok, se lahko meri trenutni zvočni tlak odvisno od trenutnega toka zvočne energije v prostoru. Zvočni tlak se spreminja v širokih mejah, zato mora biti tudi človeško uho ali merilni inštrument zmožen zaznati oz. izmeriti zvočne tlake, hitrosti delcev, intenzitet in frekvence v zelo širokih mejah. V praksi je faktor sprememb zvočnega tlaka čez 10^{10} , zvočne intenzitete čez 10^{20} , zvočne moči do 10^{10} in frekvenc do 10^6 . Zaradi preglednejšega zapisa zvočnih veličin z velikimi števili, je bilo vpeljeno logaritemsko merilo za te veličine. Takšni skali je dano ime raven, ki nadomešča logaritem. Raven podaja logaritemsko razmerje katerekoli akustične veličine (tlaka, intenzitete, moči, gostote energije, frekvence,...) z njeno referenčno vrednostjo. Ker logaritem nima dimenzije, so ravnem dodelili enoto *bel* (*B*), desetinki vrednosti *decibel* (*dB*). Vrednost v *dB* podaja raven nad ali pod referenčno ravnjo, ki je določen z referenčno vrednostjo akustične veličine. V akustiki je torej enota za raven zvočnega tlaka, zvočne intenzitete in zvočne moči zvočnih virov enaka, tj. *decibel* (*dB*). Pri tem se običajno navaja uporabljena referenčna vrednost, ker so pri različnih veličine različne (in so se tudi spreminjale).

3.7.1 Raven zvočnega tlaka

Raven zvočnega tlaka L_p (v *dB*) je definirana kot 10-kratni logaritem razmerja kvadratov tlakov

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log p + 94 . \quad (8)$$

Pri tem je p dejansko izmerjena vrednost *RMS* v (*Pa*), p_0 pa *RMS* referenčna vrednost $2 \cdot 10^{-5}$ *Pa* določena tako, da njena raven ustreza pragu slišnosti pri mladem in zdravem človeku pri 1000 *Hz*.

Primer: Raven zvočnega tlaka zvočnega pojava s p_{RMS} vrednostjo zvočnega tlaka 20 *Pa* je

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log \frac{20}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 (\log 20 - \log 2 + \log 10^5) = 26 - 6 + 100 = 120 \text{ dB}$$

Izračunana vrednost ustreza zgornji meji slišnosti človeškega ušesa (ki se jo označuje kot prag slišnosti pri 1 *kHz*).

3.7.2 Raven zvočne intenzitete

Raven zvočne intenzitete L_I (v *dB*) pomeni del zvočne moči zvočnega vira, ki gre v določeni smeri skozi enoto površine, definirana kot

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log I + 120 . \quad (9)$$

Pri tem je I izmerjena zvočna intenziteta in I_0 referenčna vrednost $1 \cdot 10^{-12}$ *W/m²*.

3.7.3 Raven zvočne moči

Raven zvočne moči L_W (v dB) je definiran podobno kakor raven zvočne intenzitete:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log W + 120 . \quad (10)$$

Pri tem je W zvočna moč in W_0 referenčna vrednost $1 \cdot 10^{-12} W$.

V vseh treh enačbah za ravni zvoka je enota decibel, vendar teh treh veličin se ne sme med seboj zamenjavati. Razlika med njimi je v tem, da je zvočni tlak skalarna veličina, ki jo instrument zazna v določeni točki prostora, neodvisno od lege zvočnega vira, medtem ko je zvočna intenziteta vektorska veličina, kar pomeni, da je izmerjena vrednost zelo odvisna od lege zvočnega vira oz. usmerjenosti merilne sonde proti viru. Dejansko je zvočni tlak namenjen za kvantitativen popis zvočnega valovanja, na podlagi katerega se potem lahko določi zvočna moč vira. Z merjenjem zvočne intenzitete se lahko določi slika sevanja zvočnega vira in njegova moč. S tem se lahko identificira zvočni vir po velikosti in legi, kar je bistvena prednost zvočne intenzitete v primerjavi z zvočnim tlakom.

3.7.4 Prosto širjene hrupa v okolju

Hrup se od virov širi v okolico. Z različnimi modeli se lahko računsko oceni imisija hrupa na določeni oddaljenosti od vira hrupa, če je poznana zvočna moč vira L_W in pri predpostavki nemotene širjenja. Ta predpostavka v celoti ne drži, ker

- zrak ni brez absorpcije zvoka (le-ta je zlasti odvisna od relativne vlažnosti);
- vertikalni temperaturni gradient povzroča lom zvoka;
- veter vpliva na prenos zvoka v zraku.

Navedeni vplivi so lahko veliki že na relativno majhni razdalji (npr., nekaj $10 m$). V nasprotju z zvokomeri, ki so občutljivi na zvočni tlak in zato se z njimi resnično meri zvočni tlak $p(t)$, si pri računanju širjenja zvoka nazorno lahko pomaga z jakostjo zvoka j in uporabo definicijske enačbe

$$L = 10 \log \frac{j}{j_0} , \quad (11)$$

kjer je $j_0 = 10^{-12} Wm^{-2}$.

Točkovni vir: Izhaja se iz predpostavke, da je celotni energijski zvočni tok skozi poljubno zaključeno ploskev S_1 okrog vira konstanten. Če je sevanje vira izotropno (enako v vse smeri), mora biti po tej predpostavki na dveh različnih oddaljenostih 1 in 2 od središča vira

$$j_1 S_1 = j_2 S_2 \quad (12)$$

in, če se omisli, da sta ploskvi S_1 in S_2 krogelni, velja tudi

$$j_1 r_1^2 = j_2 r_2^2 \quad (13)$$

S pomočjo definicijske enačbe (11) je odnos med ravnema na mestu 1 in mestu 2

$$L_{p,2} = L_{p,1} + 20 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (14)$$

Pri tem pa ni več potreben pogoj, da je širjenje zvoka izotropno, le ravni $L_{p,1}$ in $L_{p,2}$ morata biti na isti premici, ki gre tudi skozi središče vira hrupa. Iz enačbe (4) hitro sledi, da se, pri podvojeni razdalji ($r_2/r_1 = 2$) okrog točkovnega vira brez upoštevanja zraka in ovir, zmanjša raven za 6 dBA. V praksi se pogosto malo zmoti, če se upošteva zmanjšanje za okrog 7.5 dBA.

Linearni viri: Značilna linearna vira sta cesta in železnica. Podobno kot je bil zgoraj temelj za izračunavanje imisije hrupa okrog točkovnega vira zvočna moč L_W , je pri linearnem viru temelj zvočna moč na enoto dolžine. Ker je vir linearen, mora, pri predpostavki, da ni v zraku omembe vredne absorpcije, ista zvočna moč teči skozi vse poljubne valje, ki se jih lahko omisli okrog vira. Če se vzame dva dolga valja z dolžino l in oddaljenostjo r_1 in r_2 in z osjo, ki sovpada z osjo vira. Torej, za zvočni tok j_1 in j_2 mora veljati, da je $2\pi r_1 l j_1 = 2\pi r_2 l j_2$. Iz tega, po definiciji (11) se za raven zvoka dobi

$$L_{p,2} = L_{p,1} + 10 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (15)$$

Iz enačbe (15) hitro sledi, da se, pri podvojeni razdalji ($r_2/r_1 = 2$) okrog linearnega vira brez upoštevanja zraka in ovir, zmanjša raven samo za 3 dBA. V praksi se izkaže, da se za zmerne oddaljenosti na podvojeni razdalje raven zmanjša za okrog 4.5 dBA.

Za točnejše izračune, ki upoštevajo več parametrov, tudi absorpcijo zraka in tal ter predpostavljajo glavno frekvenco v oktavnem pasu 500 Hz, obstajajo, za cestni promet, različni modeli za napovedovanje hrupa v določeni oddaljenosti in višini od ceste, ki temeljijo na izkustvenih enačbah.

3.7.5 Seštevanje več zvočnih virov

V naravi se pogosto sliši zvok, ki je posledica več zvočnih valovanj oz. zvočnih virov. Zvočni tlak v neki točki opazovanja se dobi po principu superpozicije, tj. seštevanja posameznih virov. Rezultirajoče tlačno polje je usmerjeno, v nasprotju z zvočnim poljem vsakega od prisotnih točkastih virov. Razlog za usmerjenost je interferenca. Če imamo točkaste zvočne vire razporejene v vrsto, potem je vsota posameznih tlačnih polj p_i od vsakega vira i v neki točki podana s skupnim tlakom

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (16)$$

RMS vrednost zvočnega tlaka je povprečje enako

$$p_{RMS}^2 = (p_1^2 + p_2^2 + \dots) + 2(p_1 p_2 + p_1 p_3 + \dots), \quad (17)$$

kjer so p_i^2 členi prispevki posameznih virov, členi $p_1 p_2$ pa prispevki, ki upoštevajo usmerjenost zvočnega polja.

Seštevanje zvočnih tlakov čistih sinusnih valovanja: Če sta dve sinusni zvočni valovanji, s trenutnim tlakom v neki fiksni točki v prostor (npr. pri $x = 0$):

$$\begin{aligned} p_1(t) &= P_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) \\ p_2(t) &= P_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \end{aligned} \quad (18)$$

pri čemer sta P_1 in P_2 amplitudi, ω_1 in ω_2 krožni frekvenci (ki se ne razlikujeta preveč) in θ_1 in θ_2 pa njuni fazi, je celotni tlak novega zvočnega valovanja enak vsoti obeh komponent.

$$p_{tot}(t) = p_1(t) + p_2(t) = P_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + P_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) . \quad (19)$$

Dejansko (*RMS*) vrednost obeh komponent se dobi iz enačbe

$$p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [p_1(t) + p_2(t)]^2 dt} , \quad (20)$$

pri čemer je T čas povprečenja, ki je celo število period obeh frekvenc. Rezultat, ki ni naveden, je sestavljeno zvočno valovanje, ki vsebuje poleg osnovnih tonov še njihove druge harmonike.

Če sta frekvenci obeh komponent zvočnega vala popolnoma različni, potem je dejanska (efektivna) vrednost zvočnega tlaka dveh čisto sinusnih valovanj

$$p_{RMS} = \sqrt{p_{RMS1}^2 + p_{RMS2}^2} \quad (21)$$

Seštevanje zvočnih ravni kompleksnih valovanj: Kompleksno valovanje je vsota zvočnih tlakov različnih virov, tako vira, ki se ga opazuje ali meri, kakor tudi sekundarnih in 'parazitskih' virov. Pri ugotavljanju celotnega tlaka se upošteva njihove celotne ravni.

V praksi se meri raven zvočnega tlaka v *dB* in ne zvočni tlak v *Pa* (dejansko se res meri zvočni tlak, vendar razbira se raven zvočnega tlaka, potem ko ga instrument predela), zato vsota ne more biti aritmetična vsota ravni, ker je le-ta logaritem, ampak je treba ravni najprej antilogaritmirati. Antilogaritme (kvadrate zvočnih tlakov) se aritmetično sešteje in rezultat ponovno logaritmirati. 10-kratna vrednost logaritma vsote da celotna raven zvočnega tlaka dveh ali več virov. Ustrezna enačba je

$$L_{p,cel} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (22)$$

Celotna raven večjega števila zvočnih virov je višja od najvišje ravni posameznega vira. Če je razlika med ravnmi zvočnih virov večja od *10 dB* se lahko prispevek vira z manjšo ravno zanemari. Iz enačbe (8) sledi, da je npr.

$$\left(\frac{p_{RMS,1}}{p_0} \right)^2 = 10^{\frac{L_{p,1}}{10}} \quad \text{in} \quad \left(\frac{p_{RMS,2}}{p_0} \right)^2 = 10^{\frac{L_{p,2}}{10}} , \quad (23)$$

Iz enačbe (21) pa

$$\left(\frac{P_{RMS}}{P_0}\right)^2 = \left(\frac{P_{RMS,1}}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{P_{RMS,2}}{P_0}\right)^2. \quad (24)$$

Če se v enačbo (24) vstavita enačbi (23), dobimo

$$\left(\frac{P_{RMS}}{P_0}\right)^2 = \left(10^{\frac{L_{p,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p,2}}{10}}\right)^2. \quad (25)$$

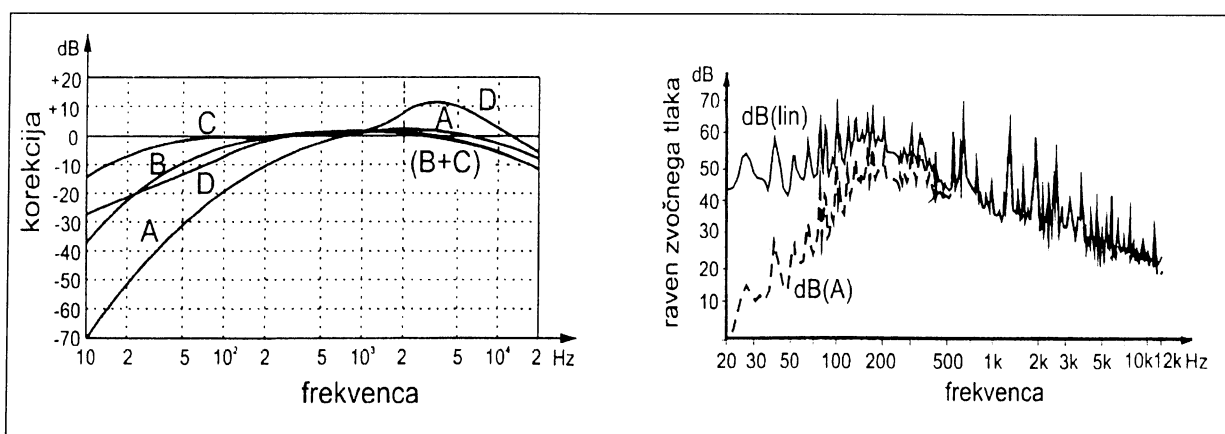
Dobljeno enačbo se logaritmirata, pomnoži z 10 in tako dobimo končno enačbo za seštevanje ravni dveh virov.

$$L_{p,cel} = 10 \log \left(\frac{P_{RMS}}{P_0}\right)^2 = 10 \log \left(10^{\frac{L_{p,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p,2}}{10}}\right) = 10 \log \sum_{i=1}^2 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (26)$$

Brez težav se enačba lahko posploši na več virov.

3.7.6 Vrednotenje izmerjene ravni zvoka

Mikrofoni, kot vhodni senzorji za merjenje zvoka in hrupa so enako občutljivi pri vseh frekvencah slišnega dela spektra. Zato je izmerjena vrednost ravni zvoka linearna in neodvisna od frekvenc. Izmerjeno vrednost se za to označuje bodisi z $dB(\text{lin})$, dBZ (zero frequency weighting) ali kar na kratko z dB . Ker pa uho ni enako občutljivo pri vseh frekvencah, je slišnost zvočnega pojava odvisna od frekvence (slika 2 in 3). Zaradi tega je bila vpeljana enota *fon* za subjektivno oceno jakosti zvoka (slika 3), ki ponazarja slišnost ušesa pri različnih frekvencah. Z namenom prilagoditve izmerjene vrednosti tisti, ki jo človek zares sliši, se kalibrirani signal iz mikrofona z linearnim odzivom pelje na vhod seta frekvenčnih pasovnih filtrov s programiranim frekvenčnim uteženjem. Po dogovoru se standardizirane frekvenčne krivulje uteženja (vrednotenja) označuje z A, B, C, in D, za slab, srednje močan in zelo močan zvok (slika 11a), ki raven zvoka pri nizkih in visokih frekvencah ustrezno oslabijo, v območju največje slišnosti, med 1000 in 4000 Hz, pa ojačajo. Pri 1000 Hz ni korekcije.



Slika 11: a) Krivulje vrednotenja, b) primer linearnega in A-vrednotenega spektra hrupa

Krivulja A-vrednoteno pomeni približno inverzno sliko izofonske krivulje pri 40 fonih (slika 3), B-vrednoteno (ki se danes malo uporablja) pri 70 fonih, C-vrednoteno pri 120 fonih. Ta

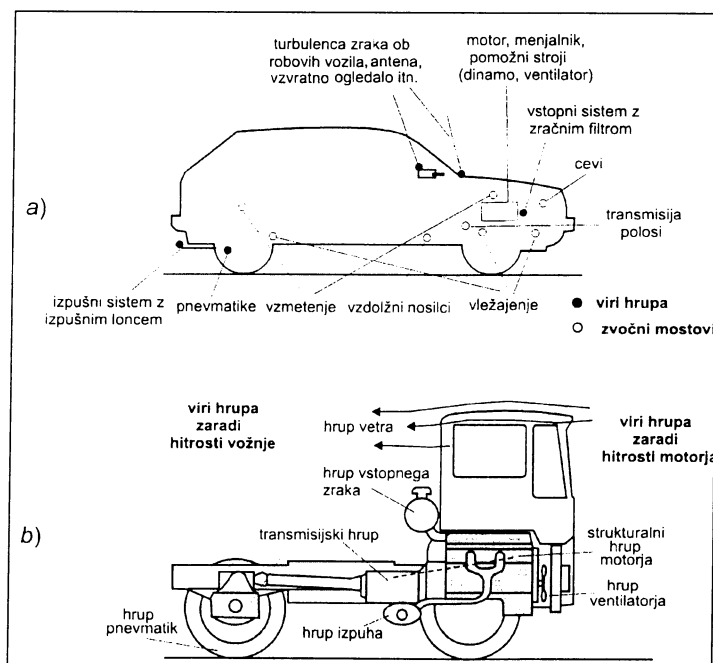
krivulja je relativno ravna in se uporablja pri merjenju maksimalnih ravni (konic) pri impulznem hrupu. D-vrednoteno krivuljo se pogosto uporablja pri merjenju hrupa reaktivnih letal, s katero se upošteva izrazito nadležen visoko frekvenčni hrup. Razbrane vrednosti na instrumentu se označi z A-vrednoteno, B-vrednoteno, itn., enote pa z *dBA*, *dBB*, *dBC* ali *dBD*. Primer linearnega in A-vrednotenega spektra hrupa, merjeno v notranjosti helikopterja, je prikazan na sliki 11b [13].

Zaradi lažjega vrednotenja je celoten slišni spekter razdeljen na več segmentov, na terce (skupno 31) in oktave (skupno 10). Terce in oktave so ozek pas slišnega frekvenčnega spektra, znotraj katerega električni (pasovni) filter spusti zvočni tlak zunaj njega pa ne. Centralne frekvence in širine pasu za oktavne in terčne pasove so standardizirane. Tipične centralne frekvence oktav in terc so določene z naslednjimi enačbami:

$$\text{za oktave: } f_{cent} = \sqrt{f_{sp} f_{zg}} = \sqrt{2} f_{sp} = f_{zg} / \sqrt{2} \quad ; \quad f_{zg} = 2 f_{sp} \quad (27)$$

$$\text{za terce: } f_{cent} = \sqrt[3]{f_{sp} f_{zg}} \quad ; \quad f_{zg} = \sqrt[3]{2} f_{sp} \quad (28)$$

4. VIRI HRUPA PRI MOTORNIM VOZILIH



Slika 12: Viri hrupa pri osebnih (a) in tovornih (b) vozilih

5. HRUP V NARAVNEM IN ŽIVLJENJSKEM OKOLJU: komunalni hrup

5.1 Viri komunalnega hrupa

Komunalni hrup se nanaša na zunanji hrup okolja v mestih in naseljih. V komunalni hrup ne sodijo hrup v notranjosti bivalnih in delovnih prostorov oziroma v stavbah, hrup na delovnem

mestu, v industrijskih obratih in skladiščih. Je posledica razvoja industrije, zato je ta večji v razvitih državah. Karakteristika in jakost hrupa se spreminjata krajevno in časovno, tako čez dan kot čez leto, v času dopustov, šolskih počitnic itd. pri samem opisu komunalnega hrupa in njegovega učinka zato upoštevamo njegovo časovno in krajevno porazdelitev in spremembo. Komunalni hrup povzročajo vsi aktivni viri hrupa:

1. hrup prometa, ki ga povzročajo prometna sredstva (na cesti, tirih, vodi ali zraku);
2. industrijski viri, tovarne, industrijski obrati in servisne delavnice, toplotne, termo- in hidroelektrarne, električni generatorji, rafinirije;
3. cestna in železniška infrastruktura, parkirna hiša ali odprto parkirišče;
4. kompresorske in črpalne postaje, odpraševalni in transportni sistemi;
5. letališče ali helikoptersko vzletišče;
6. strelišče ali poligon za uničevanje neeksplozivnih ubojnih sredstev;
7. poligon za potrebe zaščite in reševanja;
8. objekt za športne ali druge javne prireditve;
9. gostinski ali zabaviščni lokal, ki uporablja zvočne naprave;
10. zvonovi in druge nepremične samostojne zvočne naprave;
11. odprto ali prekrito gradbišče;
12. avtodromi, vrtiljaki, športna strelišča in podobni zabaviščni objekti in naprave;
13. hrup zaradi vetra, grmenja, dežja, toče, oglašanja živali itd.

V tabeli 5 so prikazane vrednosti ravni zvočnega tlaka v dBA za najpogostejše vire komunalnega hrupa in ustrezne vrednosti zvočne energije na dan v kW/dan. Iz tabele je razvidno, da so glavni nosilci zvočne energije cestna motorna vozila, predvsem tovorna vozila. Tako celotno zvočno energijo, ki jo oddajo motorna vozila presegajo 20-kratno vrednost vseh drugih primarnih transportnih sredstev (letal, ladij, železnic, ...).

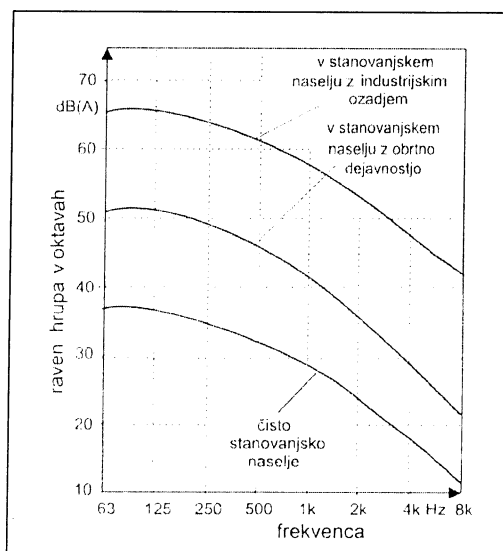
Tabela 5: Raven zvočnega tlaka in zvočna energija na dan

Viri hrupa	L_{Aeq} (v dBA) na razdalji 15 m	izračunana A-vrednotena celotna zvočna energija na dan (kW/dan)
srednji in težki tovornjaki nad 4500 kg	88 (83 do 95)	5800
športni avtomobili	75	1150
osebni avtomobili	69	800
tovornjaki (lažji in dostvani)	72	570
motocikli (na avtocesti)	82	325
avtobusi (mestni in šolski)	73	20
medmestni avtobusi	82	12
motocikli (lokalni cesti)	85	160
kompresor za zrak	81 (64 do 87)	147
generator	77 (70 do 84)	65
pnevmatsko orodje	86 (82 do 88)	36
pnevmatski vrtniki	88 (80 do 98)	
žage	78 (72 do 82)	
traktor, vlačilec	80 (76 do 96)	
buldožerji	80 (70 do 95)	
nakladači	79 (75 do 96)	
rovokopači	85 (74 do 92)	
žerjavi	88 (85 do 90)	
premična dvigala	83 (70 do 94)	

5.2 Komunalni hrup zaradi cestnega prometa

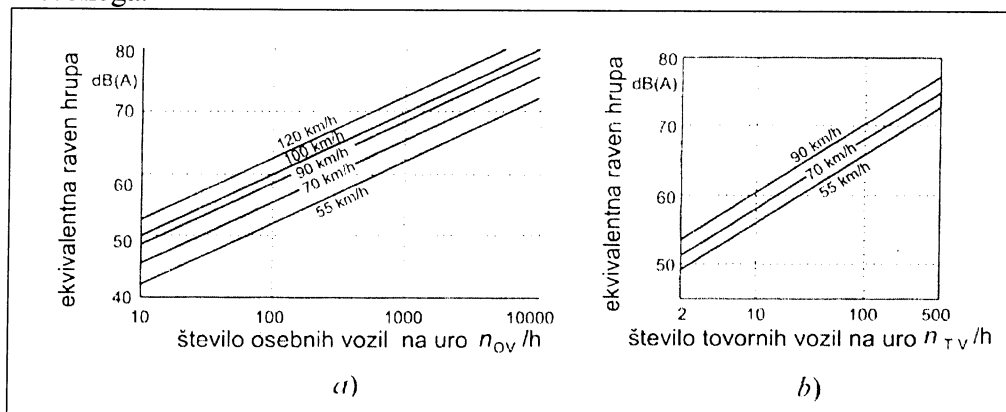
Cestni hrup prevladuje med vsemi viri komunalnega hrupa, predvsem zaradi velikega števila vozil, goste cestne infrastrukture in velike zvočne moči v primerjavi z drugimi viri hrupa. Tako je hrup cestnih vozil najbolj moteč.

Spekter komunalnega hrupa se zelo razlikuje od primera do primera zaradi velikega števila različnih zvočnih virov. Če je komunalni hrup posledica pretežno cestnih vozil, potem je njegov spekter približno tak kot prikazan na sliki 13.



Slika 13: Spekter komunalnega hrupa merjen v naseljenih predelih s pretežno cestnim hrupom

Ekvivalentna raven hrupa cestnega prometa se zvišuje s številom vozil. Na sliki 14a je prikazana porast L_{Aeq} s številom osebnih avtomobilov/uro (n_{OV}), na sliki 14b pa ustrezno povišanje zaradi tovornih vozil (n_{TV}), na razdalji 25 m v prostem zvočnem polju (brez sten, ovir,...). Iz slike 14 se vidi, da ima hitrost vozil večji vpliv kot gostota prometa, saj se s podvojitvijo hitrosti vozil L_{Aeq} poveča za več kot 10 dBA, medtem ko se le-ta s podvojitvijo gostote prometa poveča le za 3 dBA. Vendar, zaradi omejenih hitrosti vozil, je vpliv gostote vozil kljub temu večji (slika 14). Razvidno je tudi, da je vpliv tovornega prometa bistveno večji od osebnega.



Slika 14: Odvisnost L_{Aeq} od števila vozil na uro; (a) osebna, (b) tovorna

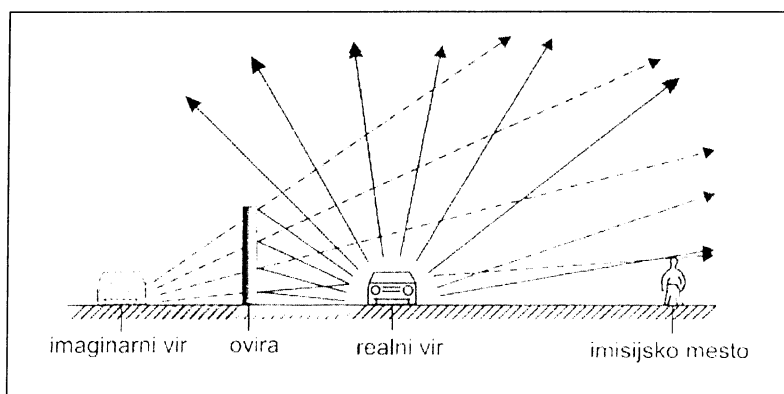
Premice na sliki 14a upoštevajo le gostoto prometa in se jih lahko dobi z enačbama:

$$L_{eq,OV} = 30 \log v_{OV} + 10 \log n_{OV} - 20 \quad (29)$$

$$L_{eq,TV} = 20 \log v_{TV} + 10 \log n_{TV} - 11,5 \quad (30)$$

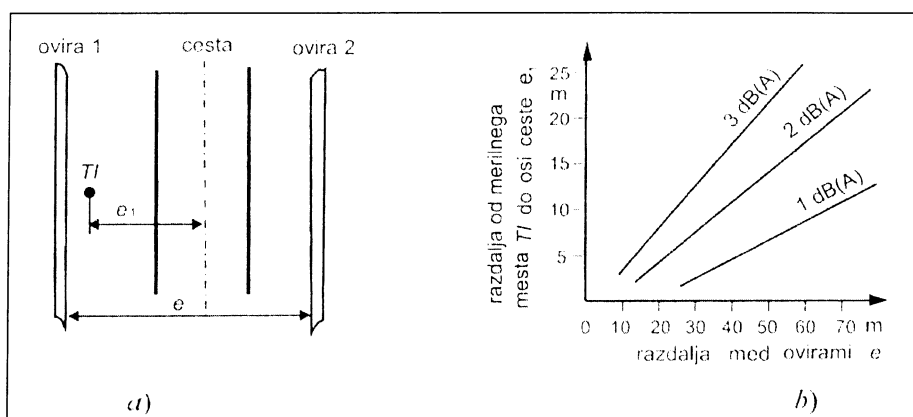
ustrezno za osebna in tovorna vozila.

Če je v bližini mesta emisije oziroma opazovalca reflektirajoča površina, potem je potrebna dodatna korekcija. V primeru, da je ovira samo na eni strani ceste in pod predpostavko, da je vozilo nekoherenten vir hrupa, potem se promet lahko opazuje hrup kot v primeru dveh virov (slika 15), prvi je dejansko vozilo v prometu, drugi pa namišljeno vozilo, kot preslikani vir za oviro (črtkane linije) kot posledica refleksije. V prikazanem primeru se raven hrupa lahko poveča za največ 3 dBA, odvisno od razdalje ovire od sredine poti in strukturne ovire.



Slika 15: Vpliv reflektirajoče površine na zvočno polje in L_{Aeq} na mestu imisije

V primeru, da je prometnica zaprta z obeh strani z reflektirajočimi površinami (poslopja ali protihrupne cestne ograje, slika 16a), se L_{Aeq} na mestu imisije med ovirami poveča kot prikazano na sliki 16b. Nasprotno, če pa je med virom hrupa oziroma prometnico in mestom imisije ovira (nasip, zid, zelenica,...), se hrup zmanjša.



Slika 16: Povečanje L_{Aeq} pri obojestransko postavljenih reflektirajočih ovirah

5.3 Merjenje in vrednotenje komunalnega hrupa

Raven komunalnega hrupa se časovno spreminja zaradi spreminjajoče se narave zvočnih virov. Ti se spreminjajo tako po moči kot po času delovanja. Pri tem imamo opravka s standardno obliko nestacionarnih zvočnih virov, tako da ravni zvočne moči ali zvočnega tlaka

takšnih virov ni mogoče določiti. Zato se pri popisu komunalnega hrupa uporablja ekvivalentna raven, ki pomeni energijsko povprečno srednjo vrednost hrupa v danem časovnem obdobju, običajno podnevi in ponoči. Ta vrednost se dobi iz logaritma signala povprečnega zvočnega tlaka, ki se izvede po procesu integriranja (povprečenja) v časovnem intervalu t_0 . Torej, povprečna raven hrupa ne pomeni povprečenja ravni hrupa (v dB) v diagramu odvisnosti ravni hrupa od časa, ampak se konverzija v dB (dobi se jo z logarimiranjem) opravimo šele potem, ko je časovno povprečenje končano. Tej ravni zvočnega tlaka se reče linearna raven, ker je mikrofonski občutljiv pri vseh frekvencah. Ker pa je občutljivost človeškega ušesa pri različnih frekvencah različna, linearno raven inštrument uteži tako, da izmerjene vrednosti prilagodi slišnosti ušesa.

Pogosto se v praksi srečuje s hrupnim dogodkom, ki ima zelo visoke ravni in traja kratek čas. Če je takšen zvočni pojav neperiodičen (če se ne pojavlja v enakih časovnih intervalih), se govori o prehodnem zvočnem pojavu ali impulznem hrupu (udarec s kladivom, prelet letala, pok petarde, mimo vozeče vozilo, ...). Karakteristika takšnega hrupa je, da štrli v spektru hrupa (sloika 10d), v primerjavi s hrupom ozadja, v obliki igle, zato se mu reče tudi iglasti zvočni pojav. Meri se ga posebej in upošteva pri določanju obremenitve okolja na imisijskem mestu podnevi in/ali ponoči, s prištevanjem razlike med ravnjo impulznega hrupa in ekvivalentne ravni hrupa.

Če je hrup posledica enega ali več posameznih, med seboj ločenih hrupnih dogodkov, ki se zgodijo v časovnem intervalu t_0 , se ekvivalentna raven lahko izračuna iz ekspozicijskih ravni posameznih hrupnih dogodkov. Ker se ekspozicijska raven hrupa nanaša na poseben zvočni pojav, se ga meri posebej. Sodobni merilniki hrupa merijo v realnem času in hkrati:

1. ekvivalentno raven hrupa v dBA ,
2. pripadajoči terčni spekter za ugotavljanje vpliva poudarjenih tonov,
3. impulzni hrup za ugotavljanje vpliva impulznega hrupa,
4. ekspozicijsko raven hrupa.

Na podlagi teh meritev se določi obremenitev okolja podnevi in/ali ponoči. Izmerjeno ekvivalentno raven hrupa na mestu imisije v naravnem in življenskem okolju se primerja z dopustnimi vrednostami glede na čas in območje (I, II, III, IV) varstva pred hrupom [x].

6. OPREMA ZA MERJENJE HRUPA

6.1 Merilna oprema

6.1.1 Izbira parametrov na zaslonu

Za sprotno spremljanje poteka meritev je potrebno iz baze parametrov instrumenta za prikaz rezultatov na zaslonu izbrati tiste, ki o trenutnem merjenem hrupu dajo čim boljše informacijo (L_{Aeq} , L_{AF1} , L_{AF10} , L_{AF90} , L_{AF99} , L_{AFMax}). Parametri L_{AF10} , L_{AF90} , in L_{AFMax} so dodatni parametri, ki se jih pri meritvah industrijskega hrupa ne uporablja. Razlog je v tem, da za oceno neugodnega vpliva cestnega hrupa podatek L_{Aeq} nezadovoljivo opisuje hrup, ki je sestavljen iz posamičnih hrupnih dogodkov, npr. ko ne gre za enakomeren pretok vozil, pač pa za posamezna vozila, ki ga ljudje občutijo bolj obremenjujoče kot enakomeren hrup. Zato veliko raziskav kot dober indikator pri vrednotenju hrupa upošteva L_{AF10} , ki opisuje predvsem večja odstopanja (spremenljivost) posameznih hrupnih dogodkov od povprečja. Takih dogodkov je še posebej največ v nočnem času, saj je promet redkejši in izgubi lastnost enakomernega hrupa. L_{AF90} , ki predstavlja raven hrupa presežena v 90 %

merjenega časa in zaradi statistične narave delno že upošteva večja odstopanja od povprečja, kar mu daje prednost pred L_{Aeq} .

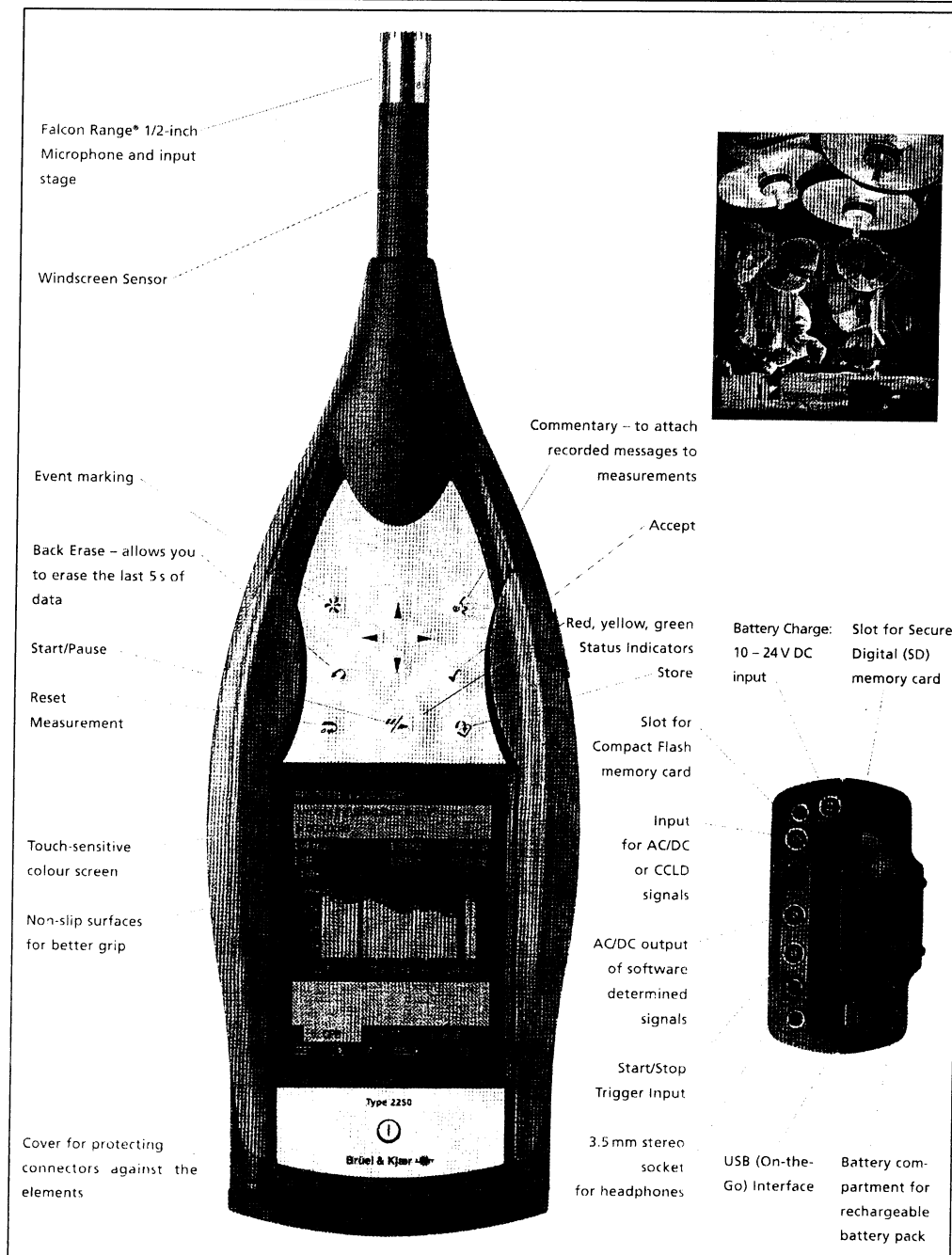
Na osnovi poznavanja L_{AF10} in L_{AF90} se lahko določi ti. indeks prometnega hrupa TNI (Traffic Noise Index) definiran z enačbo

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30. \quad (31)$$

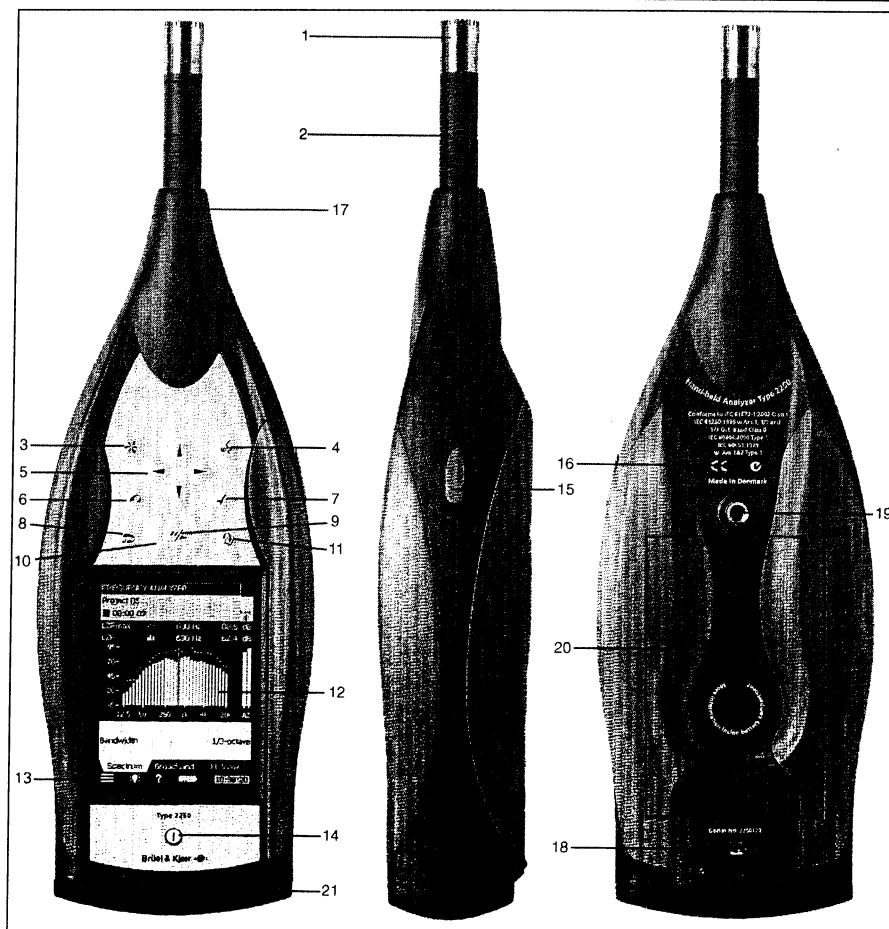
Poleg podatkov o hrupu je na zaslonu koristno spremljati še zaporedno številko meritve in pretečeni čas meritve.

6.1.2 Bruel&Kjaer merilec hrupa, tip 2250

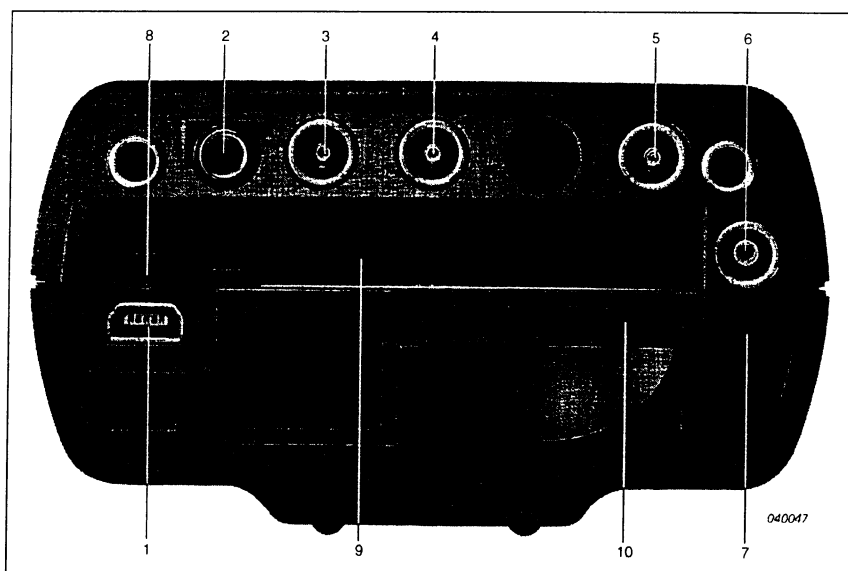
Na sliki 17 je prikazan merilnik hrupa B&K, tip 2250, vodilnega danskega proizvajalca tovrstnih inštrumentov Bruel&Kjaer. Na sliki 18 je prikazan taisti instrument s pogledi s prednje, zadnje in stranske strani, na sliki 19 pa še pogled na stikalno stran merilca. Pregled hardvera merilca hrupa, tip 2250, je prikazan na sliki 20. Na sliki 21 so prikazi glavnih menujev za tri načine meritev; merjenje ravni hrupa, frekvenčna analiza in logiranje. Na sliki 22 je prikana način merjenje ravni hrupa v križišču Slovenska in Gosposvetska v Ljubljani. Instrument je zavrt v celofan (ne mikrofoni!) zaradi naletavnja mokrega snega. Na sliki 23 je prikazan način merjenje ravni hrupa na izhodu izpušne cevi motorja.



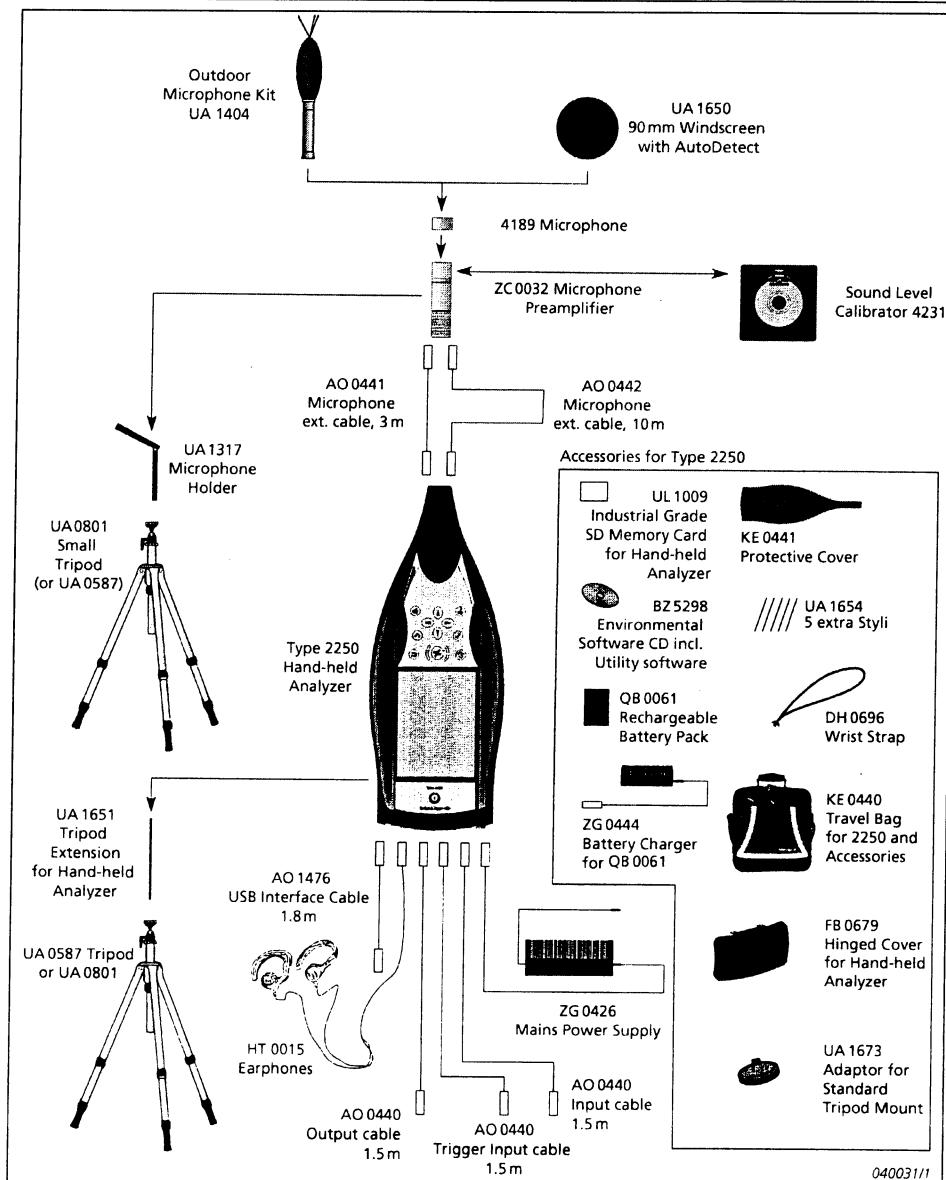
Slika 17: B&K merilnik hrupa, tip 2250



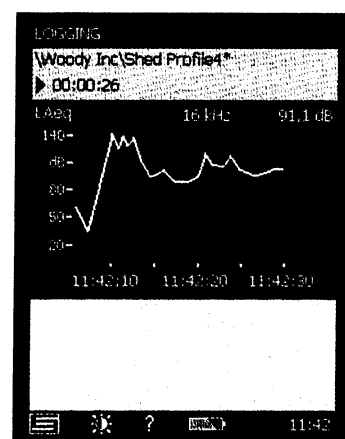
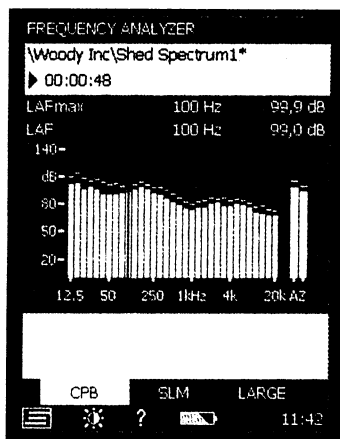
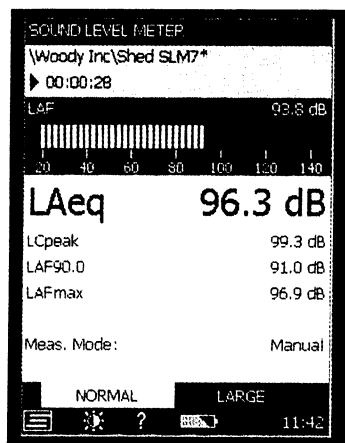
Slika 18: Pogledi merilca 2250 s prednje, zadnje in stranske strani



Slika 19: Stikalna stran merilca hrupa, tip 2250



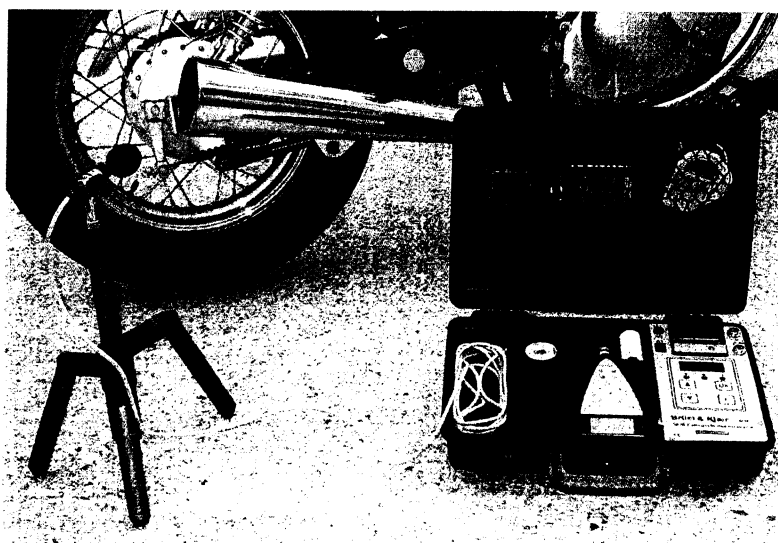
Slika 20: Pregled hardvera merilca hrupa, tip 2250



Slika 21: Prikazi glavnih menujev za tri načine meritev; a) merjenje ravni hrupa, b) frekvenčna meritev, c) logiranje



Slika 22: Merjenje ravni hrupa v križišču Slovenska in Gosposvetska v Ljubljani



Slika 23: Merjenje ravni hrupa na izhodu izpušne cevi motorja

7. PRAVNE PODLAGE

Področje varstva pred hrupom ureja Zakon o varstvu okolja [1], podrobneje pa Uredba o hrupu v naravnem in življenjskem okolju [2], njena dopolnitev [3] in drugi predpisi; Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu hrupa za vire hrupa ter o pogojih za njihovo izvajanje [4], Navodilo o metodologiji za izdelavo poročilo vplivu na okolje [5] in Uredba o hrupu zaradi cestnega ali železniškega prometa [6].

V zvezi z varstvom pred hrupom zaradi cestnega ali železniškega prometa je pomembna Uredba o hrupu zaradi cestnega ali železniškega prometa [6], ki določa posebne zahteve v zvezi z varstvom pred hrupom zaradi cestnega in železniškega prometa. Posebej določa

- mejne vrednosti ravni hrupa zaradi posameznega vira;
- način izračuna ravni hrupa in;
- ukrepe za zmanjševanje in preprečevanje čezmernega hrupa zaradi cestnega ali železniškega prometa.

Zakon o urejanju prostora [7] v 15. členu določa, da se dejavnosti in posegi v prostor, ki ogrožajo človeško zdravje razmestijo in organizirajo tako, da se njihov škodljiv vpliv na okolje v okviru s predpisi dovoljenih stopenj zmanjša na najmanjšo možno mero.

Zakon o urejanju naselij in drugih posegov v prostor [8] tudi določa, da se na podlagi usmeritev in odločitev iz prostorskih sestavin občinskega planskega akta in strokovnih podlag v prostorskem izvedbenem načrtu določijo prostorski pogoji za realizacijo planskih odločitev ter na njihovi osnovi razčlenijo in prikažejo tudi rešitve za varstvo in izboljševanje bivalnega in delovnega okolja.

Zakon o javnih cestah [9] zaradi preprečitve škodljivih vplivov posegov v prostor ob državni cesti in promet na njej, ob teh cestah določa varovalni pas, v katerem je raba prostora omejena. Gradnja in rekonstrukcija gradbenih objektov ter postavljanje kakršnih koli drugih objektov in naprav v varovalnem pasu državne ceste so dovoljeni le s soglasjem Direkcije za ceste (DRSC). Varovalni pas je pri avtocestah širok 45 m, pri hitrih cestah 35 m, pri glavnih cestah 25 m, pri regionalnih 15 m in pri državnih kolesarskih poteh 5 m.

7.1 Predpisi o hrupu v naravnem in bivalnem okolju

Temeljni predpis o varovanju naravnega in bivalnega okolja pred hrupom je Uredba o hrupu v naravnem in življenjskem okolju [2], njena dopolnitev [3] in drugi predpisi [4,5,6]. Uredba določa:

- mejne vrednosti ravni hrupa v naravnem in življenjskem okolju zaradi posameznega vira hrupa;
- način izračunavanja dnevne in nočne ravni hrupa in;
- ukrepe za zmanjševanje in preprečevanje čezmernega hrupa.

Določbe Uredbe veljajo za zunanji hrup, ki ga v posameznih območjih naravnega in bivalnega okolja povzročajo stalne ali občasne emisije hrupa enega ali več virov hrupa, če za posamezne vire obremenitve okolja s hrupom poseben predpis posameznih vprašanj ne ureja drugače. Pomen posameznih pojmov po tej uredbi je naslednji:

1) Hrup je vsak zvok, ki v naravnem in življenjskem okolju vzbuja nemir, moti človeka in škoduje njegovemu zdravju ali počutju ali škodljivo vpliva na okolje.

2) Vir hrupa je objekt ali naprava, katerega uporaba ali obratovanje povzroča v okolju stalen ali občasen hrup, in je predvsem:

- industrijski, obrtni ali drug proizvodni objekt ali naprava, objekt ali naprava v kmetijstvu in gozdarstvu;
- cestna in železniška infrastruktura, parkirna hiša ali odprto parkirišče;
- letališče ali helikoptersko vzletišče;
- strelišče ali poligon za uničevanje neeksplozivnih bojnih sredstev;
- poligon za potrebe zaščite in reševanja;
- objekt za športne ali druge javne prireditve;
- gostinski ali zabavišni lokal, ki uporablja zvočne naprave;
- zvonovi in druge nepremične samostojne zvočne naprave;
- odprto ali prekrito gradbišče;
- avtodromi, vrtiljaki, športna strelišča in podobni zabavišni objekti in naprave.

Vir hrupa je tudi javna prireditev, javni shod in vsaka uporaba zvočnih ali drugih naprav, ki povzroča hrup, če se odvija na javnem kraju, na prostem ali v objektu, ki za takšne dejavnosti sicer ni namenjen.

Da bi razumeli kako odpraviti neželene posledice hrupa moderne družbe, se moramo vrniti na osnove in spoznati kako se hrup v našem okolju širi in kaj to sploh je.

7.1.1 Stopnje varstva pred hrupom, območja in mejne vrednosti

Uredba [2] določuje 4 stopnje varstva pred hrupom ali območja in sicer:

I. stopnja: velja za območje, ki potrebuje povečano varstvo pred hrupom, kot je naravno območje namenjeno turizmu in rekreaciji, neposredna okolica bolnišnic, zdravilišč in okrevališč ter območje naravnih parkov;

II. stopnja: za območje, kjer ni dopusten noben poseg v okolje, ki je moteč zaradi hrupa. To je območje, ki je primarno namenjeno bivanju oz. zgradbam z varovanimi prostori, čisto stanovanjsko območje, okolica objektov vzgojno varstvenega in izobraževalnega programa ter programa osnovnega zdravstvenega varstva, območje igrišč ter javnih parkov, javnih zelenih ter rekreacijskih površin;

III. stopnja: za območja, kjer je dopusten poseg v okolje, ki je manj moteč zaradi hrupa kot je trgovsko-poslovno-stanovanjsko območje, ki je hkrati namenjeno bivanju oz. zgradbam z varovanimi prostori in obrtnim ter podobnim proizvodnim dejavnostim (mešano območje), območje namenjeno kmetijski dejavnosti ter javno središče, kjer se opravljajo upravne, trgovske, storitvene ali gostinske dejavnosti;

IV. stopnja: za območje, kjer je dopusten poseg v okolje, ki je zaradi hrupa lahko bolj moteč, to je območje brez stanovanj, namenjeno industrijski ali obrtni in drugi podobni proizvodnji, transportni, skladiščni ali servisni dejavnosti ter hrupnejšim komunalnim dejavnostim.

Uredba predpisuje 4 vrste mejnih vrednosti:

- mejne dnevne (L_d) in nočne (L_n , tabela 1);
- kritične mejne vrednosti za posamezna območja (tabela 2);
- mejne konične ravni hrupa za določeno območje (tabela 3);

- mejne ravni za posamezen vir hrupa glede na posamezno območje (tabela 4).

Tabela 1: Mejne dnevne in nočne ravni hrupa za posamezna območja

Območje	Mejne ravni (dBA)	
	L_n	L_d
IV.	70	70
III.	50	60
II.	45	55
I.	40	50

Kritične mejne ravni so tiste nad katerimi so obvezni ukrepi.

Tabela 2: Kritične ravni za posamezna območja

Območje	Kritične mejne ravni (dBA)	
	L_n	L_d
IV.	70	80
III.	59	69
II.	53	53
I.	47	57

Mejne ravni hrupa za vire hrupa so nekoliko nižje od mejnih ravni za posamezna območja, ker naj bi manjše vrednosti zagotavljale izpolnjevanje splošnih pogojev za območje, kjer ne deluje samo en vir, ampak deluje istočasno več virov hrupa.

Tabela 3: Mejne konične ravni za posamezna območja

Območje	Mejne konične ravni (dBA)	
	L_n	L_d
IV.	90	90
III.	70	95
II.	65	75
I.	60	75

Tabela 4: Mejne dnevne in nočne ravni hrupa za posamezni vir hrupa za posamezna območja

Območje	Mejne ravni za vir hrupa (dBA)	
	L_n	L_d
IV.	68	68
III.	48	58
II.	42	52
I.	37	47

7.1.2 Kriteriji in vrste veličin za ocenjevanje hrupa

Uredba [2] in še posebej Pravilnik [4] in njegova Priloga 1 določajo kriterije in vrste veličin, ki so predmet prvih meritev in obratovalnega monitoringa. Razen običajnih splošno znanih merskih veličin, kot so raven hrupa L in ekvivalentna raven L_{eq} , poznajo naši predpisi še ocenjeno raven $L_{r,TN}$, ki je L_{eq} popravljena s korekcijo za impulzni in tonski značaj hrupa, in se nanaša na izbrano obdobje TN .

Uredba loči štiri značilna obdobja dneva, ki naj bi bila z vidika odzivnosti na hrup različna. Označuje se jih s časovnimi obdobji "T_i", in sicer je

- T₁ = 12 h za dnevni čas od 7:00 do 19:00;
- T₂ = 4 h za dnevni čas od 6:00 do 10:00 in od 19:00 do 22:00;

- $T_3 = 8$ h za nočni čas od 22:00 do 6:00;
- $T_4 = 1$ h za najbolj hrupno uro v nočnem času (22:00 do 6:00), običajno med 22:00 in 23:00 ali med 5:00 in 6:00.

Za presojo razmer sta odločilni *dnevna* L_d in *nočna* L_n raven. Prva se nanaša na obdobje 6:00 do 22:00, druga pa na obdobje 22:00 do 6:00. Dnevna raven se razlikuje od ocenjene tako, da se ocenjene ravni v dnevnem času določajo za vsako uro, v času od 6:00 do 7:00 in od 19:00 do 22:00 pa se ocenjenim ravnem prišteje še utež 6 *dB*A, ker naj bi bil hrup v tem času še posebej moteč.

Iz tako popravljenih urnih ravni se izračuna dnevna raven. Nočna raven L_n je kar povprečna ocenjena raven za celo nočno obdobje. Izjema je le, če presega raven, v katerikoli uri noči povprečno ocenjeno raven za več kot 4 *dB*A. V tem primeru velja kot L_n kar raven najbolj hrupne ure noči. Največkrat je to v praksi med 6:00 in 7:00.

Dnevna raven se razlikuje od ocenjene tako, da se ocenjene ravni v dnevnem času določajo za vsako uro, v času od 6:00 do 7:00 in od 19:00 do 22:00 pa se ocenjenim ravnem prišteje 6 *dB*A, ker naj bi bil hrup v tem času posebno moteč [2].

1. Raven hrupa $L(t)$; veličina s katero se meri imisija hrupa zaradi obratovanja enega ali več virov hrupa na določenem kraju in v določenem času. Če se raven hrupa izraža v *dB*A, se jo določa iz A tehtane vrednosti tlaka zvočnega valovanja po enačbi

$$L(t) = 10 \log \left[\frac{p_A(t)}{p_0} \right]^2 \quad (32)$$

kjer je:

- $p_A(t)$ efektivna vrednost zvočnega tlaka (v *Pa*), ki je izmerjen z merilnikom s frekvenčno uteženo karakteristiko tipa A, kot jo določa standard IEC 651,
- p_0 referenčni zvočni tlak $20 \mu Pa$.

2. $L_{AS}(t)$; izmerjena vrednost ravni hrupa (v *dB*A) in izmerjena z merilnikom, ki ima frekvenčno uteženo karakteristiko tipa A in časovno uteženo karakteristiko tipa S (slow), določeno v tehnični specifikaciji IEC 651.

3. $L_{AF}(t)$; izmerjena vrednost ravni hrupa (v *dB*A) in izmerjena z merilnikom, ki ima frekvenčno uteženo karakteristiko tipa A in časovno uteženo karakteristiko tipa F (fast), določeno v tehnični specifikaciji IEC 651.

4. $L_{AI}(t)$; izmerjena vrednost ravni hrupa (v *dB*A) z merilnikom, ki ima frekvenčno uteženo karakteristiko tipa A in časovno uteženo karakteristiko tipa I, določeno v tehnični specifikaciji IEC 651. Izmerjeno vrednost $L_{AI}(t)$ se uporablja pri vrednotenju obremenitev okolja s hrupom z izrazitimi impulzi.

5. Ekspozicijska raven hrupa L_{EA} ; veličina izračunana iz izmerjenih vrednosti ravni hrupa po enačbi

$$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1L(t)} dt \right), \quad (33)$$

kjer je T_0 čas 1 s in $(t_2 - t_1)$ časovni interval, ki je dovolj dolg, da zajame vse zvočne pojave hrupnega dogodka za katerega velja ekspozicijska raven.

6. Ekvivalentna raven hrupa L_{eq} ; iz izmerjenih ravni hrupa izračunana veličina, ki je za določen časovni interval t_0 po energiji enaka energiji izmerjenega hrupa. Ekvivalentno raven se izračuna po enačbi

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L(t)} dt \right) \quad (34)$$

kjer sta t_1 začetek ter t_2 konec časovnega intervala t_0 . Časovni interval t_0 je časovno obdobje meritve hrupa, ki je enako času trajanja značilne obremenitve iz vira, katerega vpliv na raven hrupa ugotavljamo, in je daljši od ene minute.

7. Povprečna raven hrupa $L_{AI,pov}$; veličina, ki je izračunana iz izmerjenih vrednosti $L_{AI}(t)$ po enačbi

$$L_{AI,pov} = 10 \log \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L_{AI}(t)} dt \right) \quad (35)$$

kjer sta t_1 začetek ter t_2 konec časovnega intervala t_0 .

8. Ocenjena raven hrupa $L_{r,TN}$; na celo številčno vrednost zaokrožena ocena, ki se jo izračuna za čas trajanja enega od štirih obdobjev dneva TN iz ekvivalentnih ravni $L_{eq,i}$, izmerjenih v časovno si zaporednih intervalih $t_{0,i}$ ter iz popravkov zaradi izrazitih impulzov in poudarjenih tonov po enačbi

$$L_{r,TN} = 10 \log \left(\sum_i \frac{t_{0,i}}{TN} 10^{0.10L_{r,i}} \right), \quad (36)$$

kjer je $L_{r,i} = L_{eq,i} + K_{1,i} + K_{2,i}$ ocena povprečne ravni hrupa izračunana za čas i -te meritve obremenitve okolja zaradi hrupa, $t_{0,i}$ časovni interval i -te meritve, $K_{1,i}$ popravek zaradi izrazitih impulzov v času i -te meritve in $K_{2,i}$ popravek zaradi poudarjenih tonov v času i -te meritve. Posamezni časovni interval $t_{0,i}$ ni krajši od 1 minute. Za časovne intervale $t_{0,i}$ velja:

$$\sum_i t_{0,i} = TN \quad (37)$$

9. Konična raven hrupa L_I ; vrednost ravni hrupa, ki je presežena v trajanju 1 % vsega časovnega intervala t_0 , v katerem se izvajajo meritve.

10. Raven ozadja L_{ozadje} ; vrednost ravni hrupa, ki je pri obratovanju samo nepomembnih virov hrupa presežena v trajanju 99 % vsega dnevnega obdobja TN , za katerega se izračunava ocenjeno raven.

7.2 Določanje obremenitev s hrupom cestnega prometa

Določanje obremenitve s hrupom zaradi cestnega prometa je predpisano v Uredbi o hrupu zaradi cestnega ali železniškega prometa [6]. Uredba določa način izračuna za oceno dnevne L_d in nočne L_n ravni hrupa. Račun velja za dolge in ravne odseke vozišč, katerih dolžina l je na vsako stran od kraja, za katerega se določa ocenjena raven hrupa, večja od 3-kratne oddaljenosti s , to je razdalje med krajem vira hrupa in krajem hrupa. Obremenitev se torej preverja le računsko po modelu in praviloma ne tudi z meritvijo. Kadar odsek vozišč, za katerega se izračunavajo ocenjene ravni hrupa, ne izpolnjujejo navedenih pogojev, se ocenjene ravni hrupa izračunavajo po določenih DIN standarda [10] in smernicah RLS-90 [11]. (Opomba: Smernice RLS-90 je izdalo Ministrstvo za promet zvezne republike Nemčije, ki so v slovenskem prevodu in izvirniku dosegljiva v Centru za dokumentalistiko Ministrstva MOP.)

Ocenjena raven hrupa L_d (v *dB*A) se izračunava za posamezno vozišče ceste za časovno obdobje dneva od 6. do 22. ure se izračuna po enačbi

$$L_d = L_d^{25} + D_{hitrost} + D_{nagib} + D_{vozišče} + D_{oddaljenost} + D_{višina} + D_{teren} + K, \quad (38)$$

kjer je L_d^{25} povprečna vrednost ocenjene ravni hrupa za dnevni čas z različnimi popravki $D_{hitrost}$, D_{nagib} , $D_{vozišče}$, $D_{oddaljenost}$, $D_{višina}$, D_{teren} , K , ki so definirani v nadaljevanju. Gornji indeks (25) se nanaša na oddaljenost 25 m.

Podobno, povprečna vrednost ocenjene ravni hrupa L_n se izračunava za posamezno vozišče ceste za časovno obdobje dneva od 22. do 6. ure po enačbi

$$L_n = L_n^{25} + D_{hitrost} + D_{nagib} + D_{vozišče} + D_{oddaljenost} + D_{višina} + D_{teren} + K, \quad (39)$$

kjer je L_n^{25} povprečna vrednost ocenjene ravni hrupa za nočni čas z ustreznimi popravki.

Vrednosti L_d^{25} in L_n^{25} sta ocenjeni ravni hrupa, ki ga povzroča promet na oddaljenosti 25 m od sredine vozišča ter na povprečni višini $h_m = 2.25$ m pri povprečni hitrosti vozil 100 km/h. Pri tem je kraj vira hrupa je na sredi vozišča in 0.5 m nad obrabno plastjo vozišča. Povprečna višina h_m se določi kot povprečna višinska razlika med tlemi in krajem vira hrupa ter višinske razlike med tlemi in krajem hrupa. Vrednosti L_d^{25} in L_n^{25} se izračunata po enačbi

$$L_{d,n}^{25} = 37.3 + 10 * \log [M (1 + 0,082 * p)] \quad (40)$$

kjer je p odstotek vseh težkih vozil v prometu s skupno težo nad 2.8 t in M gostota prometa na obravnavanem vozišču (pretokom vozil na uro izražen v št. vozil/uro), ki se izračunava iz tabele 5 glede na vrednost povprečnega enodnevnega pretoka vozil (DVP) in ter glede na kategorijo ceste. DVP se izračuna na podlagi podatkov (štetja prometa ali ocen o prometu za koledarsko leto). Če na podlagi podatkov štetja prometa ni razviden delež težkih vozil s skupno maso nad 2,8 t ali če podatkov o štetju prometa ni, se za delež težkih vozil prevzamejo ocene iz tabele 5.

Tabela 5: Ocena gostote prometa v odvisnosti od dnevnega pretoka vozil in deleža tov. Vozil

kategorija ceste	dan: (6 – 22) h		noč: (22 – 6) h	
	<i>M</i>	<i>p</i>	<i>M</i>	<i>p</i>
	št. vozil/h	%	št. vozil/h	%
avtocesta, priključna cesta	0.06 DVP	25	0.014 DVP	45
magistralna cesta	0.06 DVP	20	0.011 DVP	20
regionalna cesta	0.06 DVP	20	0.008 DVP	10
lokalna cesta	0.06 DVP	10	0.011 DVP	3

$D_{hitrost}$ je popravek pri izračunu ocenjene ravni hrupa glede na hitrost vozil. Vrednost popravka je odvisna od povprečne hitrosti vozil in deleža tovornih vozil v prometu p in se izračuna po enačbi

$$D_{hitrost} = L_1 - 37,3 + \log\left(\frac{(100 + (10^{(0,1D)} - 1) * p)}{(100 + 8,23 * p)}\right) \quad (41)$$

kjer je:

$$D = L_2 - L_1,$$

$$L_1 = 27,7 + 10 * \log [1 + (0,02 * V_1)^3],$$

$$L_2 = 23,1 + 12,5 * \log (V_2),$$

V_1 in V_2 povprečni hitrosti (v km/h), ustrezno osebnih in tovornih vozil.

D_{nagib} je popravek pri izračunu ocenjene ravni hrupa zaradi nagiba vozišča in se določi po tabeli 6.

Tabela 6: Popravek D_{nagib} zaradi nagiba vozišča

vzpon/padec cestišča (%)	D_{nagib} (dBA)
≤ 5	0.0
6	0.6
7	1.2
8	1.8
9	2.4
10	3.0
za vsak naslednji % nagiba	0.6

* Opomba: Vmesne vrednosti se izračunajo z linearno interpolacijo

$D_{vozišča}$ je popravek pri izračunu ocenjene ravni hrupa zaradi različnih lastnosti materiala, iz katerega je obrabna plast vozišča in je določen v tabeli 7.

Tabela 7: Popravek $D_{vozišča}$ zaradi obrabne plasti vozišča pri hitrostih več kot 50 km/h

obrabna plast vozišča	$D_{vozišča}$
Liti asfalt	0.0
Asfaltni beton	0.5
Beton ali valjan/liti asfalt	1.0
Valjan asfalt z gladko površino	2.0
Valjan asfalt s hrapavo površino	4.0

$D_{\text{oddaljenost}}$ določa odvisnost ocenjene ravni hrupa zaradi oddaljenosti, t.j. razdalje med krajem vira (sredina vozišča in 0,5 m nad voziščem) hrupa in krajem hrupa, za katerega se izračunava ocenjena raven hrupa. $D_{\text{oddaljenost}}$ se odvisno od oddaljenosti s izračunava po enačbi

$$D_{\text{oddaljenost}} = 15,8 - 10 * \log(s) - 0,0142 * s^{0,9} \quad (42)$$

Pri izračunu ocenjene ravni hrupa zaradi cestnega prometa se kraj hrupa določa vedno enako: pri objektih z varovanimi prostori je kraj hrupa na zunanji steni zgradbe v višini stropa (ali 0,2 m nad zgornjim robom okna) varovanega prostora, na prostem pa je kraj hrupa 2 m nad tlemi na sredi površine, za katero računamo vpliv hrupa zaradi cestnega prometa.

D_{teren} določa odvisnost ocenjene ravni hrupa zaradi nasipov in pregrad za varstvo pred hrupom, vkopa vozišča in vzpetin na terenu, večjih objektov ter drugih pomembnih krajevnih danosti, ki povzročajo odboje hrupa. Sprememba D_{teren} se izračuna skladno z določili DIN 18 005 [10] in smernicami RLS-90 [11].

K je korektura zaradi bližine semaforiziranega križišča ali združitve dveh ali več cest in se ga odčita v odvisnosti od oddaljenosti do križišča oz. združitve po tabeli 8.

Tabela 8: Dodatek K zaradi bližine semaforiziranih križišč ali združitve cest

Oddaljenost vozila od križišč (v m)	K (dBA)
do 40	3
40 do 70	2
70 do 100	1

Ocenjena raven zaradi celotne ceste je po Uredbi seštevek prispevkov iz obeh voznih smeri in se izračuna po enačbah

$$L_{d, \text{skupni}} = 10 \log \left(10^{0,1L_{d,1}} + 10^{0,1L_{d,2}} \right) \quad (43)$$

$$L_{n, \text{skupni}} = 10 \log \left(10^{0,1L_{n,1}} + 10^{0,1L_{n,2}} \right) ,$$

kjer se indeksa 1 in 2 nanašata na prvo in na drugo smer vožnje.

Literatura

1. Nacionalni program varstva okolja, Uradni list (UL) RS, št 83/99;
2. Uredba o hrupu v naravnem in življenjskem okolju, UL RS, št. 45/95, str. 1-7 in nadaljnje spremembe;
3. Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o hrupu v naravnem in življenjskem okolju, UL RS, št. 22/96;
4. Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu hrupa za vire hrupa ter o pogojih za njihovo izvajanje, UL RS, št. 70/96, str. 17-22;
5. Navodilo o metodologiji za izdelavo poročilo vplivu na okolje, UL RS, št. 70/96;
6. Uredba o hrupu zaradi cestnega ali železniškega prometa, UL RS, št. 45/95, str. 11-15;
7. Zakon o urejanju prostora, UL SRS, št. 18/84 in nadaljnji;
8. Zakon o urejanju naselij in drugih posegov v prostor, UL RS, 45/95 in nadaljnji;
9. Zakon o javnih cestah, UL RS, št. 29/1997;
10. DIN 18005, Zmanjšanje hrupa pri prostorskem planiranju: računske metode, prvi del, 1987;
11. Smernice RLS-90, Amtsblatt des Bundesrepublik Deutschland, st. 7/1990;
12. Kladnik, R.: Osnove fizike za tehnike, DZS, Ljubljana, 1968;
13. Čudina, M.: Tehnična akustika, UL FS 2001;

