Základy merania technologických veličín jadrového zariadenia

MaR JE
doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.

Merania v prevádzke technologických zariadení JE

meranie teplo technických veličín: tlak, prietok, hladina, teplota

meranie mechanických veličín: poloha, pohyb, vibrácie, sila, napätie a pod.

meranie fyzikálno-chemických veličín kvapalín a plynov koncentrácia prímesí, Cl, H_3BO_3, pH ...)

meranie elektrických veličín: napätie, prúd, impedancia

meranie jadrovo-fyzikálnych a radiačných veličín: hustota toku neutrónov, dávkový príkon ...

Základné pojmy v meraní - **veličina**

Vlastnosť javu, telesa alebo látky, ktorá sa dá kvalitatívne stanoviť a kvantitatívne určiť sa nazýva (meracia) **veličina**.

Výraz, ktorý reprezentuje veličinu v systéme veličín ako násobok mocnín faktorov, ktoré reprezentujú základné veličiny daného systému, sa nazýva **rozmer veličiny**.

Bezrozmerná veličina je taká veličina v rozmerovom vyjadrení, ktorej všetky exponenty rozmerov základných jednotiek sa redukujú na nulu.

Základné pojmy v meraní - **jednotka**

- (Meracia) **jednotka** je určitá veličina, definovaná a prijatá dohodou, s ktorou sa porovnávajú ostatné veličiny toho istého druhu, aby sa vyjadrili ich veľkosti vzhľadom na túto veličinu. Treba si uvedomiť, že meracie jednotky majú dohodou priradené **názvy a značky**.

- **Hodnota** (veličiny) je veľkosť určitej veličiny vo všeobecnosti vyjadrená ako meracia jednotka vynásobená číslom. **Číselná hodnota** (veličiny) je podiel hodnoty veličiny a jednotky použitej na jeho vyjadrenie.

Medzinárodný systém jednotiek SI

- **Základné jednotky** predstavujú výber siedmich dobre definovaných jednotiek (meter, kilogram, sekunda, ampér, kelvin, mól, kandela) odpovedajúcich siedmym veličinám (dĺžka, hmotnosť, čas, elektrický prúd, termodynamická teplota, látkové množstvo, svietivosť). Konvenciou sa považujú za rozmerovo nezávislé.
- Jednotky vytvárané kombináciou základných jednotiek v súlade s algebrickými pravidlami, spájajúcimi odpovedajúce veličiny sa nazývajú **odvodené jednotky**. Niektoré z takýchto odvodených jednotiek môžu mať osobitné názvy a značky. Tie sa potom dajú samostatne použiť na vytváranie iných odvodených jednotiek.

Nové definície jednotiek SI

- **The kilogram** -- will be defined by the Planck constant (h)
- **The ampere** -- will be defined by the elementary electrical charge (e)
- **The kelvin** -- will be defined by the Boltzmann constant (k)
- **The mole** -- will be defined by the Avogadro constant (N_A)

Defining constant	Symbol	Numerical value	Unit
hyperfine transition frequency of Cs	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
speed of light in vacuum	c	299 792 458	$m\ s^{-1}$
Planck constant	h	$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$	J s
elementary charge	e	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmann constant	k	$1.380\ 649 \times 10^{-23}$	$J\ K^{-1}$
Avogadro constant	N_A	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
luminous efficacy	K_{cd}	683	$lm\ W^{-1}$

Definičné vzťahy základných jednotiek SI

$$1\,\mathrm{Hz} = \frac{\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{or} \quad 1\,\mathrm{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}}$$

$$1\,\mathrm{kg} = \left(\frac{h}{6.626\,070\,15\times10^{-34}}\right)\mathrm{m}^{-2}\,\mathrm{s}$$

$$1\,\mathrm{m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458}\right)\mathrm{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458}\frac{c}{\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}} \approx 30.663\,319\frac{c}{\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}}$$

$$1\,\mathrm{A} = \left(\frac{e}{1.602\,176\,634\times10^{-19}}\right)\mathrm{s}^{-1}$$

$$1\,\mathrm{K} = \left(\frac{1.380\,649}{k}\right)\times10^{-23}\,\mathrm{kg\,m^2\,s^{-2}}$$

$$1\,\mathrm{mol} = \left(\frac{6.022\,140\,76\times10^{23}}{N_{\mathrm{A}}}\right)$$

$$1\,\mathrm{cd} = \left(\frac{K_{\mathrm{cd}}}{683}\right)\mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}\,sr^{-1}}$$

Odvodené jednotky SI s osobitnými názvami a značkami

Odvodená jednotka	Odvodená jednotka		Vyjadrená pomocou	
	Názov	Značka	ostatných jednotiek SI	základných jednotiek SI
Rovinný uhol	radián	rad		$m\cdot m^{-1} = 1$
Priestorový uhol	steradián		sr	$m^2\cdot m^{-2} = 1$
Frekvencia	hertz	Hz		s^{-1}
Sila	newton	N		$m\cdot kg\cdot s^{-2}$
Tlak, napätie	pascal	Pa	$N\cdot m^{-2}$	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
Energia, práca, množstvo tepla	joule	J	N·m	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}$
Výkon, tepelný tok, žiarivý tok	watt	W	$J\cdot s^{-1}$	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
Elektrický náboj	coulomb	C		A·s
Rozdiel elektrického potenciálu, elektromotorická sila	volt	V	$W\cdot A^{-1}$	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
Kapacitancia	farad	F	$C\cdot V^{-1}$	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
Elektrický odpor	ohm	Ω	$V\cdot A^{-1}$	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
Elektrická vodivosť	siemens	S	Ω^{-1}	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^3\cdot A^2$
Magnetický tok	weber	Wb	V·s	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
Hustota magnetického toku	tesla	T	$Wb\cdot m^{-2}$	$kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
Induktancia	henry	H	$Wb\cdot A^{-1}$	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
Svetelný tok	lumen	lm		cd·sr
Intenzita osvetlenia	lux	lx	$lm\cdot m^{-2}$	$m^{-2}\cdot cd\cdot sr$
Aktivita (vztiahnutá na rádionuklid)	becquerel	Bq		s^{-1}
Absorbovaná dávka, energia odovzdaná látke, kerma	gray	Gy	$J\cdot kg^{-1}$	$m^2\cdot s^{-2}$
Dávkový ekvivalent, ekvivalent okolitej dávky, ekvivalent smerovej dávky, ekvivalent osobnej dávky	sievert	Sv	$J\cdot kg^{-1}$	$m^2\cdot s^{-2}$
Katalytická aktivita	katal	kat		$mol\cdot s^{-1}$

Jednotky mimo sústavy SI

akceptuje sa použitie spolu s jednotkami SI

Názov	Značka	Hodnota v jednotkách SI	Poznámky
minúta	min	1 min =60 s	
hodina	h	1 h = 60 min = 3600 s	
deň	d	1 d = 24 h = 86 400 s	
stupeň	°	1° = (π/180) rad	Norma ISO 31 doporučuje, aby sa stupeň namiesto používania minút a sekúnd radšej dekadicky delil.
minúta	′	1′ = (1/60)° = (π/10 800) rad	
sekunda	″	1″ = (1/60)′ = (π/548 000) rad	
liter	l, L	1 L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3	Alternatívnu značku L prijala 16. CGPMv roku 1979. V USA sa pre liter prednostne používa značka L.
metrická tona	t	1 t = 10^3 kg	Tento názov sa pre uvedenú jednotku používa v USA. Pôvodný text BIPM používa názov prijatý CIPM - tona, pričom sa v poznámke pod čiarou uvádza, že v niektorých anglicky hovoriacich krajinách sa táto jednotka nazýva metrická tona.
neper	Np	1 Np = 1	Jednotka neper sa používa na vyjadrenie hodnôt takých logaritmických veličín, ako sú hladina poľa, hladina výkonu, hladina hlasitosti a logaritmický dekrement. Na získanie číselných hodnôt veličín, ktoré sa vyjadrujú pomocou jednotky neper, sa používajú prirodzené logaritmy. Neper je jednotka koherentná so sústavou SI, doteraz ju však CIPM neprijala za jednotku SI. Pri použití tejto jednotky je veľmi dôležité špecifikovať veličinu. Jednotka sa nesmie používať tak, aby v sebe zahŕňala veličinu.
bel	B	1 B = (1/2) $\ln_{10}$(Np)	Jednotka bel sa používa na vyjadrenie hodnôt takých logaritmických veličín, ako sú hladina poľa, hladina výkonu, hladina hlasitosti a útlm. Na získanie číselných hodnôt veličín, ktoré sa vyjadrujú pomocou jednotky bel, sa používajú dekadické logaritmy. Často sa používa decibel – dekadický podiel jednotky bel. Pri použití tejto jednotky je veľmi dôležité špecifikovať veličinu. Jednotka sa nesmie používať tak, aby v sebe zahŕňala veličinu.

Jednotky mimo sústavy SI

ich hodnoty v jednotkách SI sa získali experimentálne

Názov	Značka	Hodnota v jednotkách SI	Poznámky
elektrónvolt	eV	1 eV = 1,602 177 33(49) × 10^{-19} J	Elektrónvolt predstavuje kinetickú energiu získanú elektrónom pri prechode potenciálovým rozdielom 1 V vo vákuu. Hodnota elektrónvoltu je prevzatá z CODATA Bulletin, 1986, č. 63.
unifikovaná atómová hmotnostná jednotka	u	1 u = 1,660 540 2(10) × 10^{-27} kg	Unifikovaná atómová hmotnostná jednotka sa rovná 1/12 hmotnosti neviazaného atómu nuklidu ^{12}C, v pokoji a v jeho základnom stave. Hodnota unifikovanej atómovej hmotnostnej jednotky je prevzatá z CODATA Bulletin, 1986, č. 63.
astronomická jednotka	ua	1 ua = 1,495 978 70(30) × 10^{11} m	Astronomická jednotka predstavuje vzdialenosť, ktorá sa približne rovná strednej hodnote vzdialenosti Zeme od Slnka. Hodnota astronomickej jednotky je prevzatá z IERS Conventions (1996).

Jednotky mimo sústavy SI

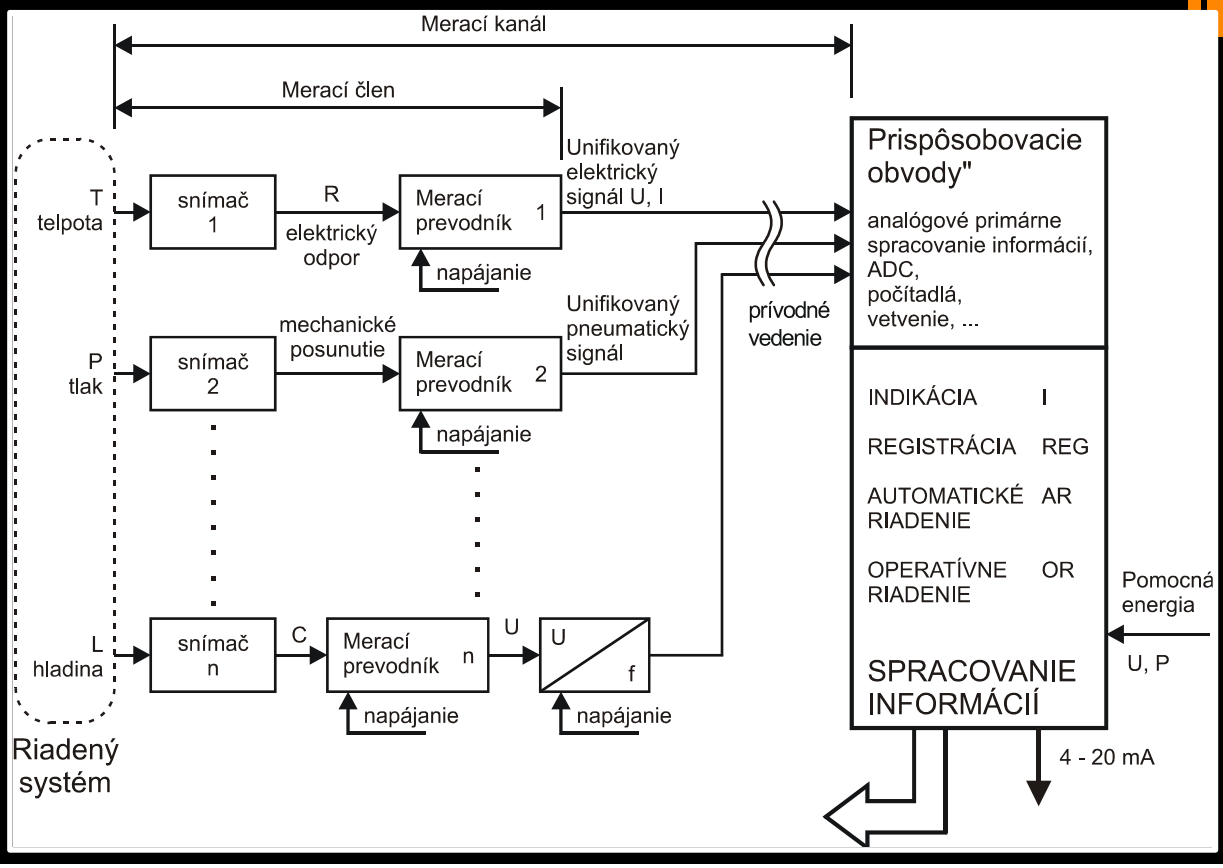
pri ktorých sa akceptuje ich použitie

Názov	Značka	Hodnota v jednotkách SI	Poznámky
námorná míľa		1 námorná míľa = 1852 m	Námorná míľa predstavuje špeciálnu jednotku, určenú na vyjadrenie vzdialenosti v námorníctve alebo letectve. Uvedenú konvenčnú hodnotu prijala Prvá osobitná hydrografická konferencia (Monako, 1929), pričom tejto jednotke dala názov medzinárodná námorná míľa. Jednotka doteraz nemá medzinárodne uznávanú značku. Túto jednotku pôvodne vybrali preto, že jedna námorná míľa na povrchu Zeme predstavuje jednu uhlovú minútu v jej strede.
uzol		1 námorná míľa za hodinu = (1852/3600) m/s	Jednotka uzol doteraz nemá medzinárodne uznávanú značku.
ár	a	1 a = 1 dam^2 = 10^2 m^2	Jednotky ár, hektár a ich značky prijala CIPM v roku 1879 a používajú sa na vyjadrenie plošného obsahu pôdy.
hektár	ha	1 ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2	
bar	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10^5 Pa	
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10^{-10} m	
barn	b	1 b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2	Barn predstavuje osobitnú jednotku, zavedenú v jadrovej fyzike, ktorá sa používa na vyjadrenie efektívneho prierezu.
curie	Ci	1 Ci = 3,7.10^{10} Bq	Jednotka aktivity
roentgen	R	1 R = 8,7 mGy vo vzduchu	Jednotka expozície
rad	rad	1 rad = 10 mGy	Jednotka absorbovanej dávky
rem	rem	1 rem = 10 mSv	Jednotka ekvivalentnej dávky

Meracie princípy

- V procese merania je sledovaná veličina transformovaná snímačom na tzv. ***prirodzený signál charakterizovaný nízkou energetickou úrovňou***. Tento signál nie je vo väčšine prípadov vhodný pre prenos informácií na miesto spracovania. Podľa prirodzeného signálu možno rozlišovať ***pasívne*** a ***aktívne*** snímače.
- **Pasívne snímače** **<u>vyžadujú zdroj pomocnej energie</u>**, preto musia byť zapojené do energetického obvodu, v tohto vyhodnocovacieho obvodu. Vhodným príkladom je nepriame meranie odporu odporového snímača teploty mostíkovou metódou.
- **Aktívne snímače** sa vplyvom meranej veličiny správajú ako nízkoenergetické zdroje, ktorých výstupné signály sú spravidla elektronicky upravované do vhodnej formy. Klasickými príkladmi sú snímače teploty – termočlánky alebo snímače obrátok – tachogenerátory.

Informačný podsystém riadiaceho systému



Snímače procesných veličín

- Pri riešení meracích kanálov moderných RS sa jednoznačne uprednostňujú snímače s prirodzeným **elektrickým signálom**, tj. so zmenou elektrického parametra, ako napr. R – el. odpor, U - napätie, C- kapacita, Q - náboj, prípadne indukčnosť L. V prípade, že prirodzený signál je reprezentovaný **mechanickou veličinou** (mechanický posuv alebo napätie) doplní sa elektrický merací kanál o prevodník prirodzeného signálu mechanického charakteru na elektrický signál.

- Snímač spolu s meracím prevodníkom tvorí často jeden konštrukčný a priestorový celok – **merací člen (kanál)**, ktorý je umiestnený v štandardných moduloch, tj. meracích armatúrach, hlaviciach a pod.

Snímače procesných veličín

- V súčasnej dobe býva termín ***snímač*** často nahradzovaný pojmom ***senzor***. Senzor bol najskôr chápaný len ako synonymum výrazu snímač.

- V súčasnosti sa však presadzuje v odbornej literatúre názor, že termín senzor (senzorový systém) reprezentuje často celý merací člen a kanál alebo merací systém.

- V dozimetrii používame pojmy **radiačná sonda** alebo **detektor**, pod ktorými sa tiež chápe systém zložený zo **snímača** (GM trubica, scintilačný kryštál, polovodičový kryštál) spolu s predzosilovačom, a niekedy už aj s ADC a WIFI (**smart sonda**).

Merací prevodník

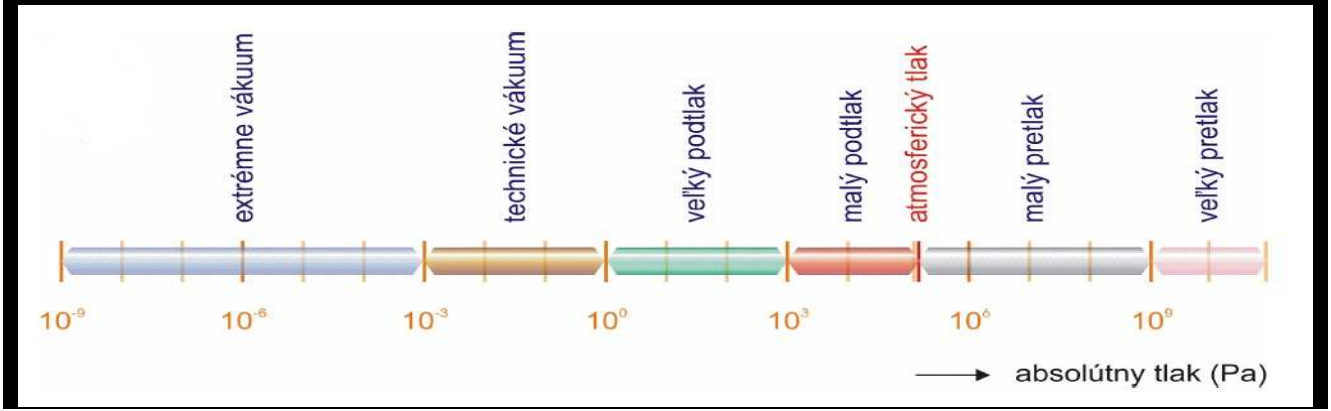
- Merací prevodník je funkčný prvok, ktorý transformuje prirodzený signál zo snímača na požadovaný (dohodnutý) druh a hodnotu (rozsah) fyzikálnej veličiny (elektrická, pneumatická, optická, a pod.), ktorý je vhodný na ďalší prenos informácie alebo na jej spracovanie.
- Výstupné signály z meracích členov možno podľa ich charakteru rozdeliť na:
  a) spojité (analógový, intenzitný)
  b) nespojité:
    - impulzný (šírkovo alebo frekvenčne modulovaný),
    - logický (binárny),
    - číslicový (kódovo–impulzne modulovaný).

Meranie tlaku a tlakového rozdielu

- V technickej praxi sa najčastejšie meria tlak v tekutinách (v kvapalinách alebo v plynoch). Pritom sa používa niekoľko pojmov, ktoré upresňujú, aký tlak sa meracím prostriedkom odmeral. Buď sa nameraný tlak vzťahuje k absolútnemu nulovému tlaku, alebo k barometrickému tlaku:
  - **absolútny nulový tlak** (absolútne vákuum) je teoretický nulový tlak v priestore dokonale zbavenom akýchkoľvek hmotných častíc,
  - **absolútny tlak** je nameraný tlak vztiahnutý k absolútnej tlakovej nule,
  - **rozdielový tlak** (tlaková diferencia) je rozdiel dvoch tlakov, pričom ani jeden z nich nie je zhodný s barometrickým tlakom,
  - **barometrický tlak** (niekedy sa nazýva atmosférický alebo okolitý tlak) je absolútny tlak vzduchu v danom mieste a za skutočných podmienok.
    Hodnota normálneho barometrického tlaku prepočítaná na hladinu mora pri 0 °C je 101 325 Pa,

Pretlak

- **Pretlak p_e** sa definuje ako $p_e = p - p_o$,
  kde p je nameraný absolútny tlak a p_o je barometrický tlak.
- Pretlak môže byť kladný alebo záporný. Závisí to od toho, či je tlak p väčší ako barometrický tlak po alebo naopak. Záporný pretlak sa nazýva **podtlak**.
- Pretlak sa meria tak, že na jeden vstup snímača rozdielového tlaku sa privedie meraný tlak a druhý vstup snímača sa prepojí s atmosférou. Prístroj na meranie pretlaku, ako aj podtlaku, sa nazýva **manometer**.



Pascal, hydrostatický, kinetický a dynamický tlak

Tlak sa definuje ako podiel sily a plošného obsahu.

Jednotkou tlaku je jeden **pascal** - značka Pa.
Podľa definície tlak 1 Pa vyvolá sila 1 N, rovnomerne rozložená na ploche s obsahom 1 m^2, pričom je táto plocha kolmá na smer pôsobiacej sily.

Teda Pa = $N \cdot m^{-2}$

$$p = \frac{dF}{dS}$$

Hydrostatický tlak p_s

$$p_s = \rho \cdot g \cdot h$$

Kinetický tlak p_k

$$p_k = -\frac{w^2 \cdot \rho}{2}$$

V stlačiteľných tekutinách sa v dôsledku ich ***stlačiteľnosti s*** mení kinetický tlak p_k na **dynamický tlak p_d**

$$p_d = p_k \cdot s$$

Celkový tlak p_c prúdiaceho média

$$p_c = p_s + p_d$$

Stavová rovnica

Tlak je významnou stavovou veličinou. Na základe stavovej rovnice sa pomocou neho definuje stav plynov a pár kvapalín.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

- *p* - tlak, *V* - objem, *n* - látkové množstvo v móloch,
- *T* - termodynamická teplota
- *R* je univerzálna plynová konštanta, R = (8,31441 ± 0,0012) $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$,

Prevod tlakových jednotiek na Pascal

Jednotka	Pascalov
atmosféra	$1{,}013\times10^{5}$
bar	$1{,}000\times10^{5}$
dyne/cm^2	$1{,}000\times10^{-1}$
palce vodného stĺpca (4 °C)	$2{,}491\times10^{2}$
palce ortuťového stĺpca (0 °C)	$3{,}386\times10^{3}$
kg/m^2	9,807
pond/inch^2 (PSI)	60895×10^{3}
pond/foot^2	$4{,}788\times10^{1}$
torr (mm ortuti 0 °C)	$1{,}333\times10^{2}$

Tlakomery

- Bežné tlakomery v zásade využívajú dva princípy určovania neznámeho tlaku:
  - vychádzajú zo základného definičného vzťahu - kvapalinové, zvonové a piestové tlakomery
  - snímajú deformáciu citlivého prvku tlakomera a z nej určujú pôsobiaci tlak - tlakomery s rôznymi **deformačnými členmi**.
- Zmena geometrie citlivého člena sa môže prenášať na stupnicu tlakomera **mechanicky**, alebo sa môže snímať **elektricky**.
- Zmena rozmeru citlivej časti snímača (celkové predĺženie Δl alebo relatívne $\Delta\varepsilon$) sa transformuje na elektrickú veličinu a podľa použitého princípu tejto premeny sa snímače tlaku pre priemyselné použitie delia na **odporové** (potenciometrické a tenzometrické), **kapacitné**, **indukčnostné** a **rezonančné**.

Rozdelenie tlakomerov

- Tlakomery môžeme rozdeliť z rôznych hľadísk. Najčastejšie ich rozdeľujeme podľa **určenia** na:
  - **manometre** na meranie pretlakov (kladných alebo záporných),
  - **barometre** na meranie tlaku ovzdušia,
  - **vákuometre** na meranie veľkého podtlaku,
  - **manovákuometre** na meranie pretlaku a podtlaku,
  - **diferenčné tlakomery** na meranie tlakového rozdielu.

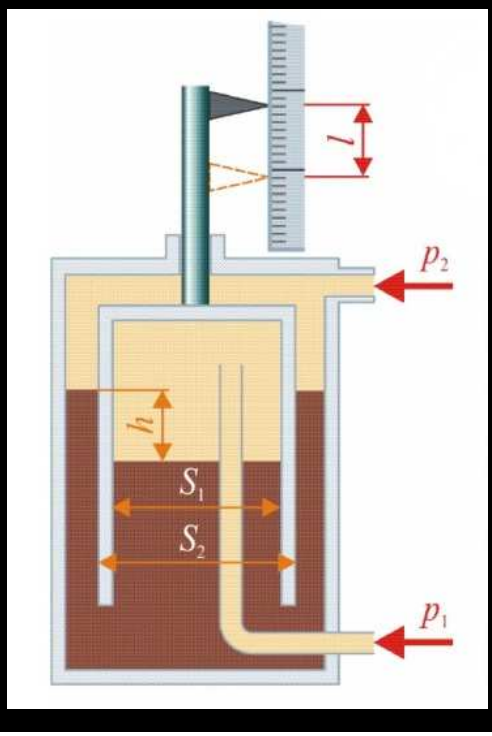
Kvapalinové merače tlaku:
Zvonový manometer

Sú založené na princípe rovnováhy medzi meraným tlakom a hydrostatickým tlakom stĺpca meracej kvapaliny.

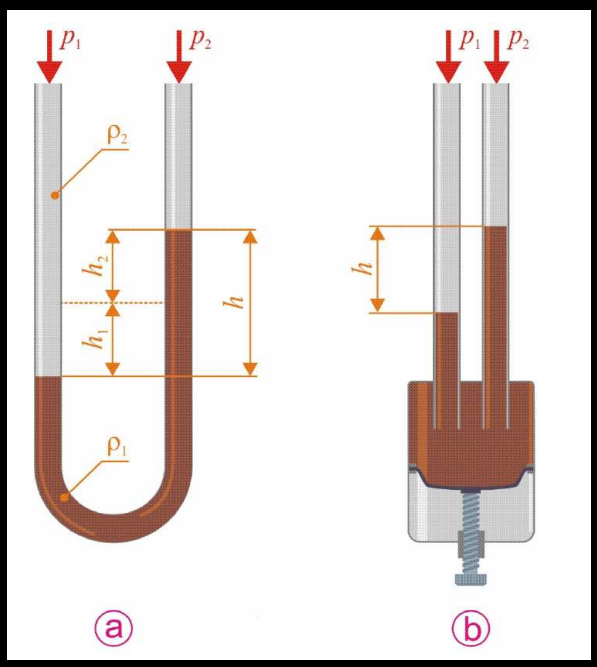
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \rho g l$$

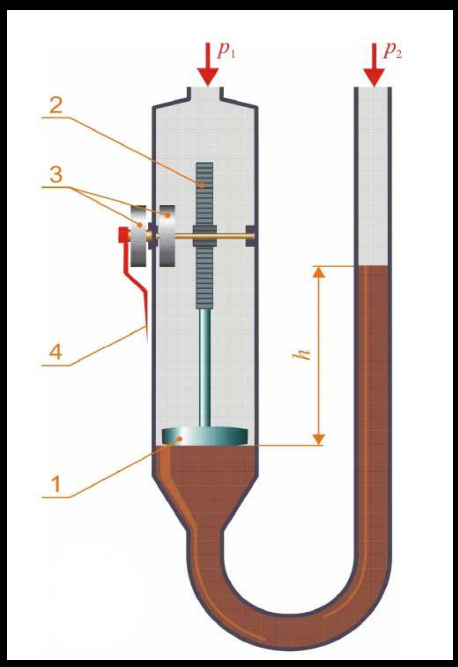
kde

Δp je meraná tlaková diferencia,
S_1 je plošný obsah vnútorného prierezu zvonu,
S_2 je plošný obsah vonkajšieho prierezu zvonu,
l je vynorenie zvonu v kvapaline,
ρ je hustota kvapaliny,
g je miestne tiažové zrýchlenie.



Kvapalinové merače tlaku:
Diferenčné manometre

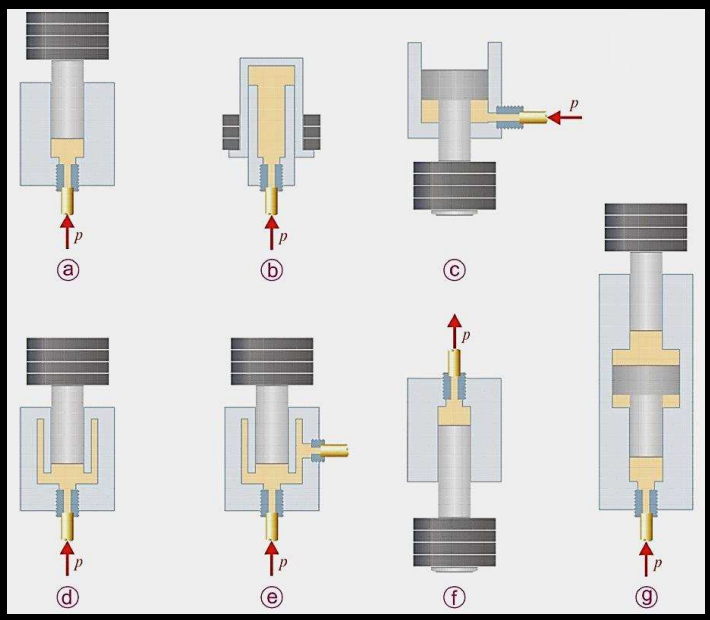




a) jednoduchá U-trubica, b) U-trubica s posuvným dnom Plavákový tlakomer

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2)\, g\, h = (\rho_1 - \rho_2)\, g\, (h1 + h2)$$

Piestový manometer



Sú založené na meraní sily, ktorou pôsobí tlak tekutiny na piest

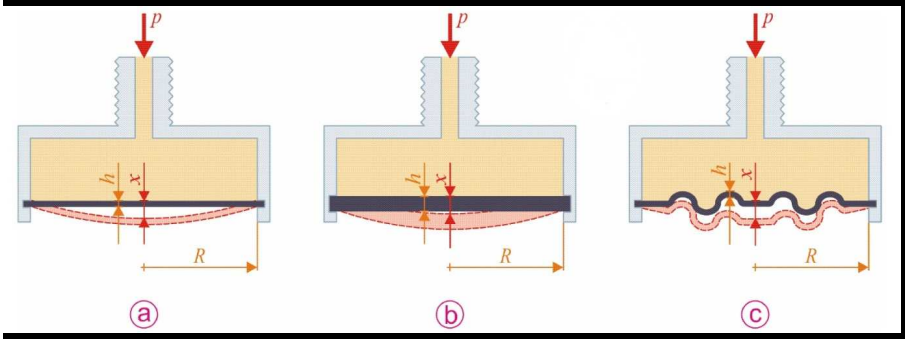
$$\Delta p = \frac{(m_z + m_p)g}{S_{ef}}$$

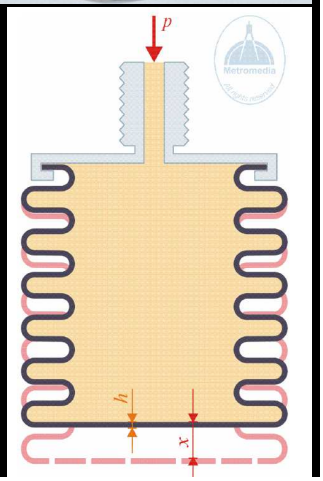
kde

Δp je meraný tlakový rozdiel,
m_z je hmotnosť závaží,
m_p je hmotnosť piesta a podložky,
g je miestne tiažové zrýchlenie,
S_{ef} je efektívny plošný obsah piesta.

Piestové manometre: a) s obyčajným piestom, b) inverzný s rotujúcim puzdrom, c) s diferenciálnym piestom, d) s dotláčaním puzdra protitlakom, e) s regulovaným dotláčaním puzdra, f) na meranie podtlakov, g) s hydraulickým multiplikátorom

Deformačný tlakomer s membránou a s vlnovcom





a) **tenká,**
b) **tuhá,**
c) **zvlnená membrána a**
d) **vlnovec**

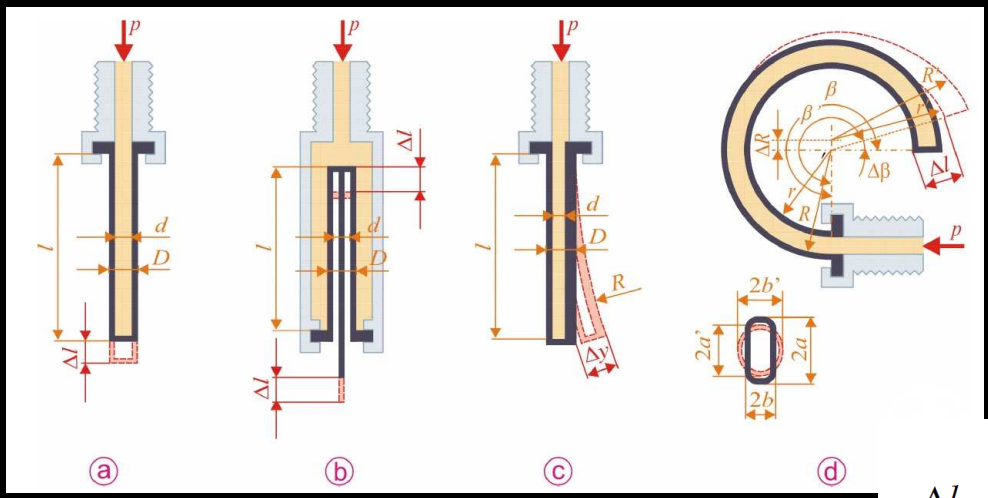
$$x = \frac{R^2}{4\sigma\, h} p$$

pre tenkú membránu

kde

x je priehyb membrány v jej strede,
R je polomer membrány,
h je hrúbka membrány,
σ je ťahové napätie v membráne.

Deformačný tlakomer s trubicou

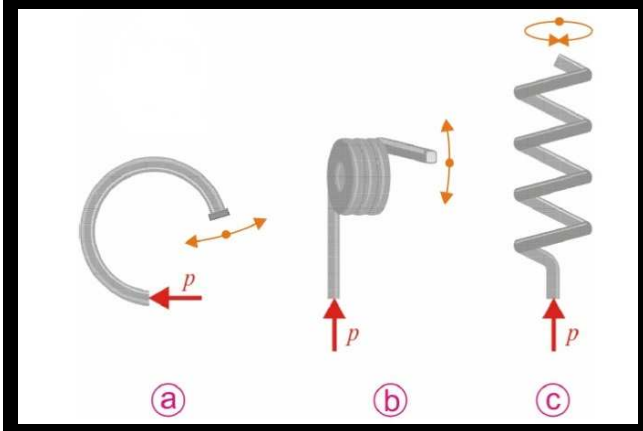


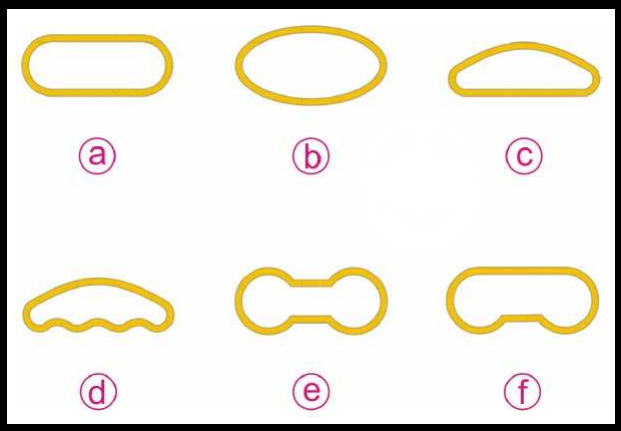
$$\Delta l = \frac{r^* \cdot S}{b} \sqrt{1+\alpha^2}\, p$$

a) jednoduchá trubica ,
b) trubica s vnútornou tyčou,
c) nesymetrická,
d) Bourdonova

Δl je posunutie konca Bourdonovej trubice,
r^* je polomer čiary trubice,
S je vnútorná plocha prierezu trubice,
b je šírka prierezu trubice,
β je uhol natočenia konca trubice po privedení tlaku,
p je pôsobiaci tlak.

Tvary a prierezy Bourdonovej trubice





Používané tvary Bourdonovej trubice

a) v tvare C,
b) plochá špirála,
c) valcová špirála

Používané prierezy Bourdonovej trubice
a) plochý ovál, b) špicatý ovál,
c) plochý oblúk,
d) zvlnený profil s oblúkom,
e) symetrický profil pre vysoký tlak,
f) nesymetrický profil pre vysoký tlak

Merací rozsah tlakomerov

Absolútny tlak [Pa]

10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^{0} 10^{3} 101325 10^{6} 10^{9}

extrémne vákuum (vysoké)	technické vákuum (nízke)	veľké podtlaky	malé podtlaky	malé pretlaky	veľké pretlaky

ionizačné vákuometre

kompresné vákuometre

piestové tlakomery

bolometrické vákuometre

membránové manometre

deformačné

deformačné tlakomery trubicové

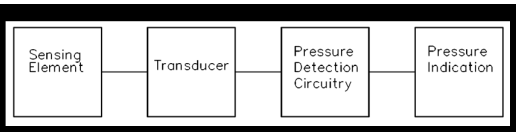
vlnovcové tlakomery

odporové tlakomery

kvapalinové tlakomery

bolometrický vákuometer je založený na meraní **tepelnej** vodivosti prostredia, ktoré závisí od tlaku

ionizačný vákuometer je založený na meraní náboja resp. prúdu vzniknutého ionizáciou prostredia



Elektrické snímače tlaku

- Výhodou snímačov tlaku s elektrickým výstupom je ich veľká **citlivosť**, malá dovolená chyba merania, malé rozmery.
- Výstupom zo snímača býva **napäťový alebo prúdový** signál, ktorý je vhodný na diaľkový prenos údajov, resp. na ich analógové a digitálne spracovanie.
- Nevýhodou je, že zvyčajne je vzťah medzi meraným tlakom a elektrickým výstupom **nelineárny**, takže sa musí kompenzovať. Aj snímače tlaku s elektrickým výstupom majú určitú **hysterézu**, pri dlhodobom zaťažení nastáva **drift nuly** a sú citlivé na zmenu okolitej teploty.
- Elektrické snímače tlaku dajú rozdeliť na dve skupiny:
  - snímače s deformačným členom,
  - snímače s elektricky aktívnym telesom.

Snímač tlaku prevádza tlak na mechanický signál → Prevodník mechanického signálu na elektrický → Obvody úpravy a zosilnenia signálu → Indikácia hodnoty tlaku

Elektrické snímače tlaku
Snímače s deformačným členom

Snímače s deformačným členom merajú veľkosť tlaku nepriamo. Ako deformačný prvok snímača sa najčastejšie používa tenká membrána, vlnovec, dutý valec, Bourdonova trubica a pod.

Relatívna alebo absolútna deformácia použitého deformačného prvku sa sníma elektrickým snímačom a transformuje sa na výstupný napäťový alebo prúdový signál.

Medzi snímače merajúce **relatívnu deformáciu** deformačného člena patria najmä **tenzometrické snímače** všetkých typov.

Medzi snímače merajúce **absolútnu deformáciu** deformačného člena sa zaraďujú **odporové, kapacitné, indukčnostné a vibračné snímače.**

V prípade snímačov s elektricky **aktívnym** telesom citlivý prvok reaguje zmenou svojich elektrických vlastností na tlak, ktorý naň pôsobí priamo, bez deformačného člena. Patria sem **piezoelektrické snímače**, niektoré **kapacitné a odporové snímače**, **magnetostrikčné** snímače, ako aj niektoré snímače tlaku s **optickými vláknami**.

Bolometrické vákuometre

- Bolometrické vákuometre sú založené na zmene tepelnej vodivosti okolia mernej **platinovej špirály vyhrievanej** konštantným príkonom na teplotu okolo 200 ÷ 300 °C.
- Zvyšujúce vákuum spôsobí stúpnutie teploty drôtu, ktorá je meraná priamo ako zmena jeho elektrického odporu, meraná termočlánkom alebo termistorom. Rozsah použitia je 100 ÷ 10^{-4} Pa.
- Prestup tepla v zriedených plynoch je pri nízkom vákuu závislý od tepelnej vodivosti plynu, ktorá nezávisí od tlaku plynu a pri vysokom vákuu tepelná vodivosť plynu je závislá od jeho tlaku.

Ionizačný vákuometer

Ionizačný vákuometer je principiálne otvorená elektrónka – trióda. Množstvo molekúl plynu, a teda tlak meraného plynu predstavuje prekážku emitovaným elektrónom.

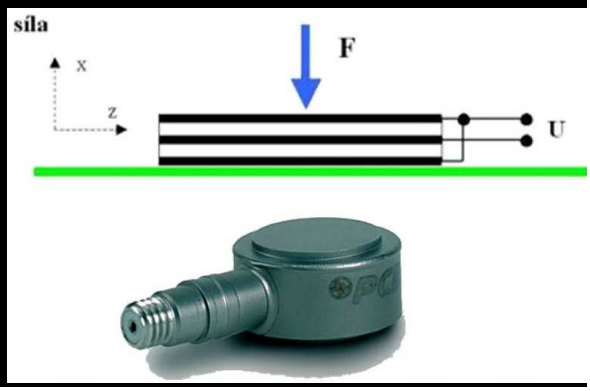
Zriedením – znížením tlaku sa vytvoria podmienky pre tok elektrického prúdu vplyvom iónovej vodivosti plynu medzi kladne polarizovanou katódou a mriežkou so zápornou polaritou. Absolútny tlak je potom priamoúmerný mriežkovému prúdu.

Nevýhodou tohto typu vákuometra je jeho pracovný rozsah; 10^{-1} ÷ 10^{-8} Pa.

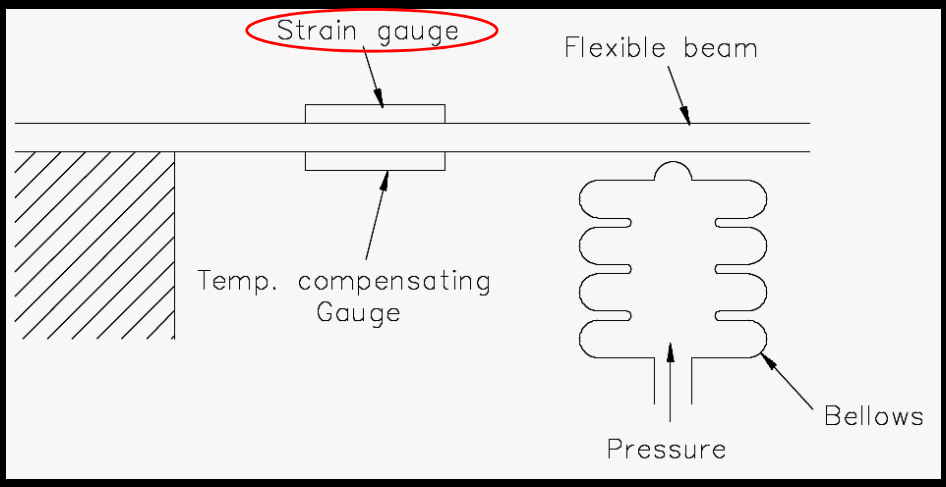
Pracuje teda až od určitého podtlaku.

Piezoelektrické tlakomery

- Piezoelektrické tlakomery sú založené na piezoelektrickom jave vyskytujúcim sa u kremeňa, turmalínu a pod. Pri mechanickom namáhaní monokryštalických výbrusov vzniká na rovinách kolmých na smer namáhania elektrická polarizácia vplyvom zmeny priestorovej koncentrácie elektrostatického náboja.
- Elektrostatické napätie je priamoúmerné intenzite deformácie – tlaku a po vhodnom zosilnení je merateľné.
- Merací rozsah je medzi $10^1 \div 10^8$ Pa.



Principiálna schéma tenzometrického snímača na báze vlnovca



An increase in pressure at the inlet of the bellows causes the bellows to expand. The expansion of the bellows moves a flexible beam to which a strain gauge has been attached. The movement of the beam causes the resistance of the strain gauge to change. The temperature compensating gauge compensates for the heat produced by current flowing through the fine wire of the strain gauge.

Odporový snímač tlaku

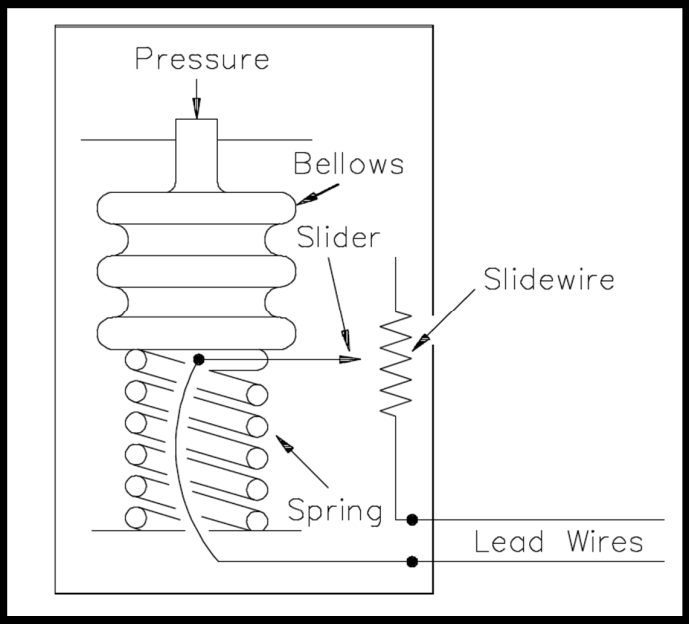
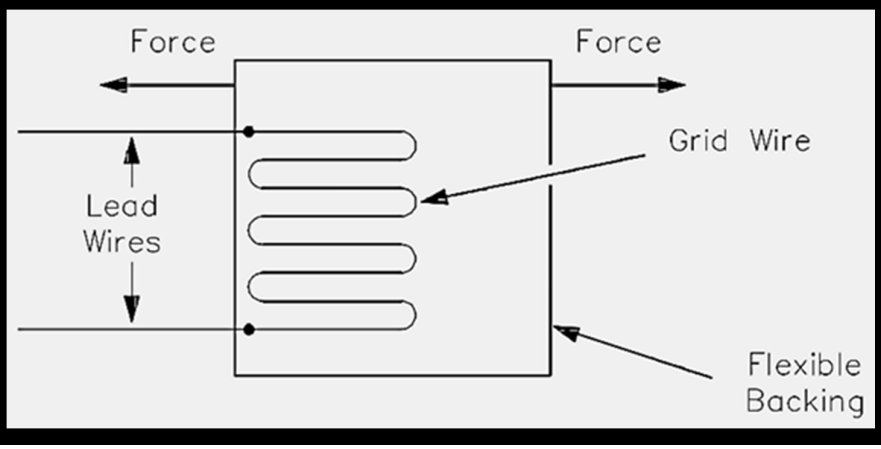


Schéma vlnovcového meradla s odporovým snímačom na báze odporového drôtu.

Bellows Resistance Transducer: As pressure changes, the bellows will either expand or contract. This expansion and contraction causes the attached slider to move along the slidewire, increasing or decreasing the resistance, and thereby indicating an increase or decrease in pressure.

Odporové tenzometre

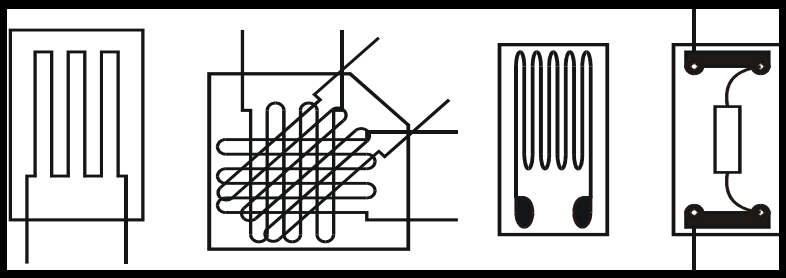
Podľa materiálu možno odporové tenzometre rozdeliť na **kovové a polovodičové**. Kovové tenzometre sa vyrábajú najmä zo zliatin **Cu-Ni** (konštantán), **Ni-Cr** (nichrom), **Ni-Cr-Fe-Al** (karma). Drôtikové snímače sú obyčajne vytvorené z vodičov s priemerom (10 až 40) μm. Najpoužívanejšie kovové tenzometre v súčasnosti sú fóliové lepené.



Odporový snímač tlaku resp. napätia

Odporové tenzometre: drôtikový tenzometer, drôtiková tenzometrická ružica, fóliový tenzometer, polovodičový tenzometer

Odporový drôtik sa vplyvom tlaku predlžuje a prierez sa zmenšuje, čo zvyšuje elektrický odpor.

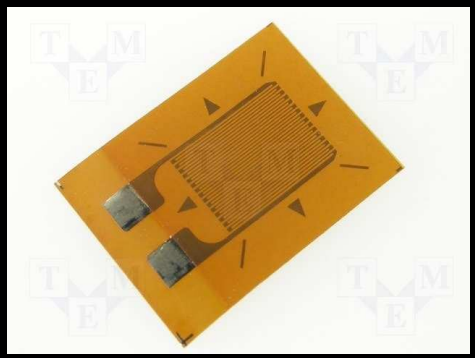


Odporový snímač napätia:

The pressure to resistance relationship:

$$R=K.L/S$$

- R = resistance of the wire grid in ohms
- K = resistivity constant for the particular type of wire grid
- L = length of wire grid
- S = cross sectional area of wire grid

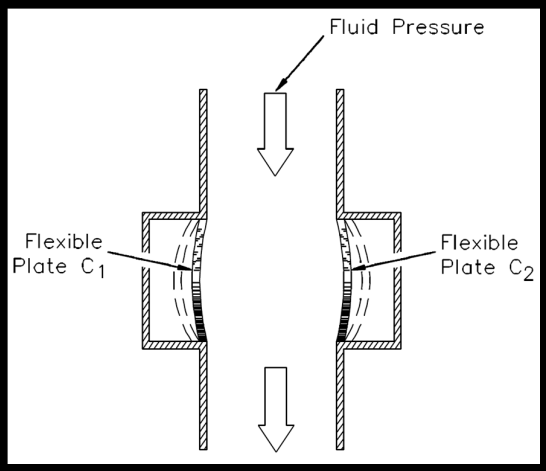


Odporové tenzometre

Polovodičové odporové tenzometre – sa vyznačujú teplotne závislou a nelineárnou prevodovou charakteristikou. **Vyrábajú sa z kremíka**, ktorý má z hľadiska odporovej tenzometrie optimálny súhrn meracích a mechanických vlastností v širokom rozsahu teplôt (relatívne malá chyba linearity, zanedbateľná mechanická a kryštalografická hysterézia, použiteľnosť pre väčší rozsah teplôt), pričom je aj ľahko dostupný.

V porovnaní s kovovými tenzometrami sú polovodičové omnoho citlivejšie, ich nevýhodou je však veľká chyba linearity a veľká teplotná závislosť, a tak oba typy vyžadujú, pri prísnejšej požiadavke na presnosť merania, špeciálne vyhodnocovacie obvody.

Schéma kapacitného tlakového snímača



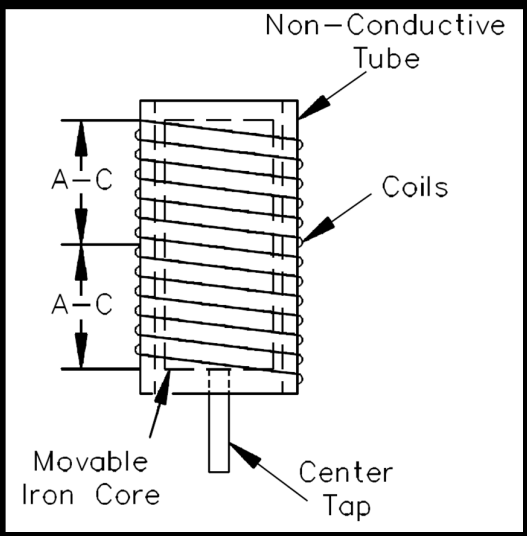
Capacitive-type transducers consist of two flexible conductive plates and a dielectric. In this case, the **dielectric is the fluid**. As pressure increases, the flexible conductive plates will move farther apart, changing the capacitance of the transducer. This change in capacitance is measurable and is proportional to the change in pressure.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

C- kapacita, d - vzdialenosť
ε - permitivita, A - plocha

Základným prvkom ***kapacitných snímačov*** tlaku je pružný člen, ktorý je spojený aspoň s jednou elektródou snímacieho kondenzátora. Najčastejšie sa využíva deformácia polovodičových (kremík), izolačných a kovových votknutých membrán a tenkovrstvových nosníkov. Na zvýšenie citlivosti a pre malé alebo dynamické tlaky sa používa mäkká membrána alebo vlnovec. Len zriedka sa uplatňujú iné princípy založené napr. na zmene permitivity dielektrika meraným tlakom.

Indukčný snímač



- cievka, pre zvýšenie citlivosti môže byť rozdelená
- pohyblivé magnetické jadro
- mechanický snímač tlaku

The inductance-type transducer consists of three parts: a coil, a movable magnetic core, and a pressure sensing element.

The element is attached to the core, and, as pressure varies, the element causes the core to move inside the coil. An AC voltage is applied to the coil, and, as the core moves, the **inductance of the coil changes**. The current through the coil will increase as the inductance decreases.

For increased sensitivity, the coil can be separated into two coils by utilizing a center tap. As the core moves within the coils, the inductance of one coil will increase, while the other will decrease.

$$I = \frac{U}{X_L}$$

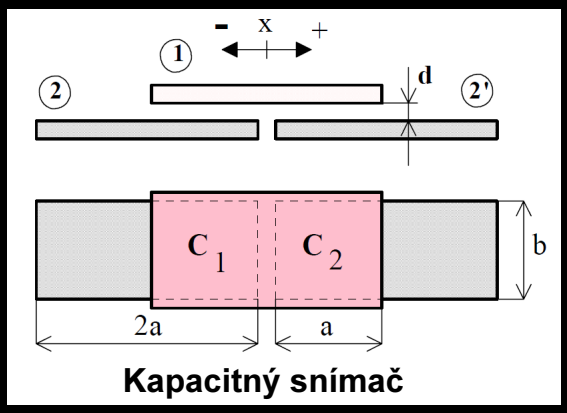
Diferenčný indukčný prevodník

.

Differential Transformer: The primary coil is wound around the center of the tube. The secondary coil is divided with one half wound around each end of the tube. Each end is wound in the **opposite direction**, which causes the voltages induced to oppose one another.

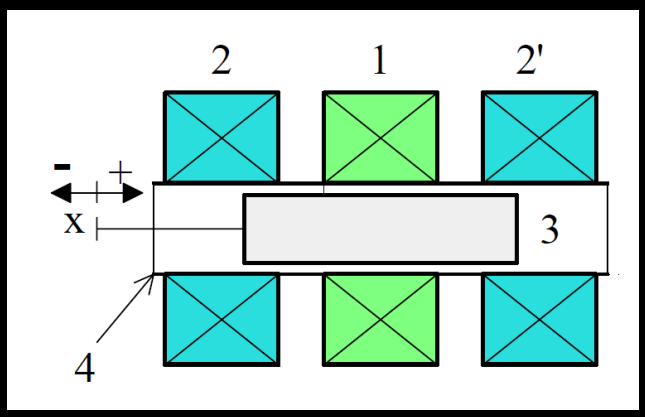
A core, positioned by a pressure element, is movable within the tube. When the core is in the lower position, the lower half of the secondary coil provides the output. When the core is in the upper position, the upper half of the secondary coil provides the output. The magnitude and direction of the output depends on the amount the core is displaced from its center position. When the core is in the mid-position, there is no secondary output.

Kapacitný snímač indukčný diferenciálny snímač



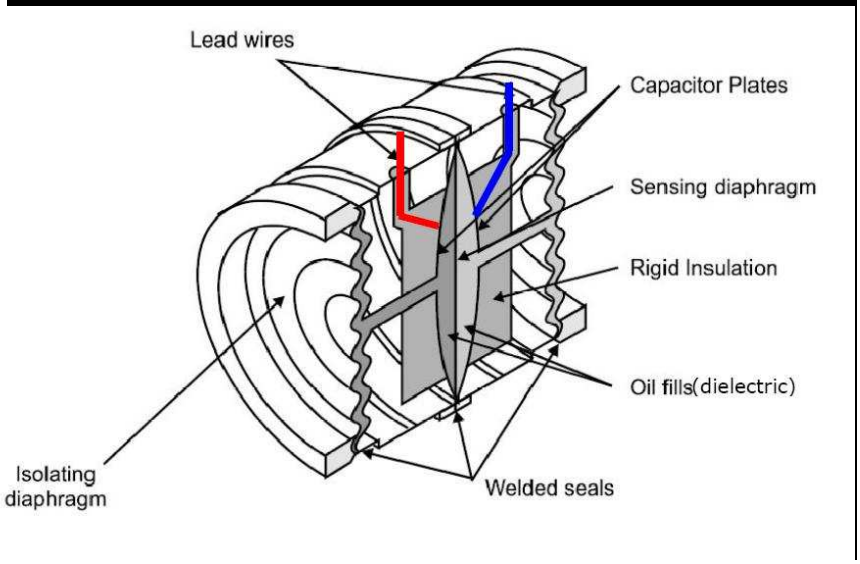
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

ε - permitivita vákua resp. relatívna
S – účinná plocha
d – vzdialenosť elektród



Indukčný diferenciálny snímač
1- primárne vinutie
2- sekundárne vinutie
2`- sekundárne vinutie
3 - pohyblivé jadro (ferit)
4 - mechanická kostra

Diferenčný kapacitný prevodník



Meranie hladiny

- Meraním výšky hladiny sa rozumie zistenie **vzdialenosti** hladiny materiálu od definovanej nulovej výšky hladiny.
- **Hladinou** sa pritom označuje **rozhranie** medzi dvoma médiami - pevným a kvapalným, pevným a plynným, kvapalným a plynným, resp. medzi dvoma nezmiešateľnými kvapalnými médiami s rozličnou hustotou.
- Výška hladiny materiálu sa uvádza v **dĺžkových jednotkách**. V špeciálnych prípadoch bývajú meradlá výšky hladiny kalibrované priamo v objemových jednotkách.

Meradlá výšky hladiny - hladinomery

diskrétne – zaznamenajú prítomnosť hladiny iba v určitých diskrétnych bodoch, najčastejšie to býva minimum alebo maximum. Takéto meradlá sa označujú ako spínače. Do nádrží sa umiestňujú vodorovne alebo zvislo,

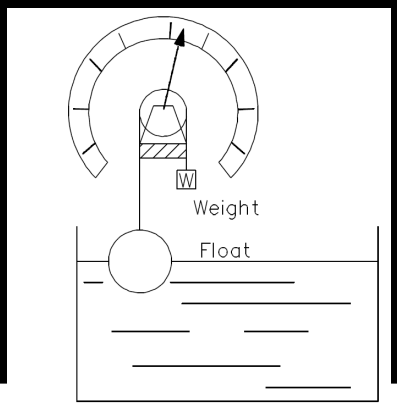
spojité – poskytujú analógový výstupný signál úmerný momentálnej výške hladiny.

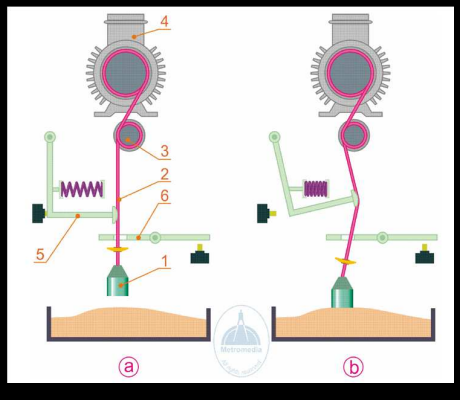
Podľa použitého fyzikálneho princípu sa hladinomery delia na:

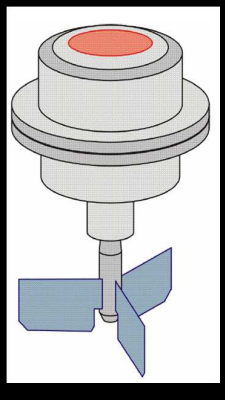
- mechanické, vztlakové, tlakové
- hladinomery so zmenou elektrickej veličiny, kapacitné, vodivostné
- ultrazvukové, mikrovlnné, laserové, optické vlákna (infračervené),
- rádioaktívne hladinomery

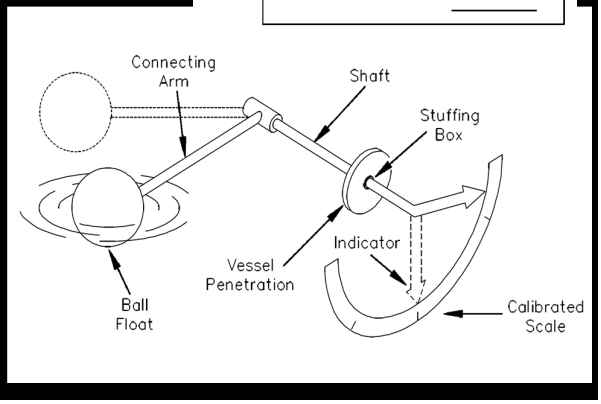
Mechanické hladinomery

- tyčové meradlá, plavákové meradlá
- priehľadové valcové a ploché
- elektromechanické hladinomery,
- rotačné limitné a
- vibračné spínače

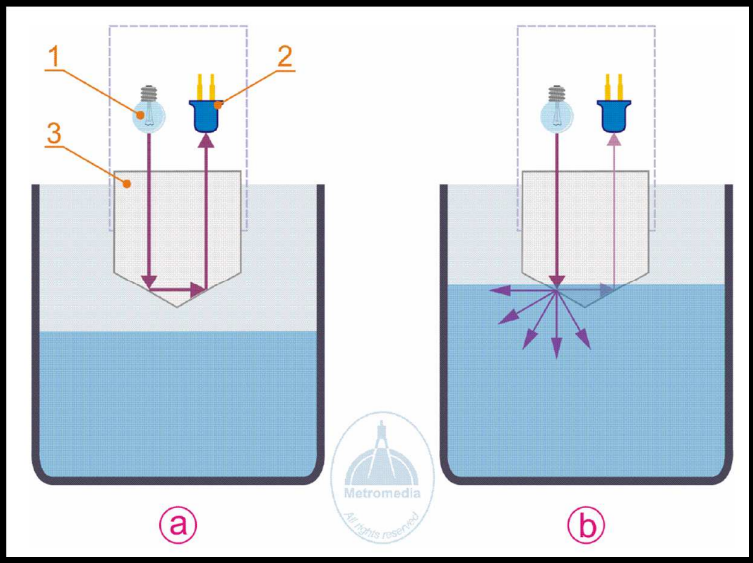








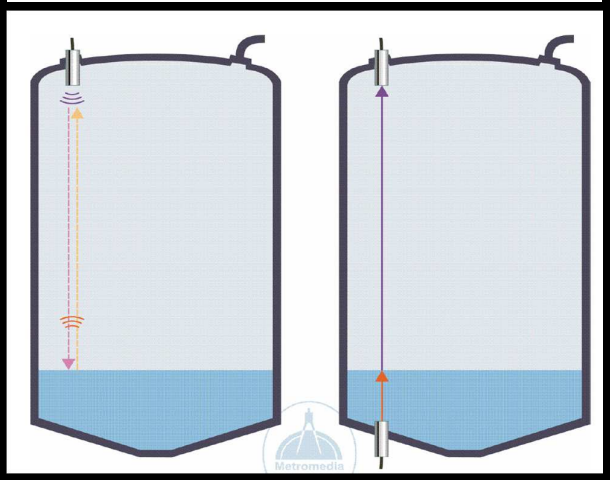
Optické hladinomery

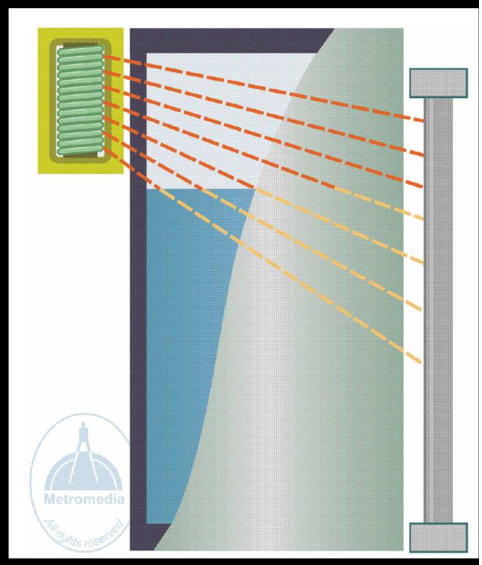


Využíva sa zmena lomu svetla v okamihu, keď sa kužeľovitý koniec kryštalického svetlovodu ponorí do meraného materiálu.

Ultrazvukové hladinomery. Hladinomer využívajúci rádioaktívny žiarič.

a) ultrazvukový impulz b) spojitý lúč

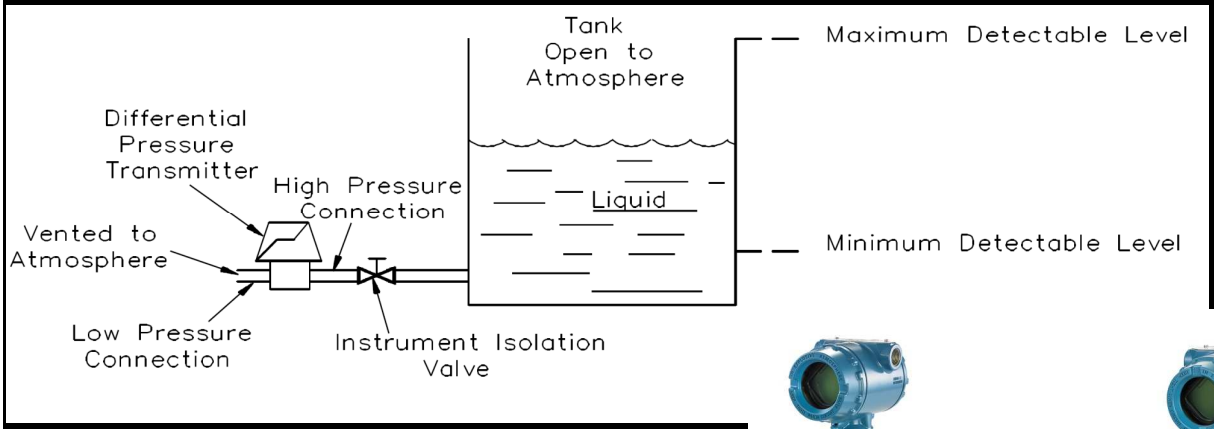




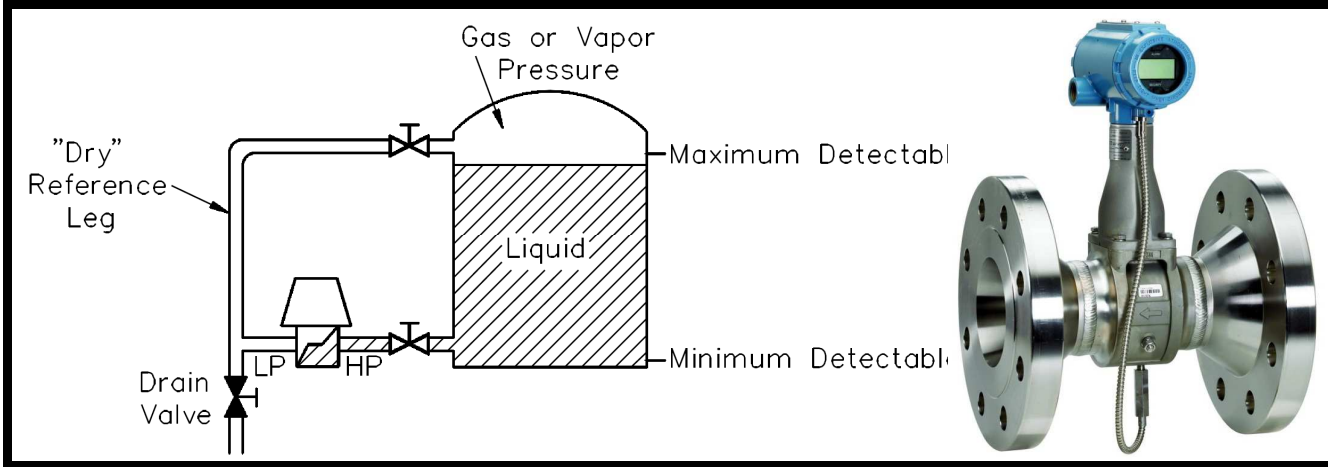
Rádioaktívny hladinomer sa používa v silách, vo vysokotlakových aj v nízkotlakových chemických reaktoroch, vákuových sušičkách, zásobníkoch, ktoré obsahujú materiál s vysokou teplotou, v sklárskych vaniach, skladových zásobníkoch chlóru, brómu a podobne.

Meranie hladiny diferenciálnym tlakomerom

V otvorených nádobách je diferenciálny tlakomer pripojený ku dnu nádoby a druhý koniec k atmosférickému tlaku. Výška hladiny h je potom proporcionálna tlaku ΔP, ktorý je vlastne rovná hydrostatickému tlaku stĺpca kvapaliny.

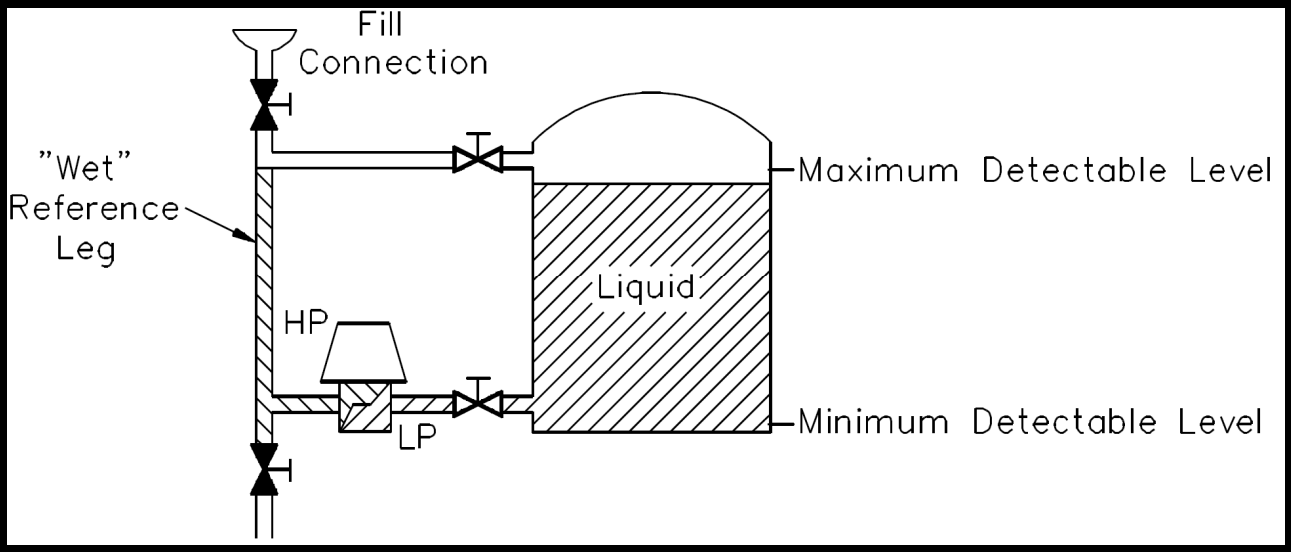


Diferenciálny tlakomer
Suchá referenčná trasa



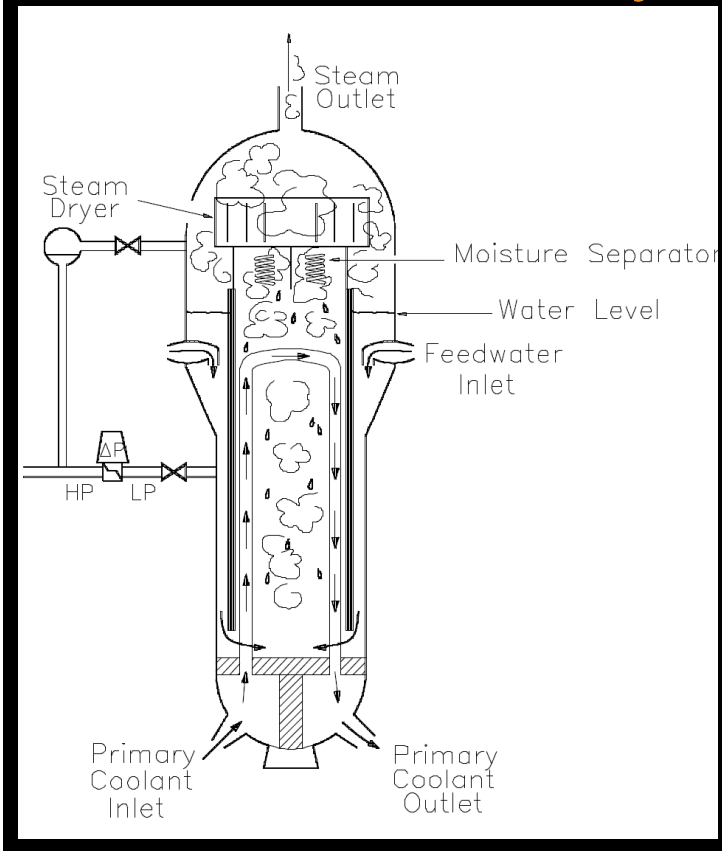
Uzavretá nádoba môže byť natlakovaná, a preto sa na diferenciálny manometer napájajú spodná a horná časť nádoby.

Diferenciálny tlakomer, mokrá referenčná trasa



Používa sa ak je problematické zabrániť kondenzácii výparov v referenčnej trase. Potom difmanometer ukazuje **ΔP=0 pri maximálnej hladine** a ďalej je nepriamo úmerný hladine v nádrži. Pri presnom meraní treba brať do úvahu inú hustotu kvapaliny v referenčnej trase.

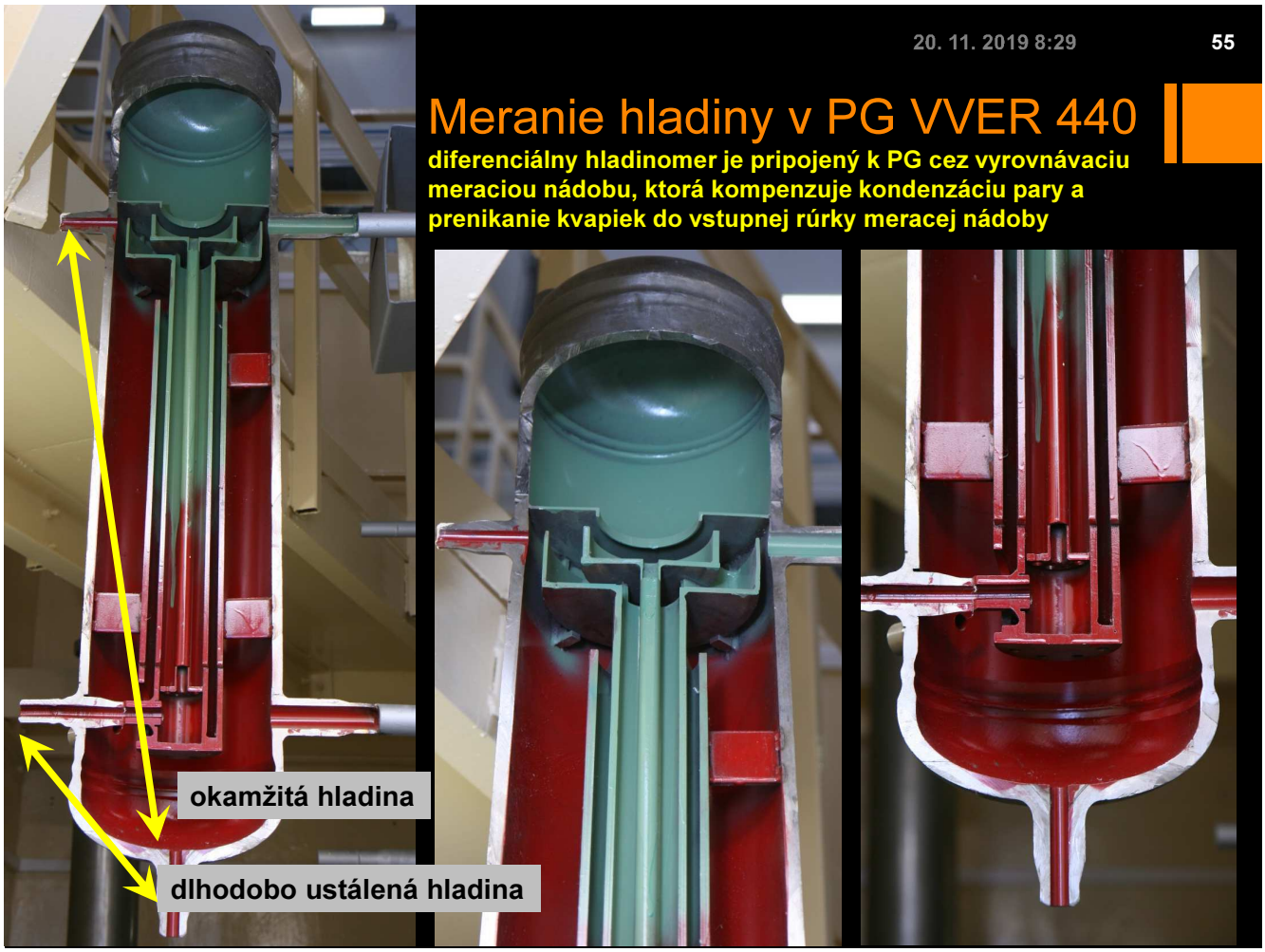
Meranie hladiny v PG



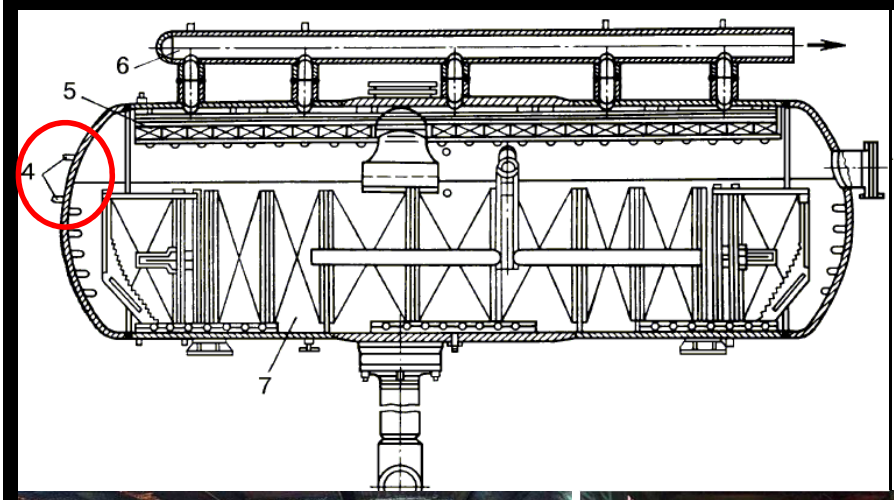
Typické meranie hladiny v PG pomocou diferenciálneho manometra.
Mokrá referenčná trasa obsahuje vodu a rozdiel v hustote vody sa **koriguje** v závislosti **od tlaku v PG**, od ktorého závisí teplota varu vody a tým aj hustota. Preto treba samozrejme merať aj tlak v PG.
Zvýšený tlak zvyšuje teplotu saturácie a spôsobuje var pri nižšej hustote, čo zvyšuje hladinu vody a nezvyšuje ΔP.

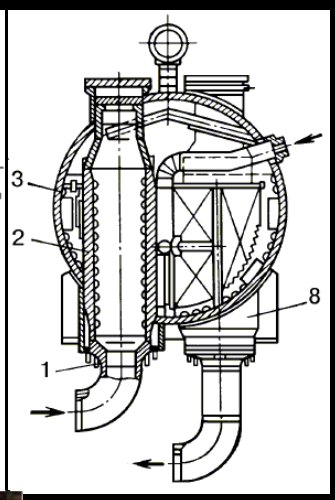
Meranie hladiny v PG VVER 440

diferenciálny hladinomer je pripojený k PG cez vyrovnávaciu meraciou nádobu, ktorá kompenzuje kondenzáciu pary a prenikanie kvapiek do vstupnej rúrky meracej nádoby



PG 440





Parametre PG 440

P_2=4,61 MPa
t_{in}=259°C
P1=13,7
t_{in}=297 °C
t_{out}=270 °C
rúrky 16/1,4 mm
D=3,2 m L=12,4 m

Meranie prietoku, pretečeného množstva a rýchlosti tekutín

- Pojmom **prietok** rozumieme množstvo tekutiny, pretekajúce za určitú časovú jednotku cez potrubie alebo otvorený kanál. Prietok sa môže vyjadrovať v objemových alebo v hmotnostných jednotkách. Hovoríme potom o objemovom prietoku v jednotkách $m^3 \cdot s^{-1}$ (m^3/s), resp. o hmotnostnom prietoku v jednotkách $kg \cdot s^{-1}$ (kg/s).

$$q_V = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} = \frac{S \cdot ds}{dt} = S \cdot \overline{w}$$

$$q_m = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}$$

- **ΔV je elementárny objem pretekajúcej tekutiny,**
- **Δt je časový interval.**
- **S je plošný obsah prierezu potrubia,**
- **w je stredná rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze.**
- **Δm je elementárna hmotnosť pretekajúcej tekutiny,**
- **ρ je hustota pretekajúcej tekutiny.**

Pretečené množstvo tekutiny

- Pre **pretečené množstvo tekutiny**, ktoré prejde daným prierezom S za konečný časový interval $t_2 - t_1$ a je dané priamym meraním objemu, resp. hmotnosti, platí:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_V \, dt$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} q_m \, dt$$

- Prístroje na meranie prietoku tekutiny sa nazývajú **prietokomery**, prístroje na meranie pretečeného množstva sa nazývajú **meradlá pretečeného množstva**, niekedy sa označujú podľa konkrétnej meranej tekutiny (napr. **plynomery**, **vodomery**).

Princípy merania prietoku a pretečeného množstva

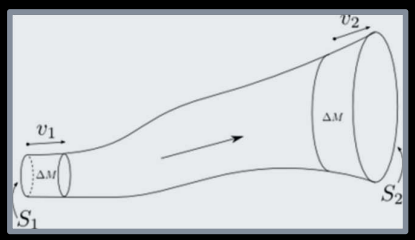
- Na **priame** meranie aktuálneho prietoku sa používajú **prietokomery**.
- Na **nepriame** meranie sa dajú využiť meradlá pretečeného množstva, doplnené o časomerné zariadenie. V tomto prípade dostaneme hodnotu priemerného prietoku počas určitého časového intervalu.
- Využíva sa aj meranie **rýchlosti** tekutiny, ktorá prúdi cez potrubie (kanál) so známym plošným obsahom prierezu.

- Najpoužívanejšie typy prietokomerov v jadrovej elektrárni
  - normalizovaná clona,
  - normalizovaná dýza
  - Venturiho trubica
  - Pitotova trubica
  - Parshallov žľab

Fyzika prúdenia kvapalín a plynov

- **Rovnica kontinuity prúdenia** je matematickým vyjadrením zákona zachovania hmotnosti pri stacionárnom prúdení kvapaliny

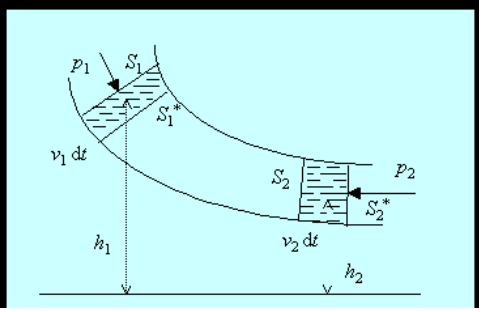
$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$$



- **Bernoulliho rovnica** je matematickým vyjadrením zákona zachovania energie v ustálenom toku kvapaliny alebo plynu. Hlavné zložky sú kinetická energia ($\sim v^2$), potenciálna energia ($\sim gh$) a vnútorná energia - tlak ($\sim p/\rho$).
- Bernoulliho rovnica pre mernú energiu:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = const$$

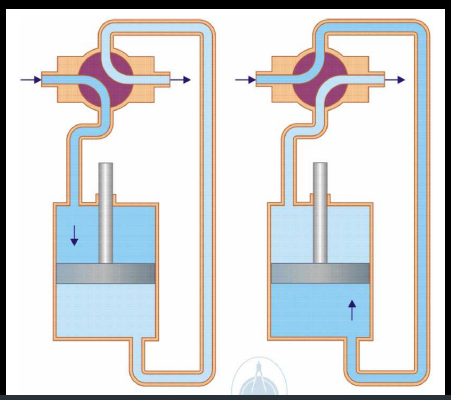
$$J \cdot m^{-3} = Pa$$



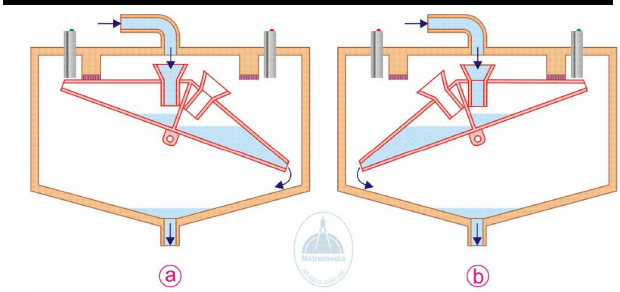
Meradlá používané v uzavretých potrubiach

- **objemové (pulzačné) meradlá** pretečeného množstva (pri prechode kvapaliny cez meradlo sa zisťuje počet určitých diskrétnych objemov tejto kvapaliny, ktoré pôsobia na meradlo)
- **rýchlostné meradlá** pretečeného množstva (vodomery, plynomery, sú založené na meraní rýchlosti lopatkového rotora resp. **turbínky**, roztočené silou pretečenej tekutiny),
- **prietokomery** využívajúce **tlakovú stratu** tekutiny, pri zmene prierezu resp. smeru prúdenia
- **prietokomery** využívajúce **dynamické** pôsobenie tekutiny, napr. plavákový prietokomer
- **ultrazvukové** prietokomery,
- magnetické **indukčné** prietokomery,
- **špeciálne** prietokomery, napr. laserové, termodynamické
- **hmotnostné** prietokomery.

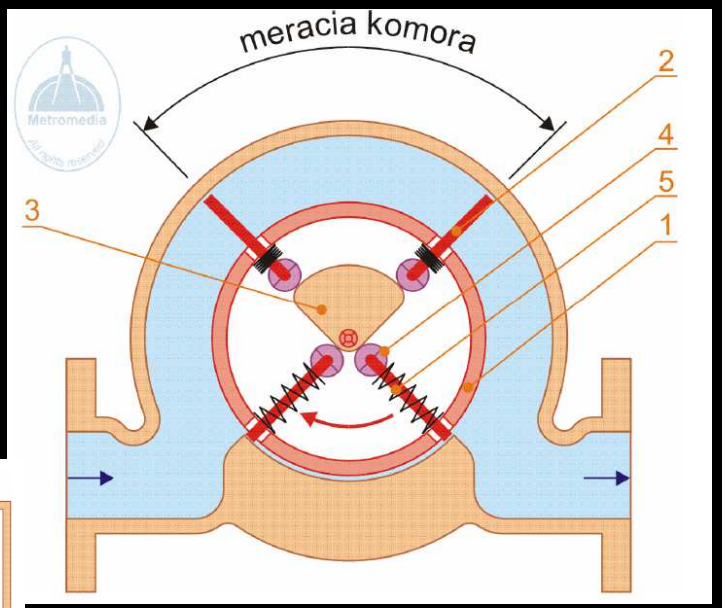
Objemové (pulzačné) meradlá



Piestové meradlo pretečeného množstva



Kyvné váhy a) prvý takt, b) druhý takt



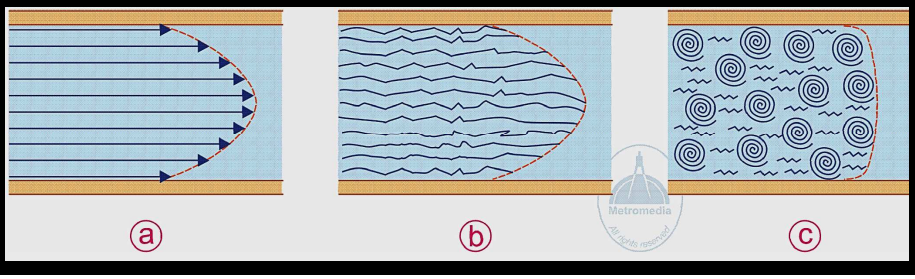
Meradlo pretečeného množstva s výsuvnými lopatkami
1 – rotor, 2 – výsuvné lopatky, 3 – pevná vačka, 4 – valivé prevody, 5 - pružiny

Rýchlostné sondy

- Prístroje na meranie rýchlosti prúdenia tekutiny sa označujú ako **rýchlostné sondy**, v špeciálnom prípade merania rýchlosti prúdenia plynov sa nazývajú **anemometre**.
- Okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny v danom mieste kruhového potrubia sa dá určiť podľa vzťahu, kde:
  - *w* je okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny,
  - w_{max} je maximálna rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze potrubia,
  - *r* je vzdialenosť vrstvy prúdu tekutiny od osi kruhového potrubia,
  - *R* je polomer potrubia,
  - *n* je exponent závisiaci od typu prúdenia:

$$w = w_{\max}\left(1-\frac{r}{R}\right)^{1/n}$$

- a) laminárne prúdenie,
- b) prechodové prúdenie,
- c) turbulentné prúdenie

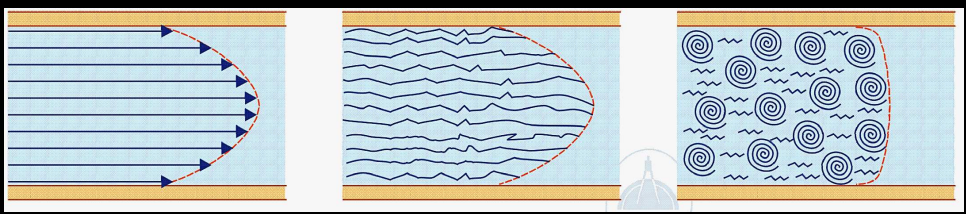


Ako stanoviť typ prúdenia? Reynoldsovo číslo

- Typ prúdenia pre daný tvar potrubia, resp. kanála sa dá posúdiť podľa hodnoty Reynoldsovho čísla. Toto číslo vyjadruje pomer medzi zotrvačnými a trecími silami vo vnútri tekutiny:
  - *D* je charakteristický rozmer, napríklad vnútorný priemer potrubia, hĺbka kanála a podobne,
  - *w* je stredná rýchlosť prúdiacej tekutiny v danom priereze,
  - *v* je kinematická viskozita.

$$\mathrm{Re} = \frac{D\overline{w}}{v}$$

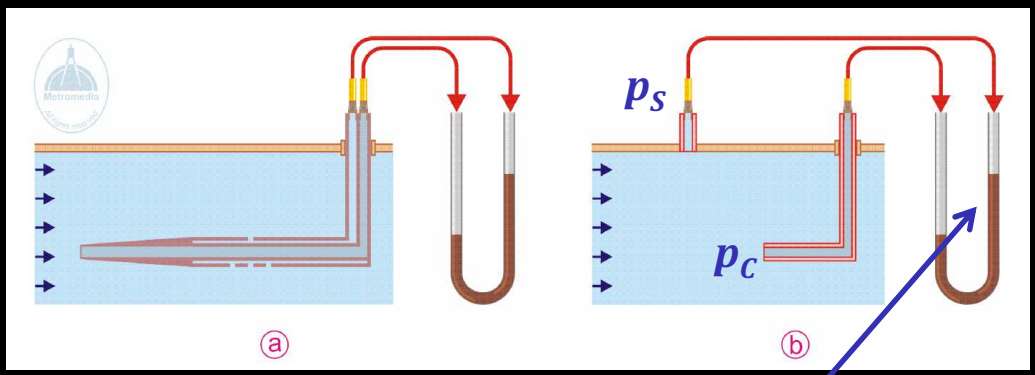
- Pre prietok kruhovým potrubím je kritické Reynoldsovo číslo Re = 2300. V prípade kruhového potrubia sa dá prúdenie tekutiny v závislosti od hodnoty Reynoldsovho čísla rozdeliť do troch skupín:
  - laminárne prúdenie, kde Re < 2300,
  - prechodové prúdenie, kde 2300 < Re < 10^4,
  - turbulentné prúdenie, kde Re > 10^4.



Rýchlostné sondy

- Rýchlostné sondy sú určené na meranie okamžitej alebo strednej **rýchlosti** prúdiacej tekutiny (najmä kvapaliny), ako aj na stanovovanie **rýchlostného profilu** v potrubiach, kanáloch a v riečnych korytách.
- Používajú sa najmä na laboratórne účely alebo na presné merania. **Využívajú pritom zmenu kinetickej energie na tlakovú**.
- Medzi rýchlostné sondy sa zaraďuje **Pitotova** a **Prandtlova** trubica, **valcová, guľová a viacotvorová valcová** sonda. Presnosť merania trubicami a sondami je ovplyvnená najmä správnou polohou ich nasmerovania.
- Čelo trubice, resp. sondy sa musí presne nasmerovať do smeru prúdenia tekutiny.

Pitotova trubica



$$p_S + \frac{\rho v^2}{2} = p_C$$

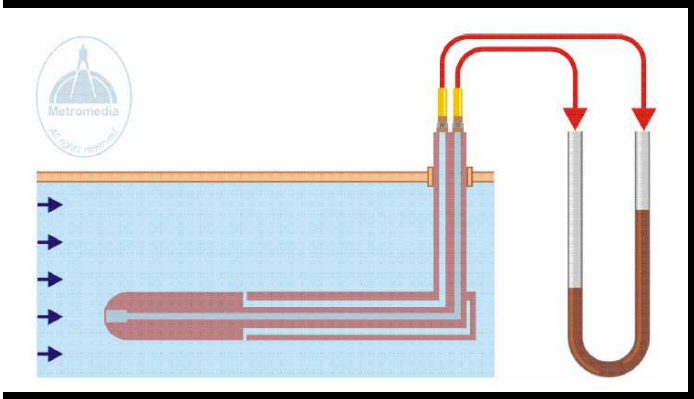
$$v = \sqrt{2\frac{\Delta p}{\rho}} = \sqrt{2\Delta h \cdot g}$$

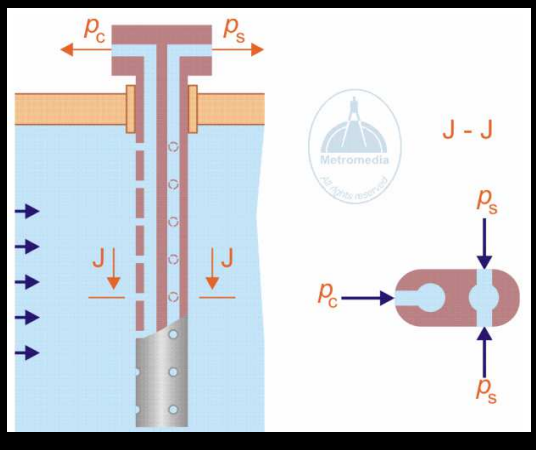
$$\Delta h g \rho = (p_C - p_S) = \frac{\rho v^2}{2}$$

Vyhotovenie sa líši podľa toho, či sa používa na meranie rýchlosti plynu a) alebo kvapaliny b). V druhom prípade sa skladá z dvoch samostatných trubíc, rovnej na meranie **statického tlaku** a ohnutej na meranie **dynamického tlaku**. Pri správnom meraní má byť os ohnutej trubice totožná s osou potrubia a má smerovať proti prúdiacemu toku. Vplyvom celkového tlaku *(statický tlak plus dynamická zložka)* v nej vystúpi hladina tekutiny do výšky h_c. V druhej (rovnej) trubici sa meria výška hladiny tekutiny h_s (vplyv statického tlaku p_s).

Prandtlova trubica
Viacotvorová valcová sonda

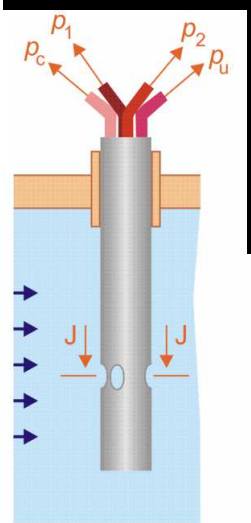
- **Prandtlova trubica** sa hodí najmä na meranie väčších rýchlostí prúdiacej tekutiny. Okamžitá rýchlosť prúdiacej tekutiny sa zisťuje v mieste ponoru trubice, pričom sa požaduje, aby prúdenie bolo laminárne a rovnomerné. Rozdiel statického a dynamického tlaku určuje rýchlosť prúdenia.
- **Viacotvorová valcová sonda** sa niekedy označuje ako **integračná Prandtlova trubica**. Konštrukčne je prispôsobená na snímanie strednej rýchlosti toku tekutín, aj v prípade meniaceho sa rýchlostného profilu.

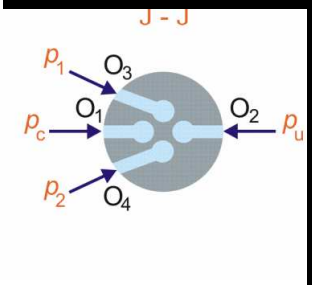




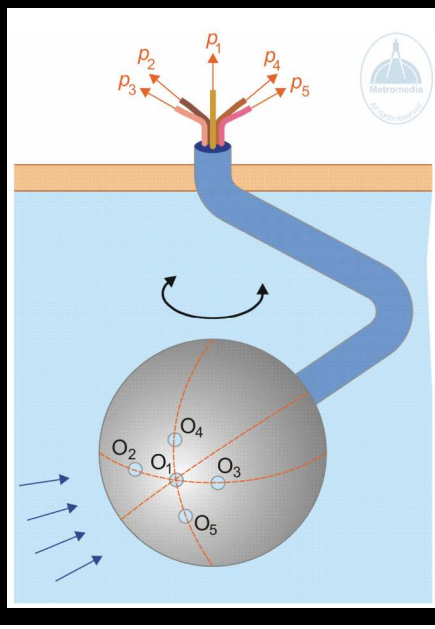
Valcová sonda
Guľová sonda

Valcová sonda sa používa na zisťovanie rýchlosti a smeru tekutiny pri stacionárnom dvojrozmernom prúdení. Tvorí ju valcové teleso so štyrmi otvormi O_1 až O_4, ktoré ležia v jednej rovine.
Otvorom O_1, nastaveným proti smeru prúdenia, sa sníma celkový tlak p_c, zadným otvorom O_2 úplavový (statický) tlak p_u. Bočné otvory O_3 a O_4 sú umiestnené symetricky voči pozdĺžnej osi a zisťuje sa
nimi smer prúdenia. Snímané tlaky sa vyvádzajú samostatnými vývrtmi k diferenčným manometrom. Otáčaním sondy v jednej rovine sa zistí správna hodnota smeru prúdenia tekutiny vtedy, keď budú tlaky v otvoroch O_3 a O_4 rovnaké, teda $p_1 = p_2$. Sonda býva upevnená na držiaku, pomocou ktorého sa posúva v jednej osi prierezu po celej dĺžke.

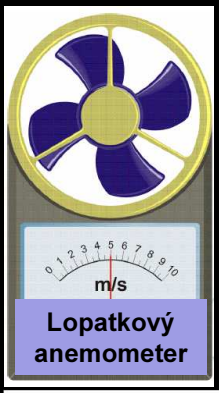


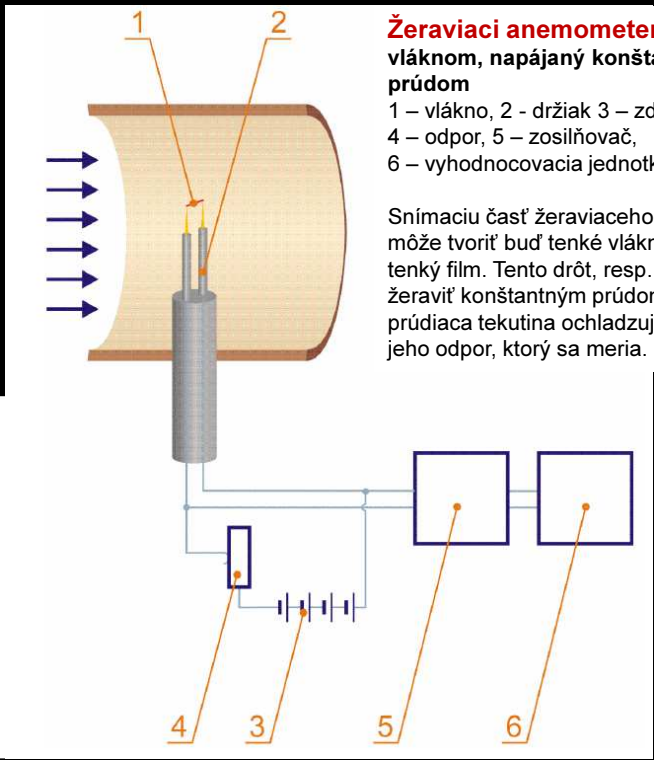


Na priestorové meranie smeru a rýchlosti stacionárneho prúdenia je výhodné použitie **guľovej sondy.** Sondu tvorí guľa s priemerom 5 až 10 mm s piatimi otvormi O_1 až O_5, ktoré sa nachádzajú v dvoch na seba kolmých rovinách.



Anemometre

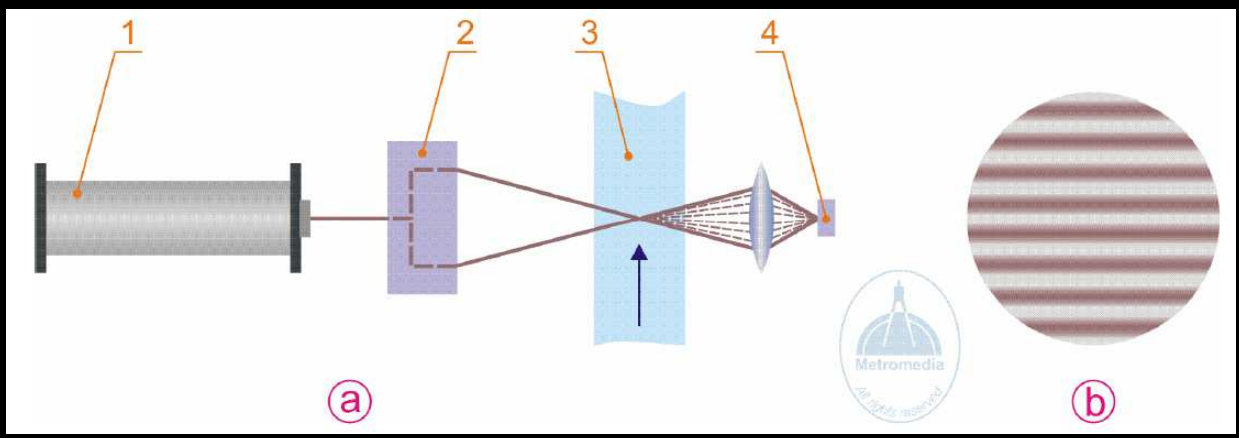




Žeraviaci anemometer s kovovým vláknom, napájaný konštantným prúdom
1 – vlákno, 2 - držiak 3 – zdroj,
4 – odpor, 5 – zosilňovač,
6 – vyhodnocovacia jednotka

Snímaciu časť žeraviaceho anemometra môže tvoriť buď tenké vlákno, alebo tenký film. Tento drôt, resp. film sa môže žeraviť konštantným prúdom, takže ho prúdiaca tekutina ochladzuje, a tým mení jeho odpor, ktorý sa meria.

Laserový Dopplerov anemometer

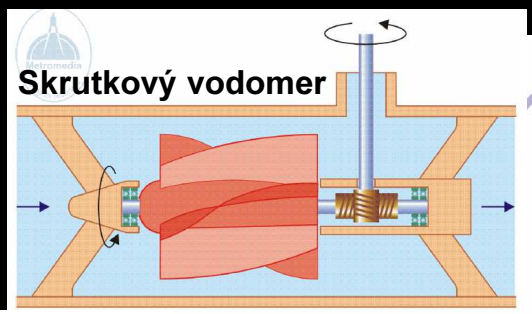


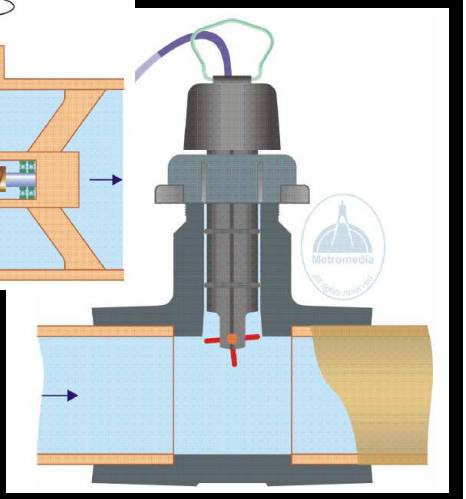
Laserový lúč sa pomocou optiky *2* rozdeľuje na dve časti. Tie sa zbiehajú v bode, v ktorom sa má merať rýchlosť prúdiacej tekutiny *3*. Obidva lúče majú rovnakú frekvenciu. Rýchlosť prúdiacich čiastočiek spôsobuje, že odrazené svetlo má pri obidvoch lúčoch inú frekvenciu. Svetlo rozptýlené z lúča, ktorý mieri po prúde tekutiny, má vyššiu frekvenciu, svetlo rozptýlené z lúča, mieriaceho proti prúdu tekutiny, má nižšiu frekvenciu. Svetlo z obidvoch lúčov s odlišnými frekvenciami navzájom interferuje a pritom vytvára tretiu frekvenciu. Tá je priamo úmerná zložke rýchlosti, ktorá je v rovine lúčov kolmá na os uhla obidvoch lúčov.

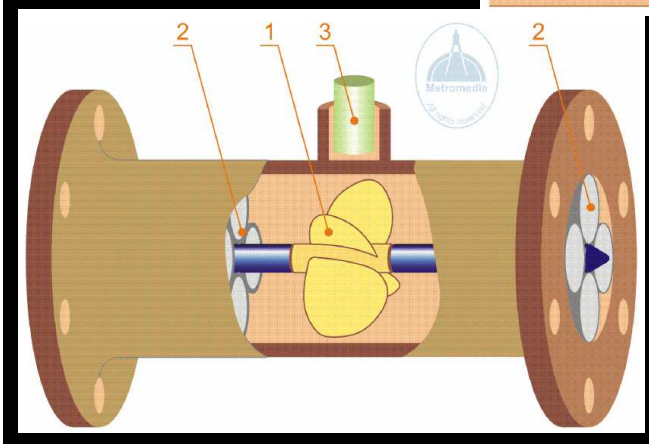
a) schematické znázornenie,
b) interferenčná mriežka
1 – laser,
2 – optika,
3 – prúdiaca tekutina,
4 – fotočlen

Rýchlostné meradlá pretečeného množstva

Turbínkový prietokomer s bezdotykovým počítadlom otáčok
1 – turbínka,
2 – usmerňovač,
3 – snímač (optické vlákno, Hallova sonda)







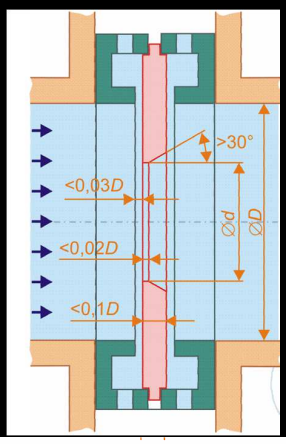
Meradlo pretečeného množstva s lopatkovým rotorom

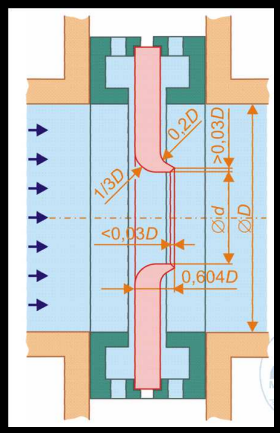
Prietokomery využívajúce tlakovú stratu tekutiny

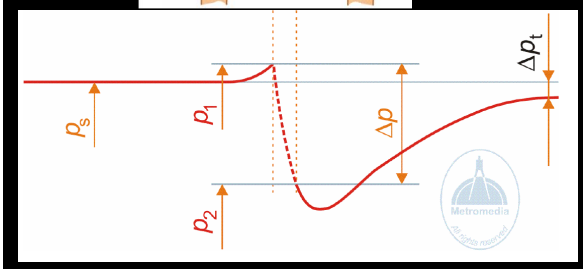
- Prietokomery využívajúce tlakovú stratu tekutiny patria pre svoju jednoduchú konštrukciu a obsluhu medzi najpoužívanejšie prietokomery. Zabezpečujú viac ako 50 % všetkých meraní prietoku. Patria medzi ne dve veľké skupiny: **prierezové a kolenové prietokomery.**
- **V prierezových prietokomeroch** sa meria rýchlosť prúdiacej tekutiny w a zo známej geometrie potrubia sa stanovuje objemový (resp. hmotnostný) prietok. Rýchlosť prúdiacej tekutiny (resp. jej pretečené množstvo) sa stanovuje na základe **zmeny tlakovej energie** tekutiny na kinetickú energiu. K zmene dochádza na škrtiacom orgáne pevne zabudovanom v potrubí, kde pri náhlom zúžení prietokového prierezu nastane miestne zvýšenie kinetickej energie. Niektoré škrtiace orgány sú normalizované, teda norma definuje ich rozmery a aj vzťah na výpočet prietoku z nameranej tlakovej straty. Patrí medzi ne **clona, dýza a Venturiho dýza**.

Normalizovaná clona a dýza
Venturiho dýza

$$q_V \approx C \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$$



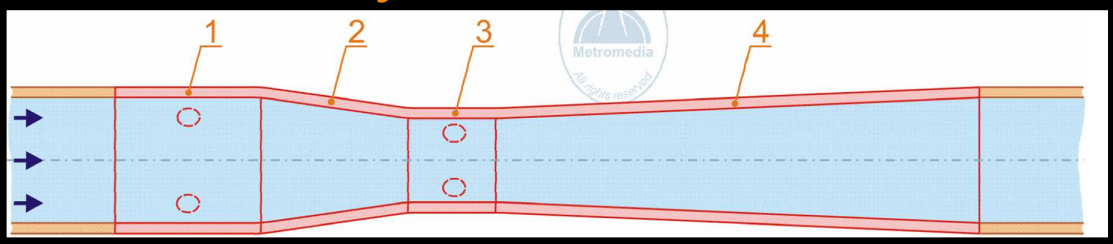




$$q_v = \frac{c \cdot \varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\frac{p_1 - p_2}{\rho}}$$

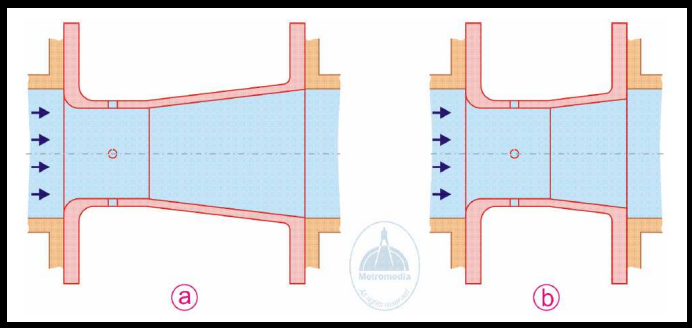
kde
c je prietokový koeficient škrtiaceho orgánu, $c = f\,(Re_D, \beta^2, D)$
ε je expanzný koeficient, pre kvapalinu $\varepsilon = 1$, $\varepsilon = f\,(\beta^2, \Delta p/p_1, \chi)$
β je pomer priemerov, $\beta = d/D$,
p_1 je tlak tekutiny pred škrtiacim orgánom,
p_2 je tlak tekutiny za škrtiacim orgánom,
ρ je hustota meranej tekutiny,
d je vnútorný priemer škrtiaceho orgánu,
χ je izoentropický koeficient,
D je vnútorný priemer potrubia.

Venturiho trubica
Venturiho dýza



Klasická **Venturiho trubica** sa používa v potrubiach s vnútorným priemerom 50 až 1200 mm pri pomere priemerov β od 0,3 do 0,75 a Reynoldsovom čísle $2\times10^5 \le Re \le 2\times10^6$.

Venturiho dýza sa používa na meranie prietoku tekutín v potrubiach, ktorých vnútorný priemer dosahuje hodnoty od 65 do 500 mm pri pomere priemerov β od 0,316 do 0,775 a $1{,}5\times10^5 \le Re \le 2\times10^6$.

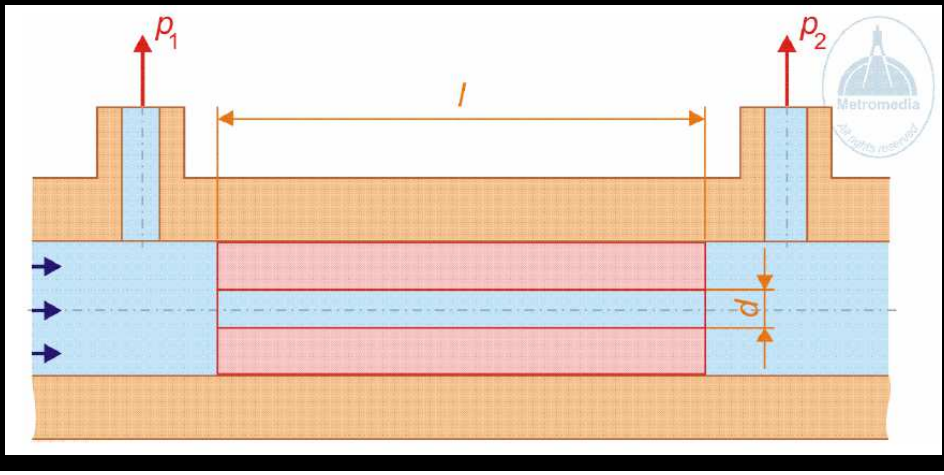


Normalizovaná Venturiho dýza
a) neskrátený difúzor,
b) skrátený difúzor

Meracia kapilára

Meracia kapilára sa používa na meranie **veľmi malých prietokov**.

Skladá sa z rovnej kapiláry (rúrky), zabudovanej v potrubí. Dĺžka kapiláry l sa volí tak, aby sa v nej vytvorilo laminárne prúdenie. Kapilára kladie odpor pri prúdení, čím dochádza k tlakovej strate Δp. Meraný objemový prietok q_v je priamo úmerný tlakovému rozdielu na kapiláre.

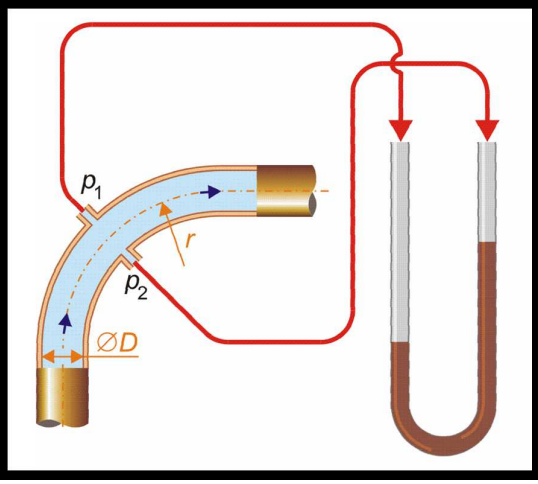


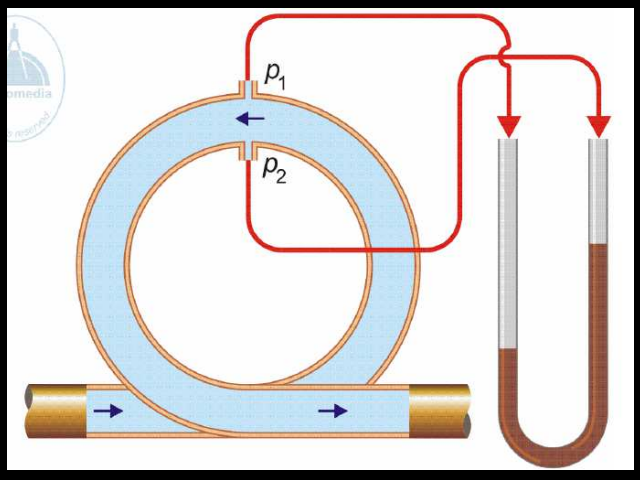
Kolenový (odstredivý) prietokomer

- Kolenový prietokomer sa používa na meranie prietoku kvapalín, plynov aj pár.
- Princíp činnosti sa zakladá na zmene tlaku v dôsledku zmeny smeru prúdu tekutiny v zakrivenom kanáli. Kanál je najčastejšie zakrivený do pravého uhla. Ak má byť splnená rovnica kontinuity, rýchlosť prúdenia tekutiny na vonkajšom polomere zakrivenia musí byť väčšia, ako na vnútornom polomere. Rozdielna rýchlosť tekutiny sa prejaví zmenou statických tlakov na vnútornom a vonkajšom polomere zakrivenia. Najväčší tlakový rozdiel Δp je v osi súmernosti zakrivenia, kde sa preto umiestňujú snímače tlaku. Z nameranej tlakovej diferencie sa dá určiť objemový prietok tekutiny.

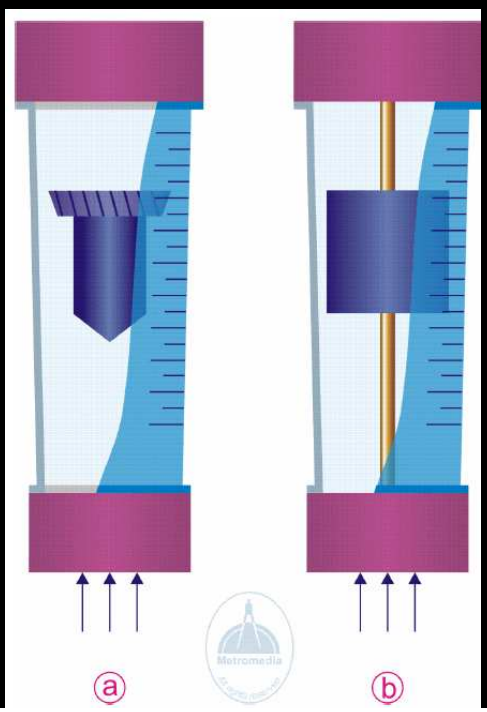
Kolenový (odstredivý) prietokomer

- Bežne sa používajú pre potrubia s vnútorným priemerom od 15 do 500 mm, pričom objemový prietok kvapalín nadobúda hodnoty v rozsahu od 0,05 až do 3000 m^3/h a pre plyny od 10 do 10 000 m^3/h.
- Tlaková strata je malá, dovolená chyba merania sa pohybuje v rozsahu od 2 až do 5 % meracieho rozsahu.





Plavákový prietokomer



so stabilným plavákom s nestabilným plavákom

Plavákovým prietokomerom sa meria objemový prietok kvapalín aj plynov. Je známy pod názvom **rotameter**. Teleso rotačného tvaru (plavák) sa voľne pohybuje vo zvislej kužeľovej trubici, ktorej **prierez sa rozširuje** smerom nahor. Prietok je kvadratickou funkciou polohy plaváka, a preto je stupnica plavákového prietokomera nelineárna.

Trubica prietokomera býva vyhotovená zo skla, pri vyšších teplotách a tlakoch sa vyrába z kovu.

Plaváky prietokomerov sa líšia od seba materiálom a tvarom. Vo všeobecnosti existujú dva typy plavákov:

a) ***nestabilné*** - plavák v trubici vedie tyč alebo,

b) ***stabilné*** - plavák má po obvode šikmé zárezy alebo priebežné šikmé otvory v telese plaváka, ktoré prúdom tekutiny uvedú plavák do rotácie.

Poloha plaváka sa sníma dotykovým alebo bezdotykovým spôsobom (napríklad pomocou indukčnostných,
kapacitných, fotoelektrických snímačov a pod).

Ak sa na plaváku nachádza magnet, môže sa rotameter využívať aj ako prietokový spínač.

Ultrazvukové prietokomery

Ultrazvukové prietokomery merajú rýchlosť prúdiacej tekutiny bezkontaktne. Neobsahujú žiadne pohyblivé časti a nezväčšujú odpor potrubia. S výhodou sa používajú na meranie objemového prietoku elektricky vodivých a nevodivých tekutín, ktoré môžu byť aj silne znečistené, agresívne alebo výbušné.

Podstatou ultrazvukových prietokomerov je **meranie zmeny rýchlosti (meria sa čas prechodu), zmeny fázy alebo Dopplerovej zmeny frekvencie šíriaceho sa ultrazvukového signálu v prúdiacej tekutine**.

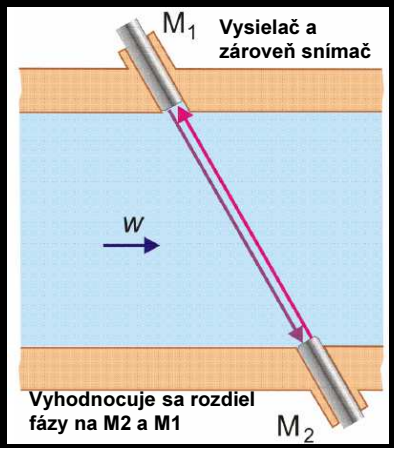
Keď sa ultrazvuk šíri v smere prúdenia tekutiny,

jeho rýchlosť sa zvyšuje, keď sa šíri proti smeru prúdenia,

jeho rýchlosť sa znižuje.

Ultrazvukové prietokomery využívaju:

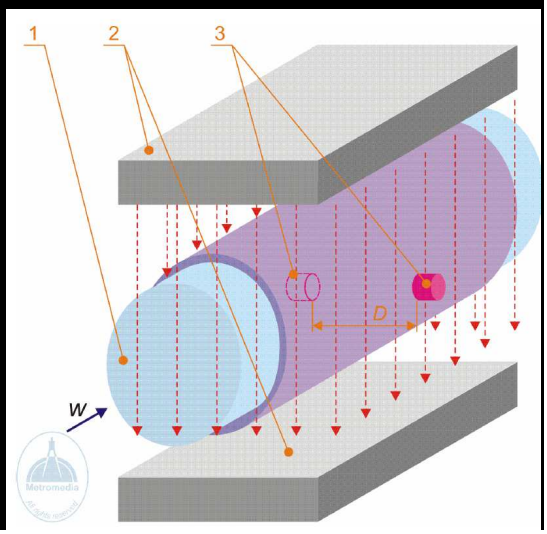
- spojitú metódu vysielania ultrazvukového signálu,
- impulznú metódu vysielania ultrazvukového signálu,
- Dopplerov jav.



Magnetické indukčné prietokomery

Meranie prietoku tekutiny pomocou elektromagnetického prietokomera sa zakladá na využití Faradayovho zákona. Ten hovorí, že ak sa v magnetickom poli pohybuje vodič dĺžky l rýchlosťou v kolmo na magnetické siločiary, vo vodiči sa naindukuje napätie U.

V magnetickom prietokomere je týmto vodičom elektricky vodivá tekutina 1, ktorá prúdi kolmo na magnetické siločiary vonkajších magnetov 2 (elektromagnetov). Dĺžka vodiča l je daná vzdialenosťou elektród 3, ktoré sa nachádzajú na protiľahlých stranách potrubia.
Na nich sa sníma indukované napätie, ktoré je priamo úmerné rýchlosti prúdenia tekutiny w.



Prietokomery s pridávaním značkovacej látky

- Značkovacia látka (značkovač) sa pridáva do prúdiacej tekutiny vstrekovaním alebo indukčne. Na meranie pohybu značkovacej látky sa používa jedna alebo dve sady snímačov. Ak sa používa jedna sada, musí sa zaznamenať čas vstreknutia cez injekčný otvor, ako aj čas prechodu značkovača cez snímací prvok. Ak sa používajú dve sady snímačov, meria sa iba čas prechodu pridanej látky medzi nimi.
- Najčastejšie sa vstrekovaním do prúdiacej tekutiny pridávajú značky:
  - vodivostné (elektrolyt, napr. soľ) využíva sa zmena vodivosti,
  - tepelné,
  - optické (farbivo),
  - ionizačné (prímesy rádioizotopu napr. Xe, Kr, Rn do plynov, ionizácia iskrovým výbojom) ionizácia sa sníma kapacitným snímačom
  - NMR prietokomery.

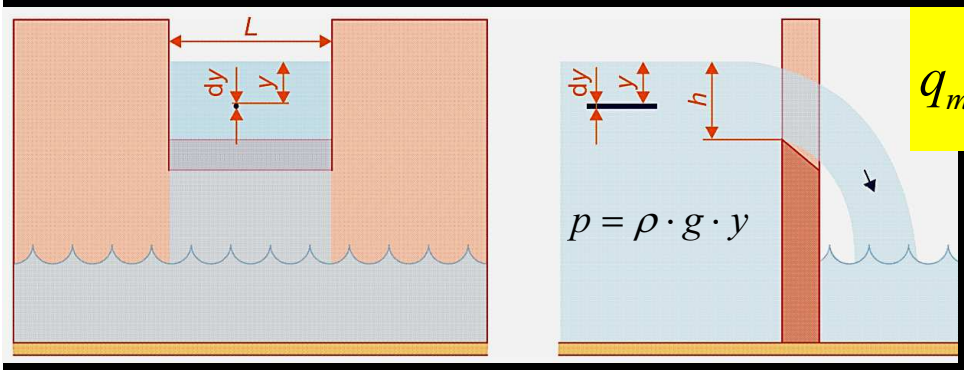
Prietokomery používané v otvorených kanáloch

V praxi sa využívajú aj prietokomery, určené na meranie prietoku kvapalín voľne prúdiacich v otvorených kanáloch. Využíva sa pritom meranie spádu kvapaliny, z ktorého sa pri známej geometrii meracieho kanála dá odvodiť objemový prietok.

Pre otvorené kanály sa najčastejšie používajú dva základné typy prietokomerov **prepady a žľaby**.

V prípade prepadov aj žľabov sa tlak, spôsobujúci prúdenie, meria výškou voľného povrchu proti prúdu prepadovej hrany priehrady.

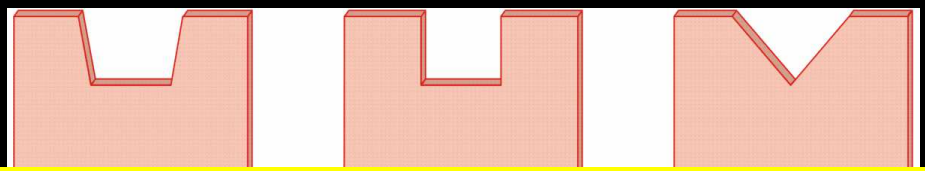
Prepady



$$q_m = \frac{2}{3}\varepsilon \cdot L\sqrt{2gh^3}$$

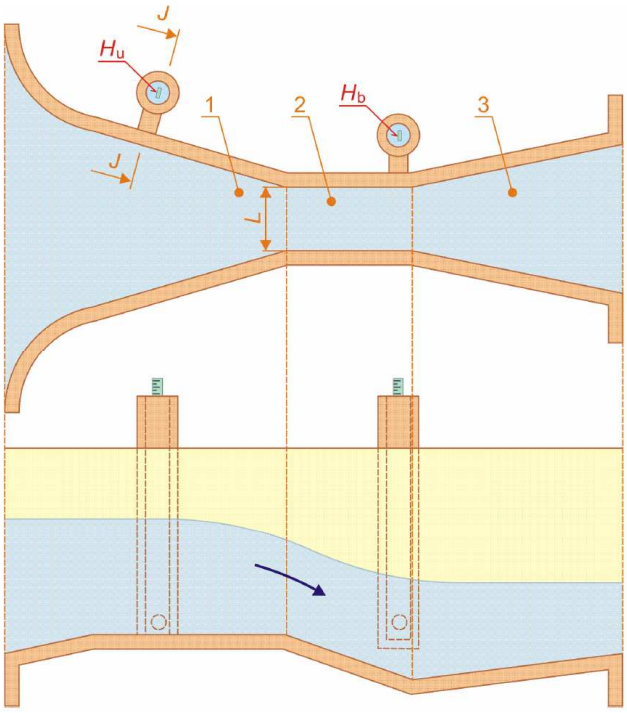
ε je koeficient stlačiteľnosti,
L je šírka priehrady,
h je nameraný spád kvapaliny

Zvislá vzdialenosť medzi úrovňou prepadovej hrany a hladinou kvapaliny sa nazýva **spádom *h***. Merania spádu by sa mali vykonávať proti prúdu vo vzdialenosti od prepadovej hrany najmenej štyrikrát väčšej ako očakávaný maximálny spád kvapaliny.



Najpoužívanejšie tvary výrezov sú:
a) Cippolettiho alebo lichobežníkový výrez, b) pravouhlý výrez, c) trojuholníkový výrez

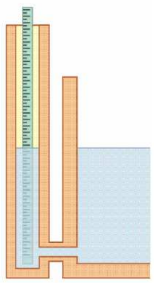
Parshallov žľab



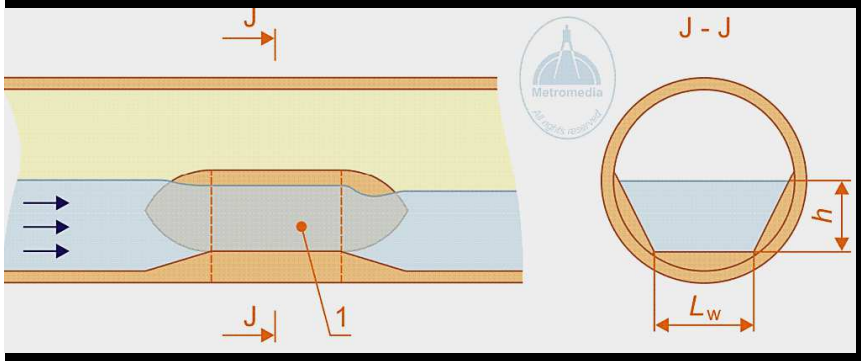
Parshallov žľab sa skladá zo zbiehavej časti 1, hrdlovej časti 2 a z rozširujúcej sa časti 3.

Prietok sa zisťuje meraním výšky spádu H.

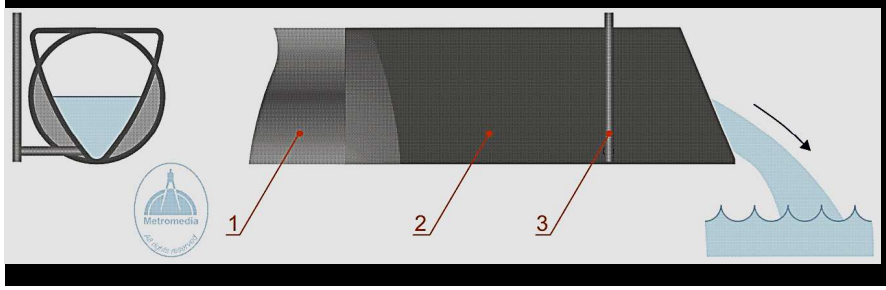
Na rozdiel od prepadu sa dá výška spádu merať proti prúdu (horný spád H_u) a po prúde (dolný spád H_b). Ak sa použije iba meranie horného spádu, nameraný prietok je zaťažený chybou.



Palmerov-Bowlusov žľab
Parabolický žľab



Palmerov-Bowlusov žľab má hrdlovú časť, ktorá zaisťuje, že kinetická energia kvapaliny v hrdlovej časti 1 bude väčšia ako kinetická energia kvapaliny voľne prúdiacej v prívodnom vedení.
Na zvýšenie kinetickej energie kvapaliny v hrdlovej časti sa využíva zúženie stien, aj zvýšenie dna. Dĺžka hrdlovej časti 1 je najmenej taká, ako je priemer prívodného vedenia.



Parabolický žľab 2 sa používa na výstupnom konci potrubia 1. Základným rozdielom medzi parabolickým žľabom a ostatnými dvoma žľabmi je ten, že výtok z tohto žľabu musí na konci vedenia voľne padať. Vzťah medzi hĺbkou kvapaliny meranou hĺbkomerom 3 a prietokom sa stanovuje kalibráciou.

Meranie teploty

- Teplota je mierou kinetickej energie molekúl materiálu.
- Teplota je termodynamická stavová veličina definovaná na základe účinnosti vratného Carnotovho cyklu. Účinnosť vratného Carnotovho cyklu, pracujúceho medzi rovnakými kúpeľmi s určitými teplotami závisí len od týchto teplôt a nezávisí od použitej teplomernej látky.
- Lord Kelvin definoval termodynamickú stupnicu na základe trojného bodu vody, to znamená na základe rovnovážneho stavu troch skupenstiev vody (ľadu, vody a nasýtenej vodnej pary).
- Teplota trojného bodu vody má v termodynamickej stupnici hodnotu T = 273,15 K. Základnou jednotkou termodynamickej teploty je kelvin (K) definovaný ako 273,15-ta časť termodynamickej teploty trojného bodu vody. Vzhľadom na spôsob definovania teplotných stupníc v minulosti sa ako jednotka teploty používa tiež stupeň Celzia (°C).
  - **T_0 = 273,15 K** **t(°C) = T(K) - 273,15**
-

Prevod Fahrenheitovej stupnice na Celziovu

Podľa definície má stupeň Celzia rovnakú veľkosť ako kelvin (1K = 1°C).

Hodnoty teplôt sa môžu vyjadriť v Kelvinoch alebo v stupňoch Celzia. Platí, že $\Delta t = \Delta T$.

Okrem toho sa v USA používa Fahrenheitova stupnica, v ktorej zodpovedá teplote topenia ľadu 32°F a varu vody teplota 212 °F. Táto stupnica sa delí medzi uvedenými bodmi na 180°F. Prevod Fahrenheitovej stupnice na Celziovu a naopak sa realizuje prevodovými vzťahmi

$$u = (9/5)\, t + 32 \ (°F)$$

$$t = (5/9)u - 32 \ (°C)$$

kde

- u je Fahrenheitova teplota,
- t je Celziova teplota.

Medzinárodná teplotná stupnica ITS-90 (The International Temperature Scale of 1990)

Pre kalibračné a kontrolné účely teplomerov bola stanovená tzv. medzinárodná teplotná stupnica ITS-90 z r.1990, ktorá je definovaná sedemnástimi pevne definovanými teplotnými bodmi, ktoré odpovedajú rovnovážnym stavom medzi fazami vybranych latok.

Niektoré definičné body IPTS-90 sú v tabuľke:

Fázová premena alebo stav	Teplota [°C]	Teplota [K]
tlak nasýtenej pary He	-270,15 ÷ -268,15	3 až 5
trojný bod e-H_2	-259,3467	13,8033
bod varu vodíka	-252,87	20,28
bod varu neónu	-246,048	27,102
trojný bod kyslíka	-218,780	54,361
bod varu kyslíka	- 182,962	90,188
trojný bod vody	0,01	273,16
bod varu vody	100,00	373,15
tuhnutie zinku	419,58	692,73
tuhnutie striebra	961,96	1235,08
tuhnutie zlata	1064,43	1337,58

Základné princípy merania teploty

- **Teplotná rozťažnosť** tuhých, kvapalných alebo plynných teplomerných látok, resp. rozdiel teplotných rozťažností dvoch látok predstavuje mieru teploty. Meria sa zmena objemu teplomernej látky pri konštantnom tlaku (***dilatačné teplomery***), alebo zmena tlaku teplomernej látky pri konštantnom objeme (***tlakové teplomery***),
- **Zmena elektrických vlastností** snímača v závislosti od zmeny teploty.
  - závislosť elektrického odporu vodičov alebo polovodičov od teploty. Takéto snímače teploty sa nazývajú **odporové teplomery**, resp. **termistory**,
  - vznik termoelektrického napätia v obvode tvorenom dvoma rôznymi kovovými vodičmi, ktorých konce sú spojené a vystavujú sa dvom rôznym teplotám (Seebeckov jav). Takéto snímače teploty sa nazývajú **termočlánky**,

Základné princípy merania teploty

- **Snímanie celkovej energie tepelného žiarenia**. Na určenie teploty sa využíva tepelná závislosť žiary, ktorú merajú **tepelné detektory**,

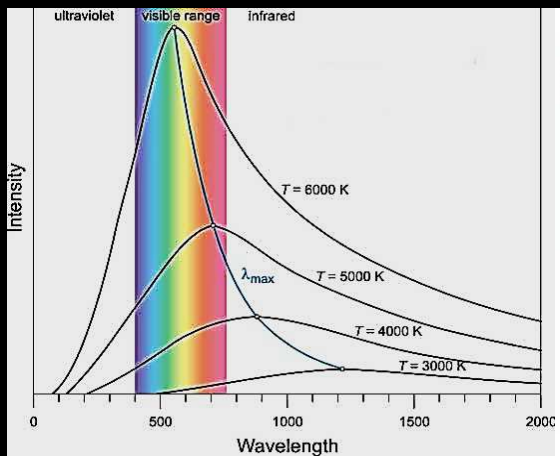
  Vyžarovaný výkon – Stefan-Boltzmanov zákon:

$$M_e = \sigma T^4$$

M_e je vyžarovaný výkon na jednotku plochy a T je teplota v Kelvinoch, σ je Stefan-Boltzmannova konštanta.

- **Využitie spektrálnej žiarivosti** meraného objektu - pyrometre. S rastom teploty meraného objektu rastie aj jeho spektrálna žiarivosť. Bezkontaktné meranie teploty:
  - Radiačné pyrometre
  - Optické pyrometre
  - Infračervené teplometre,
    - infračervené termočlánky
  - Wiennov zákon:

$$\lambda_{max} = \frac{2,8978 \cdot 10^6}{T} nm.K$$



Prehľad princípov snímačov teploty

Názov snímačov teploty	Fyzikálny princíp	Príklad teplomera	Rozsah použitia (° C)
dilatačné snímače	zmena tlaku	plynový	–5 až +500
	zmena tlaku parnej náplne	tlak pár	–50 až +400
	objemová rozťažnosť	kvapalinový	–200 až +750
	dĺžková rozťažnosť	kovový	–50 až +900
elektrické snímače	termoelektrický jev	termočlánok	–200 až +2 800
	zmena elektrického odporu	odporový kovový	–250 až +900
	zmena prahového napätie	odporový polovodičový, diódové senzory	–200 až +300
špeciálne teplomery	bod mäknutia	keramické žiaromerky	600 až 2 000
	bod topenia	teplomerné telieska	100 až 1 300
	zmena farby	teplomerné farby	40 až 1 350
bezdotykové snímače teploty	zachytenie celkového tepelného žiarenia	širokopásmové pyrometre	–40 až +5 000
	zachytenie úzkeho zväzku tepelného žiarenia	monokryštalické pyrometre	100 až 3 000
	porovnanie λ dvoch zväzkov tepelného žiarenia	pomerové pyrometre	700 až 2 000
	snímanie teplotného obrazu telesa	termovízia	–30 až 1 200

Odporové snímače teploty

Rezistivita vodivých materiálov závisí od **koncentrácie** voľných nosičov náboja a od ich **pohyblivosti**.

Pohyblivosť je parameter, ktorý zodpovedá za schopnosť nosičov náboja pohybovať sa viac alebo menej voľne cez atómovú mriežku. Ich pohyb neustále tlmia kolízie.

Koncentrácia aj pohyblivosť sa menia s teplotou v miere, ktorá podstatne závisí od materiálu.

Používajú sa kovy aj polovodiče.

Hovoríme tak o **kovových odporových snímačoch teploty** resp. **o polovodičových odporových snímačoch teploty - termistoroch.**

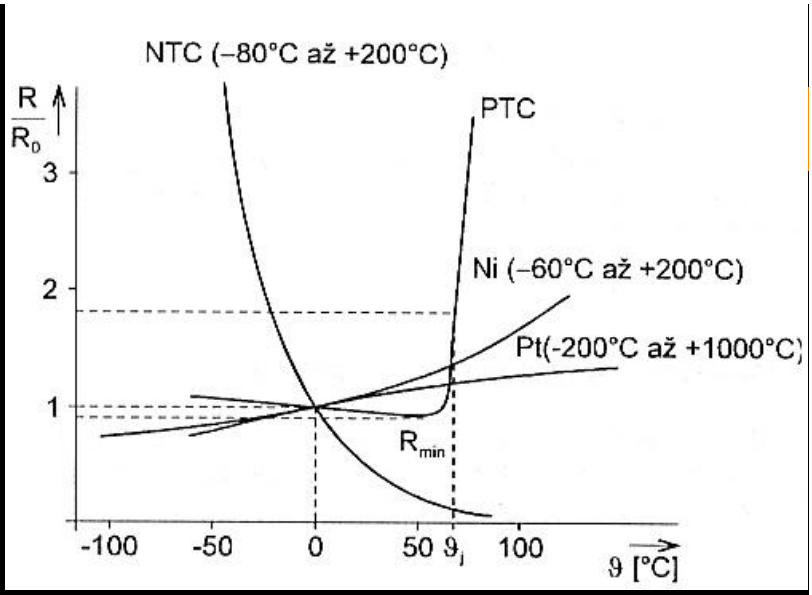
Odporové snímače teploty

V prirodzených (alebo čistých) **polovodičoch** sa elektróny viažu k svojim atómom pomerne silno. Len niekoľko z nich má dostatočnú energiu (pri izbovej teplote) na to, aby sa voľne pohybovali. Pri zvýšenej teplote získa viacej atómov dostatočnú energiu na uvoľnenie sa od atómu, takže **so zvyšujúcou sa teplotou sa zvyšuje koncentrácia voľných nosičov náboja**. Keďže teplota má omnoho menší vplyv na pohyblivosť nosičov náboja, **rezistivita polovodičov sa so zvyšujúcou teplotou znižuje**. **Ide o záporný teplotný koeficient odporu.**

V kovoch sa všetky dostupné nosiče nábojov môžu pohybovať voľne v mriežke, dokonca aj pri izbovej teplote. **Zvýšená teplota neovplyvní koncentráciu nosičov náboja.** Avšak pri zvýšenej teplote sa vibrácie v mriežke zosilňujú, zvyšujúc šancu elektrónov na kolízie a tlmenie voľného pohybu elektrónov v kovoch. Preto sa **rezistivita kovov pri zvýšenej teplote zvyšuje**, ide teda o **kladný teplotný koeficient odporu**.

Charakteristika odporových teplomerov

Termistory NTC – negistor
Termistory PTC – pozistor

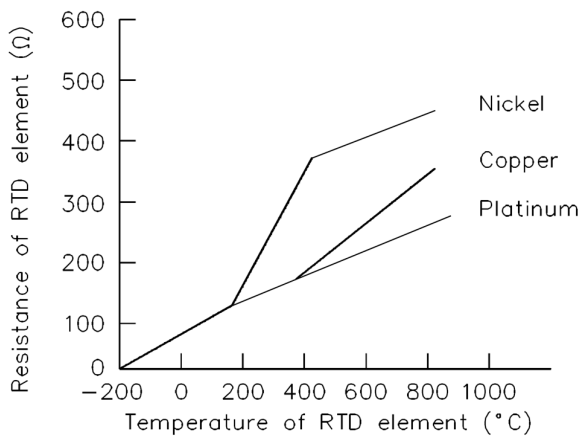


- Konštrukcia kvalitného odporového snímača teploty vyžaduje materiál (kov) s teplotným koeficientom odporu, ktorý je v širokom rozsahu teplôt stabilný a dobre reprodukovateľný.
- Zďaleka najlepší materiál prestavuje **platina**, ktorá má množstvo vhodných vlastností. Platina má vysoký bod topenia (1769°C), chemicky je veľmi stabilná, odolná voči oxidácii a dá sa dosiahnuť jej vysoká čistota.

Kovové odporový teplomery

- Platinové odporové snímače teploty sa používajú ako medzinárodné etalóny teploty pre teploty od trojného bodu rovnovážneho stavu vodíka (-182,97 °C) po bod tavenia antimónu (+680,5 °C), ale dajú sa použiť aj na meranie vyšších teplôt.
- Platinový odporový teplomer je normalizovaný etalónový pristroj pre teploty v rozsahu 13,8033 K až 961,8 °C podľa ITS-90 a súčasne prevádzkový pristroj pre meranie v rozsahu 2,1 K až 1273,15 K.

Platinový teplomer
RTD (resistant temperature detector)



Citlivosť snímača Pt100 dosahuje približne 0,4%/K alebo 0,39 Ω/K.
Parametre b a c spôsobujú nelinearitu vzťahu medzi teplotou a odporom. Ak sa nevyžaduje vysoká presnosť, v rámci obmedzeného teplotného rozsahu sa dá nelinearita zanedbať.

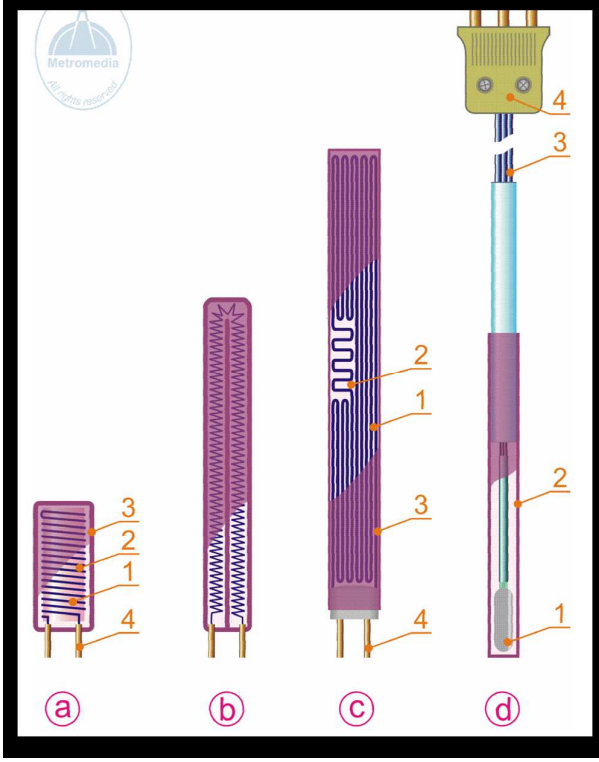
Platinový teplomer má výbornú linearitu. Jeho teplotnú charakteristiku uvádza vzťah

$$R(T)=R(0)\cdot\{1+aT+bT^2+cT^3+dT^4+\ldots\}$$

pričom R(0) je odpor pri 0 °C. Hodnoty koeficientov R(0), a, b, … sa špecifikujú podľa rôznych noriem a teplotných rozsahov. Napríklad podľa normy DIN-IEC 751 sa odpor snímača s označením Pt100 charakterizuje takto:

- R(0) = 100,00 Ω
- a = $3{,}90802\cdot10^{-3}$ K^{-1}
- b = $-5{,}8020\cdot10^{-7}$ K^{-2}
- c = $4{,}2735\cdot10^{-10}$ K^{-3}

Odporové snímače teploty



a) tenký drôt bifilárne navinutý na jadre
1) tenký odporový drôt,
2) sklené jadro,
3) ochranný kryt,
4) svorka

b) špirála v keramickom puzdre,

c) tenká fólia
1) odporová fólia,
2) základová doska,
3) ochranný kryt,
4) svorka

d) meracia sonda
1) citlivý prvok
2) ochranný kryt
3) pripojovacie vodiče
4) svorka

Zdroje chýb merania

- Tolerancie a chyby merania termistormi môžu vznikať v dôsledku:
  - nelinearity samotného snímača
  - vlastného ohrevu a zmeny odporu zmenou teploty,
  - chýb v pripojovacom obvode,
  - zmeny odporu prívodných vodičov.
- **Vlastný ohrev** sa dá minimalizovať znížením prúdu, ktorý preteká cez snímač a malým tepelným odporom okolia. Merací prúd I zavádza do snímača tepelnú spotrebu $I^2R(T)$. Napríklad pri teplote 0 °C a prúde 1 mA dosahuje spotreba hodnotu 0,1 mW. Aby sa obmedzila chyba v dôsledku vlastného ohrevu na 0,1 °C, snímač treba namontovať tak, aby bol tepelný odpor menší ako 10^3 K/W
- Odporové snímače teploty sa často zapájajú do mostíka, čím sa znižuje nelinearita a neželané vzájomné interferencie. Podstatný vplyv môže mať odpor prívodných vodičov, najmä ak sa snímač nachádza ďaleko od meracieho obvodu.

Termistory (thermally sensitive resistor tepelne citlivý rezistor)

- **Termistor** predstavuje odporový snímač teploty vytvorený z **keramických látok**. Vo všeobecnosti sa používajú
  - sintrované oxidy (**spekanie alebo lisovanie práškovej zmesi**) zo skupiny železných kovov (chróm, mangán, nikel, kobalt, železo). Najpopulárnejším materiálom je **Mn_3O_4**. Tieto oxidy sú legované prvkami s rôznou valenciou (MnO, Fe_2O_3, TiO_2, CoO), čím sa získa nižšia rezistivita, prinášajúca **polovodičové vlastnosti** (vo väčšine prípadov typu p).
  - **tenkovrstvová technológia** na báze polykryštalického kremíka Si alebo SiC
  - **polykryštalická feroelektrická keramika** (napr. $BaTiO_3$) - PTC
- Ich **citlivosť** je omnoho **vyššia** ako v prípade kovových odporových snímačov teploty. Okrem toho môžu byť termistory veľmi malé, takže sa dajú použiť na takmer bodové meranie teploty. V porovnaní s kovovými odporovými snímačmi teploty majú termistory menšiu **časovú stálosť** a vykazujú omnoho väčšiu **nelinearitu**.

Odporové polovodičové senzory

- **Monokryštalické / CMOS senzory** - princíp funkcie: založený na zmene pohyblivosti voľných nosičov náboja (elektrónov v prípade polovodiča typu N) so zmenou teploty. S rastúcou teplotou klesá pohyblivosť, tým klesá vodivosť polovodiča a teda rastie odpor. Využíva sa v integrovaných obvodoch s MOS / CMOS tranzistormi. Vyrábajú sa z kremíku (Si), germánia (Ge), india (In) ai., ale v priemyselnej praxi sa sériovo vyrábajú **Si senzory**.
- **Monokryštalické kremíkové PN senzory** - funkcia je založená na teplotnej závislosti napätia PN prechodu v priepustnom smere. Teplotný koeficient je záporný a podľa štruktúry prechodu je v rozmedzí -2,5 až 2 mV/K. Pri výrobe sa využíva PN prechod báza-emitor tranzistora. K jednoduchému meraniu teplôt však možno využiť akúkoľvek univerzálnu usmerňovaciu diódu, keď bude napájaná zo zdroja prúdu a merať sa bude zmena napätia na dióde so zmenou teploty.

Koncentrácia voľných nosičov náboja

Väčšina polovodičov má záporný teplotný koeficient odporu. Platí to aj pre termistory. Preto sa aj termistory niekedy nazývajú aj negistory NTC alebo len krátko NTC (z angl. Negative Temperature Coefficient).

Existujú však aj termistory s kladným teplotným koeficientom odporu - pozistory PTC.

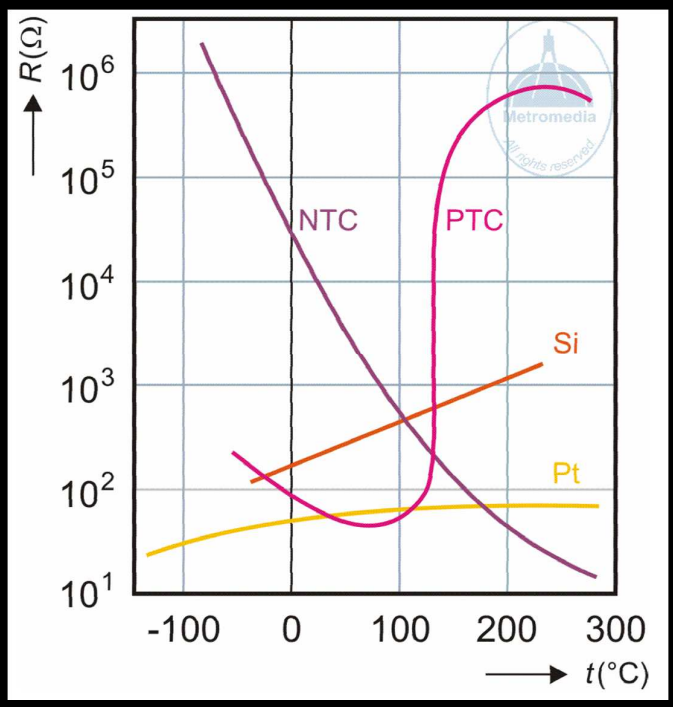
Rezistivitu materiálov NTC podmieňuje koncentrácia voľných nosičov náboja, pričom túto koncentráciu opisuje vzťah:

$$n = c \cdot e^{-\frac{E}{2kT}}$$

kde

- c je konštanta,
- E je šírka energetickej medzery (zakázané pásmo),
- k je Boltzmannova konštanta,
- T je teplota v K.

Charakteristiky rôznych odporových snímačov teploty



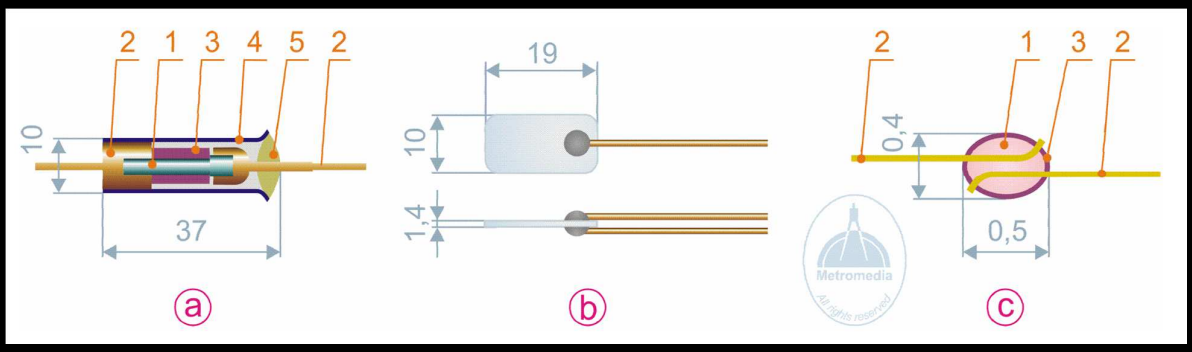
NTC - termistory so záporným teplotným koeficientom odporu - negistory
PTC - termistory s kladným teplotným koeficientom odporu - pozistory
(z angl. Negative resp. positive Temperature Coefficient)

Teplotná závislosť odporu od teploty pre NTC je vyjadrená vzťahom:

$$R_t = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

R_t - odpor termistora pri teplote t
A – konštanta závislá na materiáli a konštrukcii snímača
B – teplotne a materiálovo závislá premenná
T– termodynamická teplota

Termistory

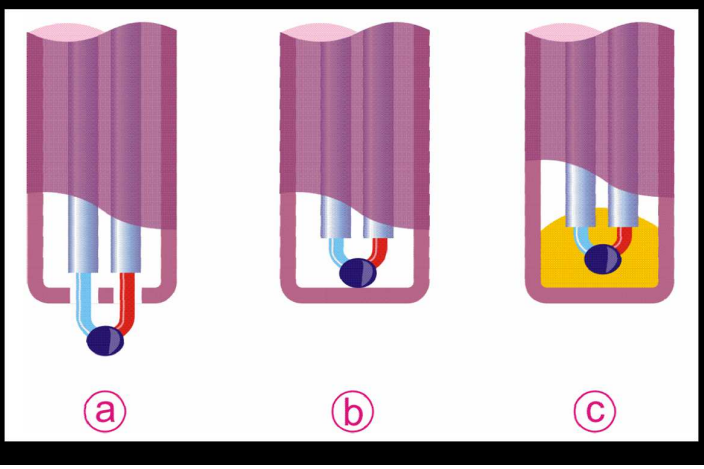


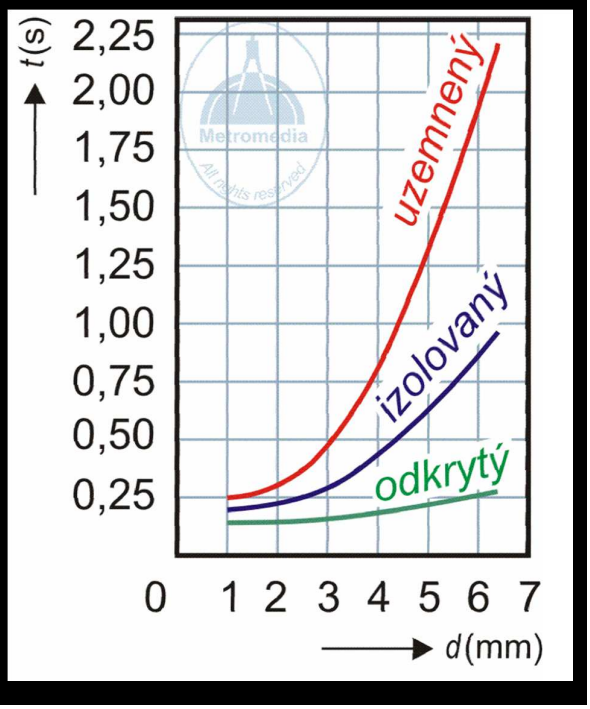
a) tyčinkový termistor (1 – citlivá tyčinka, 2 – držiak, 3 – ochranná fólia, 4 – ochranný kryt, 5 – izolačná látka),
b) plochý termistor,
c) perličkový termistor (1 – jadro, 2 – pripojovacie vodiče, 3 – ochranný kryt)

Základnou časťou termistora je polovodičový prvok – z keramického materiálu s pokoveným povrchom na pripojenie elektrických kontaktov. Zariadenie je zapúzdrené v obale z tepelne vodivého epoxidu na zaistenie mechanickej ochrany a s malým tepelným odporom k objektu merania. Existujú rôzne tvary – **kotúč, sklená guľôčka,** sonda, úprava pre montáž na povrchu (SMD). Najmenšie termistory sú menšie ako 1 mm.

Rôzne typy vyhotovenia meracieho spoja a rýchlosť odozvy

- a) obnažený spoj,
- b) uzemnený spoj,
- c) izolovaný spoj,
- d) porovnanie doby odozvy





Použitie termistorov - zhrnutie

- Termistory sa používajú pre teploty v **rozsahu** od –200 °C do 200 °C.
- Sú cca 10× citlivejšie ako kovové odporové teplomery, ale ich t–R charakteristika je poznačená výraznou **nelinearitou**.
- Termistory rozlišujeme dvojakého typu: NTC s negatívnym α a PTC s kladným α.
- Pre meranie teploty sa väčšinou používajú negistory, preto sa pre tieto snímače zaužíval názov „**termistor**“.
- Materiálom pre termistory sú keramické materiály na báze zlúčenín oxidov ($Fe_2O_3.TiO_2$, MnO, CoO, $BaO.TiO_2$).
- Nevýhodou termistorov je to, že ich nemožno vyrobiť s rovnakými parametrami, a preto je potrebné každý **jednotlivo kalibrovať**.

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT}$$

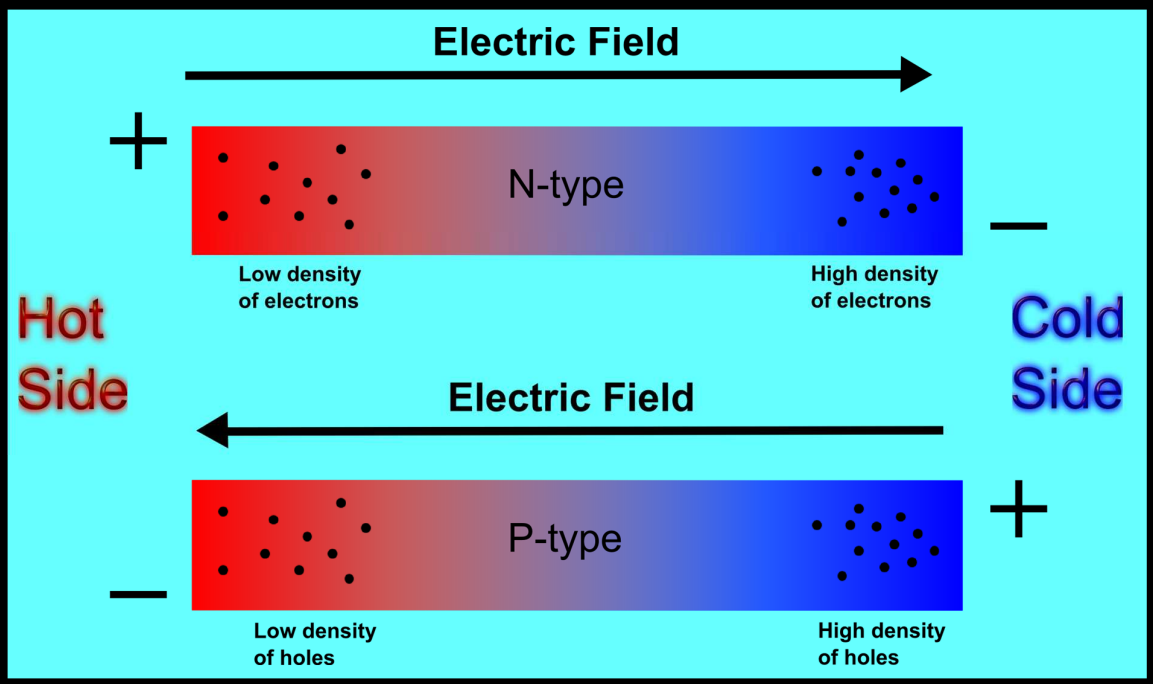
Termočlánok

- **Termočlánok** pozostáva z dvoch kovových vodičov z rozdielnych materiálov na jednom konci spojených. Spoj je meracím bodom reagujúcim na zmenu teploty voči teplote opačných – **studených koncov** a nazýva sa **teplým koncom termočlánku**.
- Princíp termočlánku spočíva vo vyvolaní **elektromotorického** - EMN (alebo tiež **termoelektrického** - TEN) **napätia** medzi dvoma rozdielnymi kovmi alebo zliatinami zohriatím ich spoja na teplotu vyššiu ako majú ich voľné konce. Ak by sme voľné konce kovov spojili aj v mieste s nižšou teplotou, termoelektrické napätie by vyvolalo elektrický prúd, ktorý by sa svojim tepelným účinkom snažil vyrovnať tepelný rozdiel medzi oboma spojmi.
- Keďže veľkosť TEN závisí na teplote porovnávacieho studeného konca je mimoriadne dôležité udržiavať jeho teplotu na konštantnej hodnote. V praxi to vyzerá tak, že porovnávací koniec termočlánku je umiestnený v termostate alebo sa teplota kompenzuje externým napätím na tzv. „umelú“ referenčnú teplotu. TEN sa vedie tzv. kompenzačným vedením k meraciemu zariadeniu.

Termoelektrické snímače - termočlánky

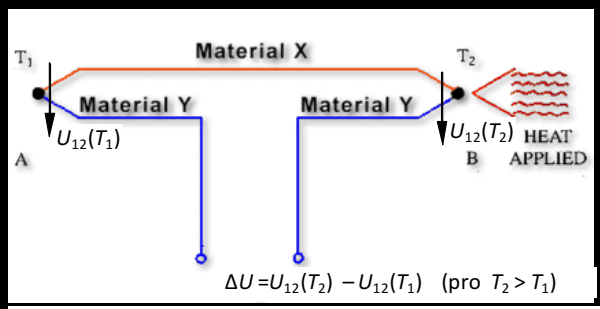
- Podstatou je **Seebeckov jav (rok 1822)**
- Voľné nosiče nábojov majú v rôznych materiáloch rôzne energetické hladiny. Keď sa navzájom vodivo spoja dva rôzne materiály (vytvoria dvojicu), vďaka difúzii sa nosiče nábojov preskupia, čím sa na spoji vytvorí rozdiel potenciálov. Hodnota tohto rozdielu potenciálov závisí od typu materiálu a od teploty. Samozrejme ako celok ostáva konštrukcia neutrálna. Tento jav samovoľného generovania napätia sa nazýva Seebeckov jav a napätie sa nazýva Seebeckovo napätie.
- Seebeckovo napätie samostatného materiálu sa definuje ako **termoelektrické napätie** po pripojení k referenčnému materiálu, zvyčajne k olovu. Takže Seebeckovo napätie spoja dvoch materiálov a a b sa dá tiež zapísať ako $U_{ab} = U_{ar} + U_{rb} = U_{ar} - U_{br}$, pričom písmeno ***r*** označuje referenčný materiál.

Seebeckov jav v polovodičoch

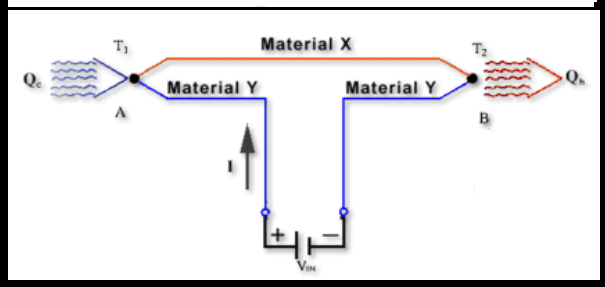


Termoelektrické javy

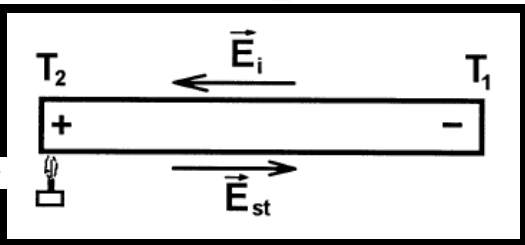
- Seebeckov jav



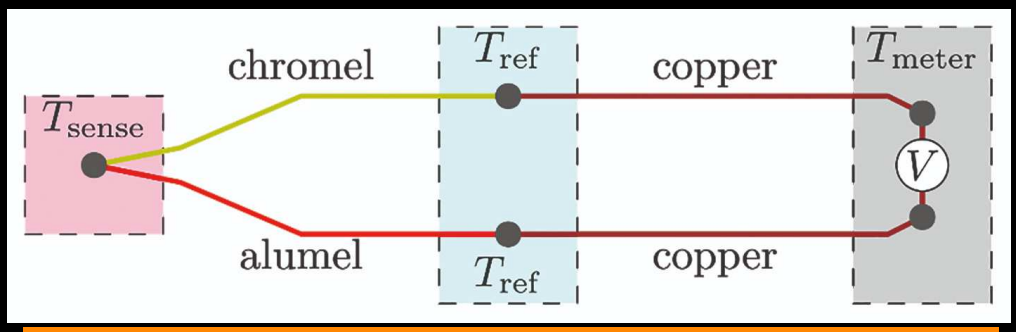
- Peltierov jav



- Thomsonov jav



Termočlánok - Seebeckov jav

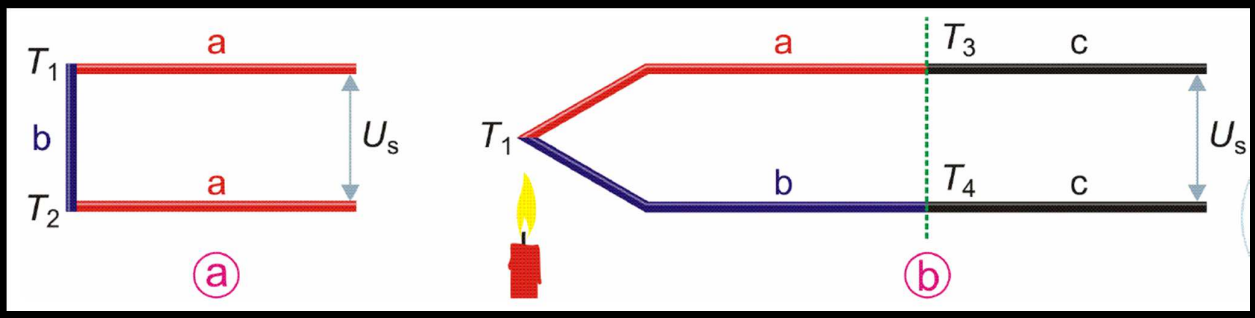


$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} (S_1 - S_2) \cdot dT = \int_{T_1}^{T_2} S_{12} \cdot dT$$

U_T – termoelektrické napätie [V],
T_1, T_2 – teplota referenčného a meracieho spoja [K],
S_{12} – Seebeckov koeficient termočlánku,
S_1, S_2 – Seebeckové koeficienty materiálov vodičov termočlánku [V/K].

Typ termočlánku	Materiál P	Materiál N	Typický rozsah teplôt [°C]	Seebeckov koef. pri 25°C [μV/°C]
E	Chromel	Konštantán	–200 až +900	61
J	Železo	Konštantán	0 až +760	52
T	Meď	Konštantán	–200 až +371	41
K	Chromel	Alumel	–200 až +1250	41

Alternatívna Schéma termočlánku



Schémy termočlánku: a) základná schéma, b) teplý a studený koniec (spoj)

Termoelektrické napätie cez túto sériu spojov dosahuje hodnotu

$$U_S = U_{ab}(T1) + U_{ba}(T2).$$

Samozrejme, ak sú teploty T_1 a T_2 rovnaké, napätia U_{ab} a U_{ba} sú takisto rovnaké, majú však opačné znamienko, takže $U_S = 0$. Naopak, ak majú dva spoje rôzne teploty, termoelektrické napätia sa navzájom nevynulujú, na koncových bodoch dvojice vodičov sa dá namerať napätie U_s.

Napätie na termočlánku

Termočlánky merajú iba rozdiel teplôt, nie absolútnu teplotu.

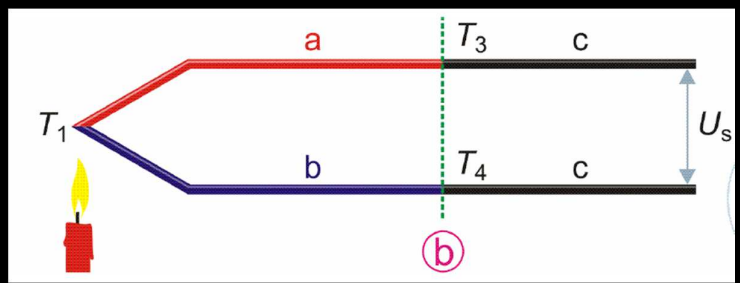
Na zistenie teploty jedného konca (spoja) treba poznať teplotu druhého konca. Tento druhý spoj sa nazýva studený koniec. Udržiava sa na konštantnej, dobre známej teplote (napríklad 0 °C). Merací spoj sa nazýva teplý koniec a je vystavený prostrediu, ktorého teplotu chceme zistiť.

Zo schémy na obrázku môžeme napísať:

$$U_s=U_{ca}(T_3)+U_{ab}(T_1)+U_{bc}(T_4)=U_{ca}(T_3)+U_{ab}(T_1)+U_{ba}(T_4)+U_{ac}(T_4)=$$

$$= U_{ab}(T_1)-U_{ab}(T_4)+U_{ca}(T_3)-U_{ca}(T_4)$$

Ak majú obidva spoje a-c a b-c takú istú teplotu (teda $T_3 = T_4$), posledné dva členy sa rušia a zvyšné napätie závisí od použitých materiálov a b.



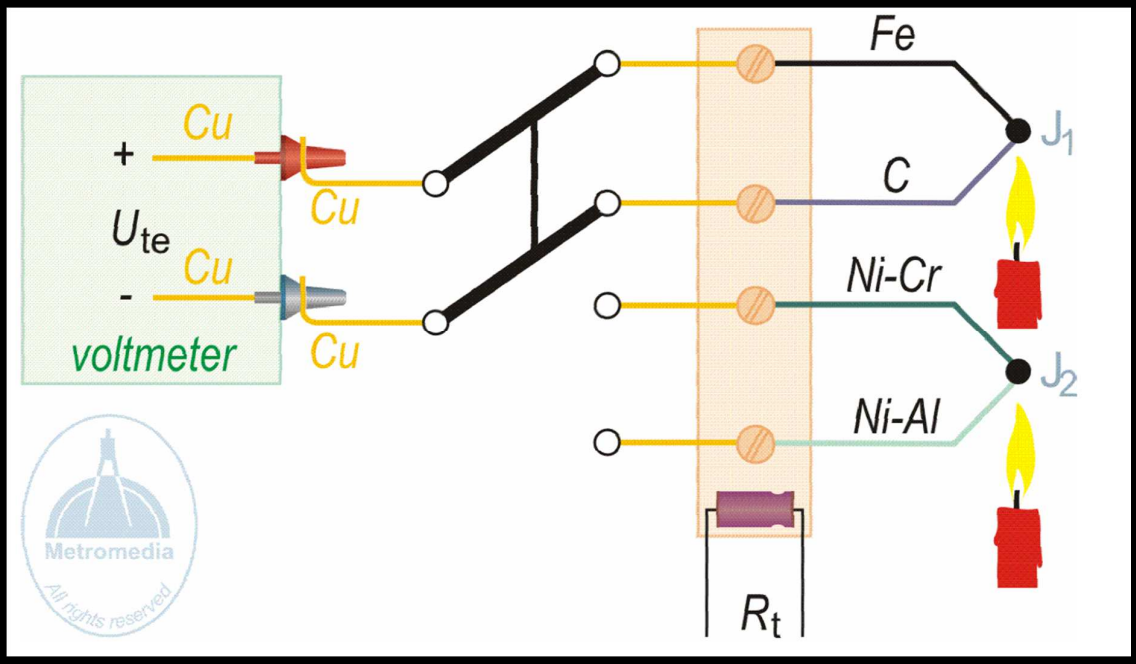
Pri pripájaní termočlánkov platia tri základné pravidlá

1. Pravidlo vloženého vodiča - tretí kov, ktorý sa vloží medzi dva rozdielne kovy, nemá na výstupné termoelektrické napätie žiaden vplyv, pokiaľ majú jeho pripojovacie body rovnakú teplotu,

2. Pravidlo homogenity obvodu - ak sa medzi dva vodiče z toho istého materiálu vloží tretí vodič z takého istého materiálu, nemá na výstupné termoelektrické napätie žiaden vplyv, aj keď majú jeho pripojovacie body rôznu teplotu. Podmienkou je, že vložený vodič musí byť z rovnakého materiálu a musí mať aj rovnakú vnútornú štruktúru ako vodiče, medzi ktoré sa vkladá. Pri dlhodobom používaní totiž môže materiál termočlánku meniť svoju štruktúru a tak vnášať do obvodu parazitné termoelektrické napätie,

3. Pravidlo superpozície - keď sa zmení teplota referenčného bodu, posunie sa o rovnakú hodnotu celá krivka závislosti termoelektrického napätia od teploty.

Pripojenie viacerých termočlánkov k jednej kompenzačnej krabici



Seebeckov koeficient

Všeobecné vyjadrenie teplotnej závislosti Seebeckovho napätia má tvar

$$U_{ab} = \beta_1 (T_1 - T_2) + \frac{1}{2}\beta_2 (T_1 - T_2)^2 + \ldots$$

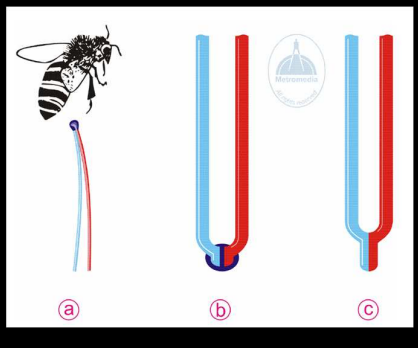
Znamená to, že termočlánok je nelineárny snímač teploty. Jeho citlivosť sa získa derivovaním Seebeckovho napätia podľa teploty T_1:

$$\frac{dU_{ab}}{dt} = \beta_1 + \beta_2 (T_1 - T_2) + \ldots = \alpha_{ab}$$

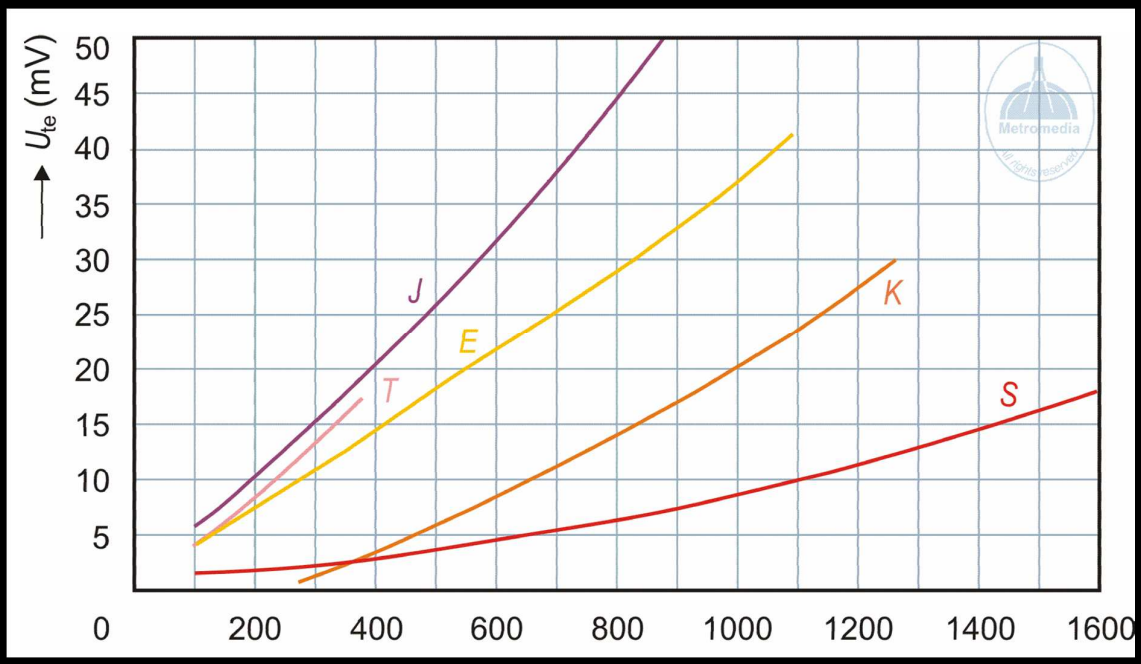
Tento parameter sa nazýva Seebeckov koeficient a predstavuje mieru citlivosti termočlánku. Jeho hodnota závisí od materiálov a b, takisto aj od teploty. Seebeckov koeficient sa vždy dá zapísať ako rozdiel medzi dvoma ostatnými koeficientmi $\alpha_{ab} = \alpha_{ar} - \alpha_{br}$ pričom α_{ar} a α_{br} sú Seebeckove koeficienty dvojice materiálov pričom r je referenčný materiál olovo.

Požiadavky na materiály termočlánkov

- Materiály termočlánkov by mali mať
  - vysoký Seebeckov koeficient (aby sa dosiahla vysoká citlivosť),
  - nízky teplotný koeficient (na zaistenie vysokej lineárnosti) a
  - musia byť v čase stabilné (na dosiahnutie dobrej dlhodobej stability snímača).
- Termočlánky pokrývajú veľký teplotný rozsah od takmer 0 K po približne 2900 K (samozrejme nie jediným zariadením).
- Konštrukcia meracieho spoja termočlánku:
  a) ilustratívny rozmer,
  b) spájkovaný spoj,
  c) zváraný spoj



Statické charakteristiky hlavných typov termočlánkov



Vlastnosti termočlánkov

	Kombinácia zliatin		Tepl. rozsah (°C)[2]		U_{te} (mV)[4]	Dovolená chyba[5]		Prostredie, v ktorom môže termočl. pracovať, poznámky
	vodič +	vodič -	termočl.	kom. v.[3]		štandart.	špeciál.	
J	Fe (železo)	Cu-Ni (konštantán)	0 až 750	0 až 200	0 až 42,283	2,2 °C al. 0,75%	1,1 °C al. 0,4%	Redukčné, vákuum, inertné. Nedopor. pre nízke teploty
K	Ni-Cr (nikel-chróm)	Ni-Al (nikel-hliník)	-200 až 1250	0 až 200	-5,973 až 50,633	a)2,2 °C al. 0,75% b)2,2 °C al. 2,0%	1,1 °C al. 0,4%	Čisté oxidačné a inertné. Obmedzené použitie vo vákuu a redukčnom.
T	Cu (meď)	Cu-Ni (konštantán)	-200 až 350	-60 až 100	-5,602 až 17,816	a)1,0 °C al. 0,75% b)1,0 °C al. 1,5%	0,5 °C al. 0,4%	Stredne oxid., redukčné, vákuum alebo inertné. Dobré použitie vo vlhkom prost. Nízke teploty a kryogenika.
E	Ni-Cr (nikel-chróm)	Cu-Ni (konštantán)	-200 až 900	0 až 200	-8,824 až 68,783	a)1,7 °C al. 0,5% b)1,7 °C al. 1,0%	1,0°C al. 0,4%	Oxidačné alebo inertné. Obmedz. použitie vo vákuu alebo v redukčnom prost. Najv. prírastok U_{te} na 1 °C.
N[1]	Ni-Cr-Si (nicrosil)	Ni-Si-Mg (nisil)	-270 až 1300	0 až 200	-4,345 až 47,502	a)2,2°C al. 0,75% b)2,2°C al. 2,0%	1,1 °C al. 0,4%	Alternatíva k typu K. Stabilnejší pri vysokých teplotách.
R	Pt-13%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 16,741	1,5 °C al. 0,25%	0,6 °C al. 0,1%	Oxidačné al. inertné. Nevkladať do kovových ochr. obalov. Chrániť pred kontamináciou.
S	Pt-10%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 14,973	1,5°C al. 0,25%	0,6 °C al. 0,1%	Oxidačné al. inertné. Nevkladať do kovových ochr. obalov. Chrániť pred kontamináciou.
B	Pt-30%Řh (platina-rhódium)	Pt-6%Rh (platina-rhódium)	0 až 1700	0 až 100	0 až 12,426	0,5% nad 800 °C	neudáva sa	Oxidačné al. inertné. Nevkladať do kovových ochr. obalov. Chrániť pred kontamináciou.
G[1]	W (volfrám)	W-26%Re (volfrám-rhénium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 38,564	4,5 °C do 425 °C 1,0% do 2320 °C	neudáva sa	Vákuum, inertné, hydrogen. Nepraktické pod 750 °C. Chrániť pred skrehnutím. Nie pre oxidačné prostredie.
C[1]	W-5%Re (volfrám-rhénium)	W-265Re (volfrám-rhénium)	0 až 2320	0 až 870	0 až 37,066	4,5 °C do 425 °C 1,0% do 2320 °C	neudáva sa	Vákuum, inertné, hydrogen. Nepraktické pod 750 °C. Chrániť pred skrehnutím. Nie pre oxidačné prostredie.
D[1]	W-3%Re (volfrám-rhénium)	W-25%Re (volfrám-rhénium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 39,506	4,5 °C do 425 °C 1,0% do 2320 °C	neudáva sa	Vákuum, inertné, hydrogen. Nepraktické pod 750 °C. Chrániť pred skrehnutím. Nie pre oxidačné prostredie.

Normatívne druhy termočlánkov, meracie rozsahu, označenia

Typ	Materiál	Izolácia žíl	Izolácia plášťa	Min. tepl.	Max. tepl.	Min. termo-elektr. sila	Max. termo-elektr. sila
J	Železo (Fe)	Čierna	Čierna	0 °C	750 °C	0 mV	42,281 mV
	Konštantán (Cu-Ni)	Biela					
T	Meď (Cu)	Hnedá	Hnedá	-250 °C	350 °C	-6,18 mV	17,819 mV
	Konštantán(Cu-Ni)	Biela					
K	Chrómnikel (Ni-Cr)	Zelená	Zelená	-200 °C	1250 °C	-5,891 mV	50,644 mV
	Alumel(Ni-Al)	Biela					
E	Chrómnikel(Ni-Cr)	Fialová	Fialová	-200 °C	900 °C	-8,82 5mV	68,787 mV
	Konštantán (Cu-Ni)	Biela					
N	Nikrosil(Ni-Cr-Si)	Rúžová	Rúžová	-260 °C	1300 °C	-4,336 mV	47,513 mV
	NiSi (Ni-Si)	Biela					
S	Platina-13% Ródium	Oranžová	Oranžová	-50 °C	1768 °C	-0,236 mV	18,693 mV
	Platina (Pt)	Biela					
B	Platina-30% Ródium	Šedá	Šedá	0 °C	1820 °C	0 mV	13,82 mV
	Platina-6% Ródium	Biela					

Typy termočlánkov

Fe - konšt. (typ J) – termočlánok železo - konštantán je veľmi rozšíreným termočlánkom pre meranie v oblasti nízkych a stredných teplôt. Kladná vetva je z čistého železa a záporná z konštantánu (zliatiny Cu - Ni). Spoľahlivo pracuje do teploty 600 °C. Nad touto teplotou dochádza k oxidácii kladnej aj zápornej vetvy. Používajú sa do max. teploty 900 °C. Kvôli oxidácii a stenčovaniu priemeru sa pre vyššie teploty volia hrubšie drôty (pre teploty okolo 700 °C sa volí hrúbka 2 mm).. Vlhkosť urýchľuje oxidáciu. Oxidačné alebo redukčné vlastnosti meraného prostredia nemajú vplyv na presnosť merania. Citlivosť 58 μV/°C.

Cu - konšt. (typ T) – termočlánok meď - konštantán pre použitie do teplôt s hornou hranicou 300 °C. Prednosťou je odolnosť proti hrdzaveniu. Meď tvorí kladnú vetvu, konštantán zápornú. Nad 300 °C dochádza k oxidácii medi. Rovnako ako predchádzajúci typ je vhodný pre meranie v oblasti nízkych teplôt, až okolo –200 °C.

Typy termočlánkov

NiCr - NiAl (typ K) – termočlánok nikelchróm - nikel, tiež často nazývaný „chromel - alumel“. Je použiteľný pre teploty do 1000 °C. Od teploty 500 °C je niklová vetva náchylná ku korózii oxidmi síry. Škodlivý vplyv na životnosť termočlánku má redukčná atmosféra. Na potlačenie týchto nepriaznivých chemických vplyvov sa leguje niklová vetva hliníkom, kremíkom a mangánom. Citlivosť 42 μV/°C.

NiCr - konšt. (typ E) – termočlánok nikelchróm - konštantán, tiež nazývaný „chromel - kopel“. Tento termočlánok dáva vyššie termoelektrické napätie ako predchádzajúci typ. Použiteľnosť do 700 °C. Odolnosť obdobná ako typu K. Citlivosť 87 μV/°C.

Typy termočlánkov

PtRh - Pt – skupina termočlánkov z ušľachtilých a drahých kovov sa používajú prevažne pre merania vyšších teplôt a tam, kde sú vplyvy okolia nepriaznivé. Bez problémov pracujú do teplôt 1300 °C a pri vyhovujúcej inštalácii trvalo znesú teploty do 1600 °C, krátkodobo aj vyššie. Termočlánky sa vyrábajú s rôznym obsahom rhodia; napr. PtRh10 - Pt (typ S) obsahuje 10 % Rh. Podobne PtRh13 - Pt (typ R), PtRh20 - PtRh5, PtRh30 - PtRh6 (typ B), kde je rhodium aj v druhej vetve. Tieto legované drôty sa vyznačujú vyššími prevádzkovými teplotami a vyššou odolnosťou proti škodlivým vplyvom až do teplôt okolo 1800 °C. Termočlánok PtRh10 - Pt je stále najpoužívanejším termočlánkom pri meraní vyšších teplôt v hutníckych prevádzkach.

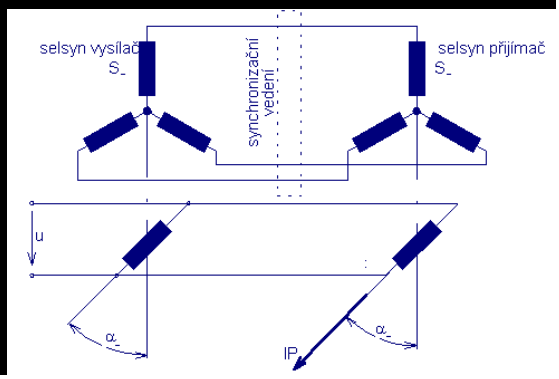
Okrem uvedených normalizovaných typov existujú ešte ďalšie typy pre vysoké teploty. **IrRh40 - Ir** je použiteľný do teplôt okolo 2000 °C, **W - Ir** do teplôt okolo 2200 °C, **W - WRe** pre teploty do 2500 °C. Tieto termočlánky sa však v priemyselnom meradle neuplatnili, pretože vyžadujú pre svoju funkciu špeciálne upravenú atmosféru. Používajú sa však bežne vo vedeckovýskumnej oblasti žiaruvzdorných materiálov.

Meranie polohy

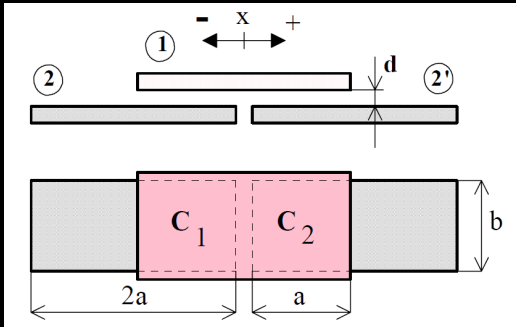
- Snímače polohy sa v JEZ využívajú na indikáciu polohy riadiacich tyčí a indikáciu stavu ventilov (otvorené/zatvorené).
- Základné typy snímačov polohy:
  - Synchrónne snímače
  - Limitné, koncové spínače (ON/OFF)
  - Potenciometre
  - Diferenciálne transformátory (diferenciálny indukčný prevodník)

Synchrónne snímače polohy - selsyny

- Jedná se v podstatě o střídavý indukční stroj skládající se ze **statoru se souměrným třífázovým vinutím** a **jednofázového rotoru**, který je napájen střídavým napětím. Pro vyhodnocení úhlové odchylky se používá zapojení na obr. Selsyn S_1 slouží jako snímač polohy, selsyn S_2 jako indikátor polohy.
- Statory selsynu S_1 a S_2 jsou vzájemně propojeny, stejně jako rotory. Jsou-li tedy rotory vysílače a přijímače natočeny souhlasně , neprotéká synchronizačním vedením žádný proud.
- Pootočí-li se rotorem selsynu S_1, jsou napětí indukované ve vinutí obou statorů různá a začne procházet proud. Rotor selsynu S_2 sleduje rotor selsynu S_1 s chybou, která je dána zatěžovacím momentem hřídele selsynu S_2, pasivními odpory a rychlostí změn úhlu.



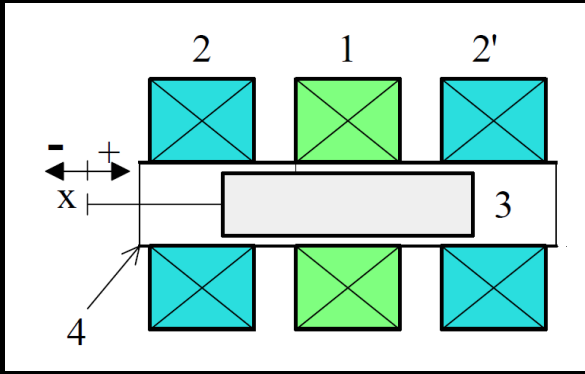
Kapacitný snímač
indukčný diferenciálny snímač



Kapacitný snímač

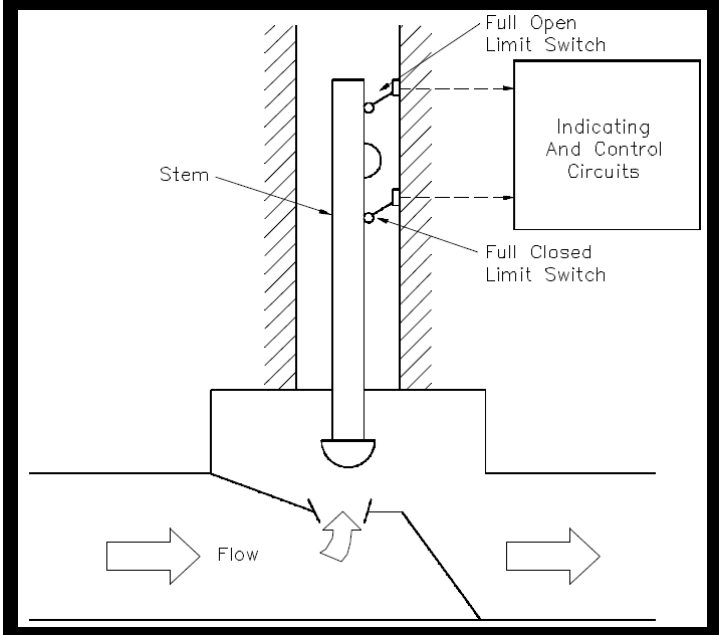
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

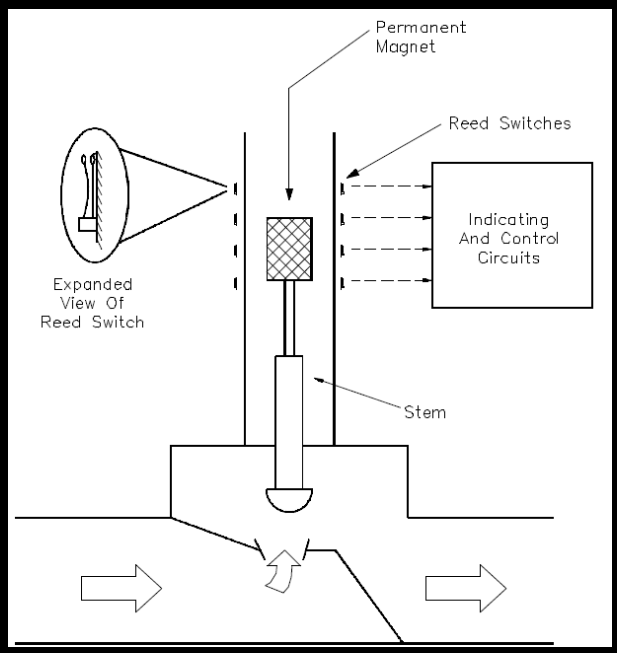
ε - permitivita vákua resp. relatívna
S – účinná plocha
d – vzdialenosť elektród



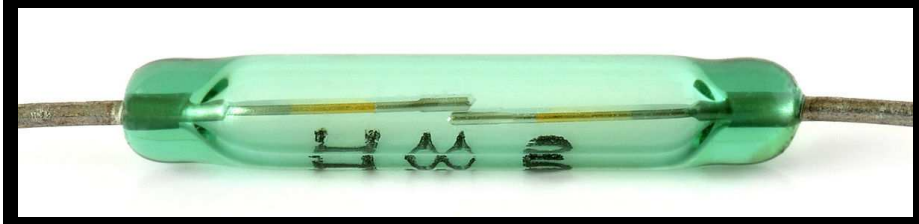
Indukčný diferenciálny snímač
1- primárne vinutie 2- sekundárne vinutie
2`- sekundárne vinutie 4 - mechanická kostra
3 - pohyblivé jadro (ferit)

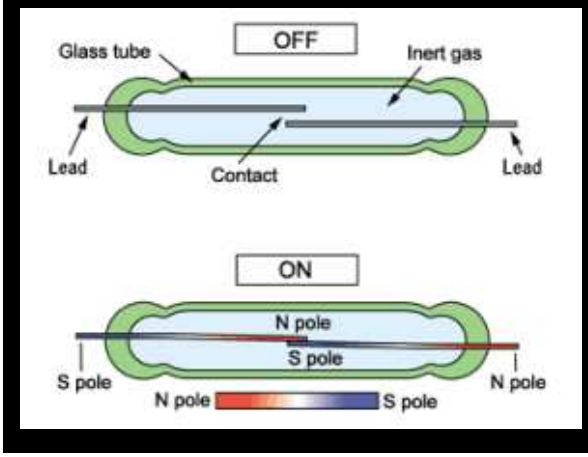
Koncové snímače polohy
Magnetické snímače polohy

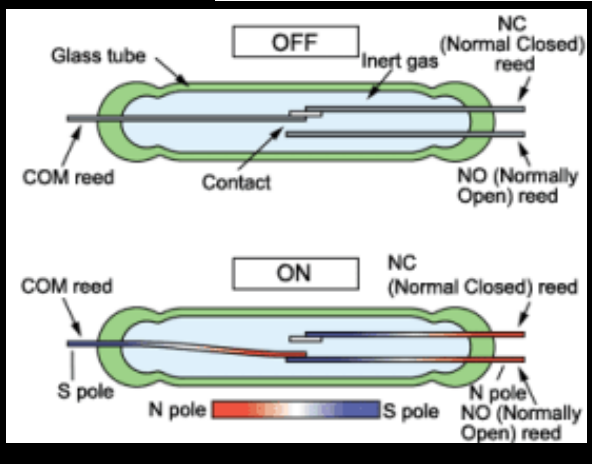




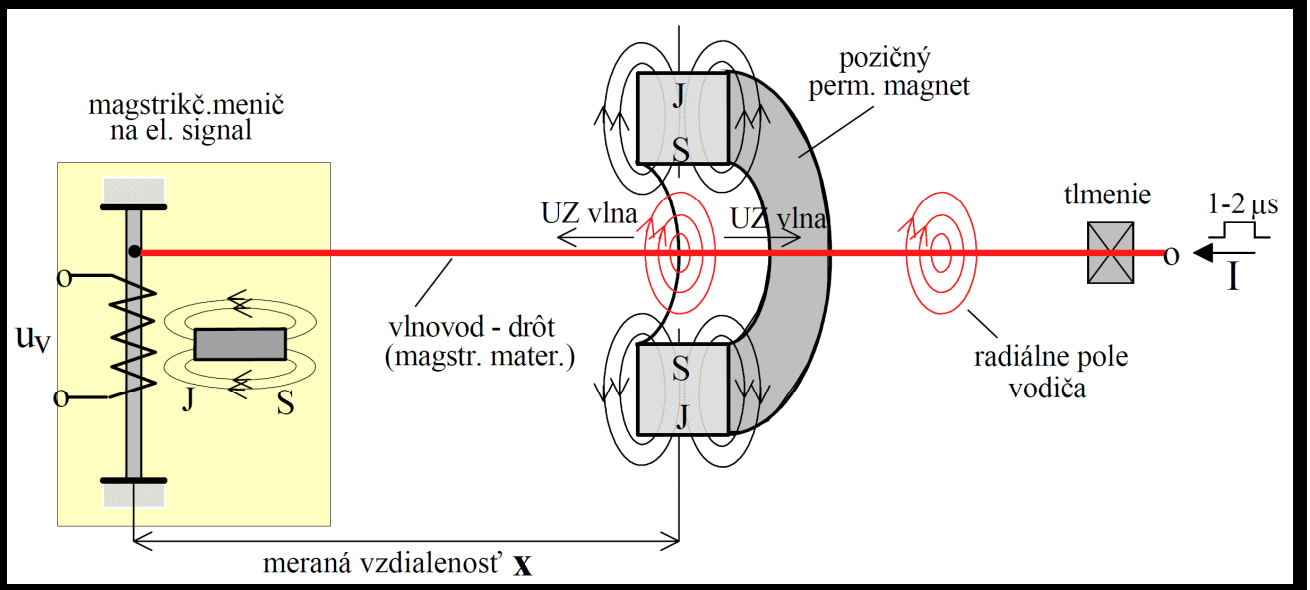
Magnetický spínač
Reed switch (jazýčkové relé)







Magnetostrikčný snímač polohy



využíva meranie dobu šírenia UZ vlny v magnetostrikčnom materiáli

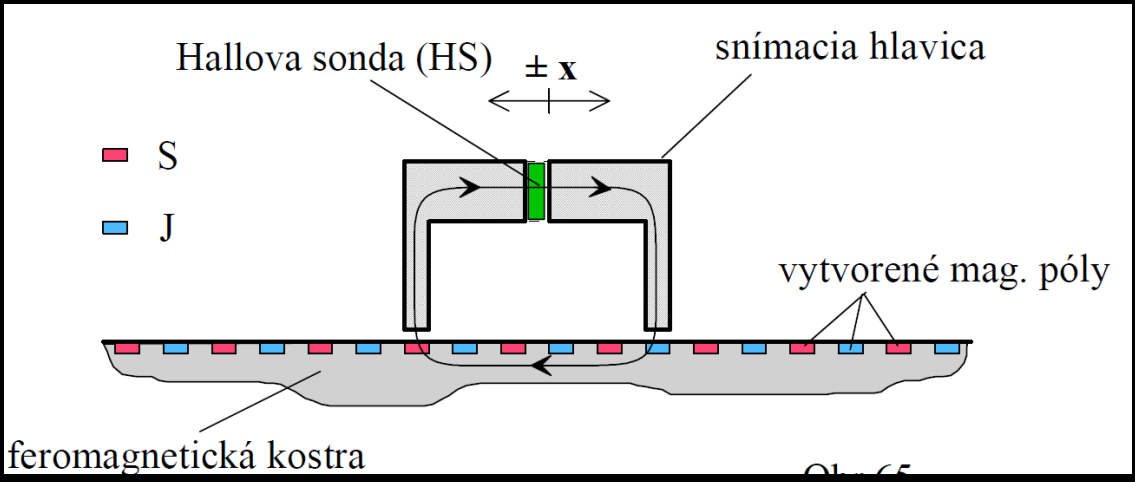
MAGNETOSTRIKČNÉ snímače polohy

Základními částmi magnetostrikčního senzoru polohy jsou **feromagnetický** měřicí prvek tvaru **tyče** označovaný jako vlnovod (vede torzní ultrazvukovou vlnu k měniči impulsu) a **posuvný permanentní magnet** spjatý se sledovaným objektem, který vytváří ve vlnovodu podélné magnetické pole. Mezi posuvným permanentním magnetem (pracovní magnet ve funkci indikátoru polohy sledovaného objektu) a měřicím prvkem (vlnovodem) přitom neexistuje žádné přímé mechanické spojení. Při měření vysílá elektronika senzoru do vlnovodu krátké proudové impulsy, které vytvářejí proměnné magnetické pole radiálně působící okolo vlnovodu a šířící se s proudovými impulsy podél vlnovodu rychlostí světla. V místě, kde se radiální magnetické pole setká s podélným magnetickým polem pracovního magnetu, dojde podle **Wiedemannova jevu** k mechanické torzní deformaci feromagnetického vlnovodu. Tím vznikne mechanický torzní impuls, který se šíří jako **ultrazvuková vlna** vlnovodem od místa vzniku k oběma jeho koncům. Na volném konci vlnovodu je pohlcen tlumicím obvodem, čímž se vyloučí případné rušivé vlivy na snímání signálu. Na druhém konci vlnovodu (v hlavici snímače) zjišťuje příchod torzní vlny speciální měnič torzních impulsů, který se skládá z magnetostrikčního kovového pásku spojeného s vlnovodem, z indukční snímací cívky a z pevného permanentního magnetu. Torzní vlna způsobí změnu permeability kovového pásku. Ta se projeví časovou změnou magnetického pole pevného magnetu, která ve snímací cívce indukuje elektrický impuls. Protože se torzní vlna šíří vlnovodem konstantní ultrazvukovou **rychlostí**, lze vzdálenost mezi snímací cívkou a polohou pracovního magnetu snímače určit z doby, která uplyne mezi vysláním budicího proudového impulsu a vznikem elektrického impulsu ve snímací cívce měniče torzních impulsů (**princip měření doby průletu – time-of-flight**).

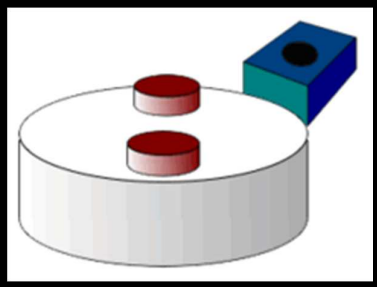
Princíp činnosti magnetostrikčného snímača

Do **feromagnetického magnetostrikčného vodiča** vnútri snímača je privedený krátky prúdový impulz, ktorý v celej dĺžke vodiča vybudí magnetické pole. V mieste merania polohy je priložený blízko povrchu snímača permanentný magnet. Interakcia magnetického poľa permanentného magnetu a magnetického poľa vodiča (Wiedemannov efekt) vybudí vo feromagnetickom vodiči torzný magnetostrikčný impulz, ktorý sa šíri **ako mechanický (ultrazvukový) vzruch** rýchlosťou zvuku od miesta vzniku k obom koncom vodiča. Na vzdialenom konci feromagnetického vodiča je impulz pohltený tlmiacim prvkom, aby sa zabránilo jeho odrazeniu a rušivému vplyvu na meraní. Na začiatku feromagnetického vodiča sa druhá časť mechanického vzruchu zachytí snímacím zariadením a z časového oneskorenia od vyslania budiaceho prúdového impulzu a známej rýchlosti šírenia mechanického vzruchu v danom feromagnetickom materiáli sa dá určiť poloha miesta vzniku mechanického vzruchu a teda i poloha permanentného magnetu voči začiatku snímača. Snímacie zariadenie, na začiatku snímača, môžu byť realizované rovnako na magnetostrikčnom princípe pomocou tzv. Villariho efektu. Začiatok feromagnetického vodiča je privarený k feromagnetickému pásku, ktorý je v okamžiku príchodu mechanického vzruchu podrobený mechanickému namáhaniu. Tím dôjde k zmene jeho permeability a i k zmene magnetického toku, ktorého zdrojom je permanentný magnet. V cievke okolo feromagnetického pásku sa tým naindukuje napätie, ktoré je ďalej spracované elektronikou senzoru.

Magnetické impulzné snímanie polohy

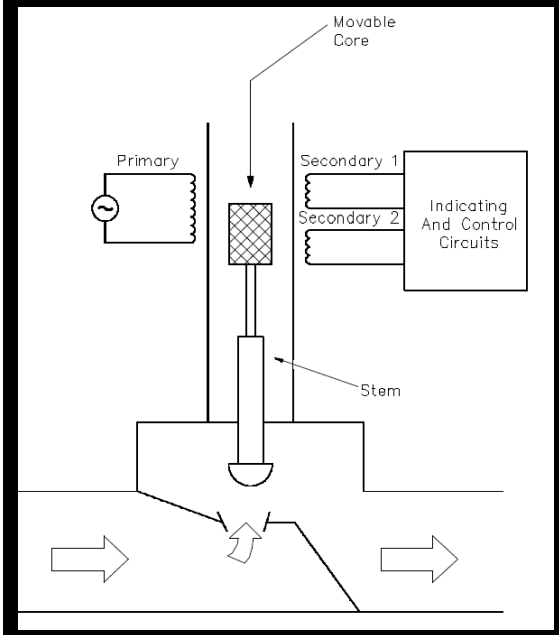


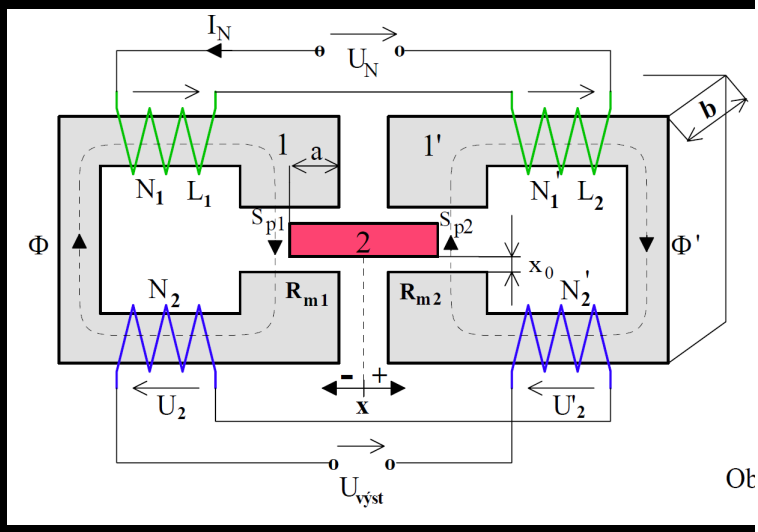
Hallova sonda sa používa na meranie magnetického poľa. Je vytvorená úzkou polovodičovou doštičkou, cez ktorú prechádza prúd. Pri vložení HS do magnetického poľa cez ňu prechádza indukčný tok pričom vzniká napätie. Hallovo napätie sa dá vypočítať pomocou vzorca $U_h = k*I*B$, kde k je konštanta (zahrnuje typ materiálu a hrúbku, *I* je jednosmerný prúd a B je magnetická indukcia spôsobená magnetickým poľom.



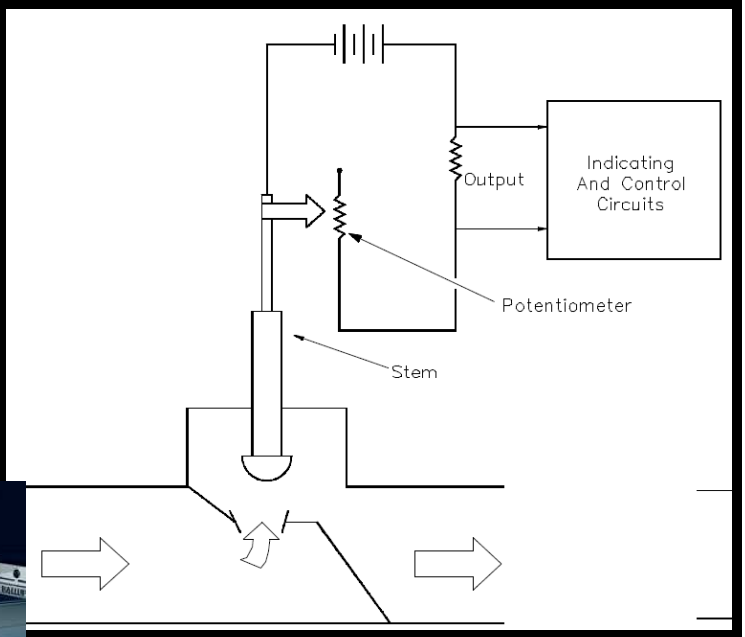
Transformátorové snímače

LVDT (LVDT - Linear Variable Differential Transformer)





Lineárny snímač s potenciometrom



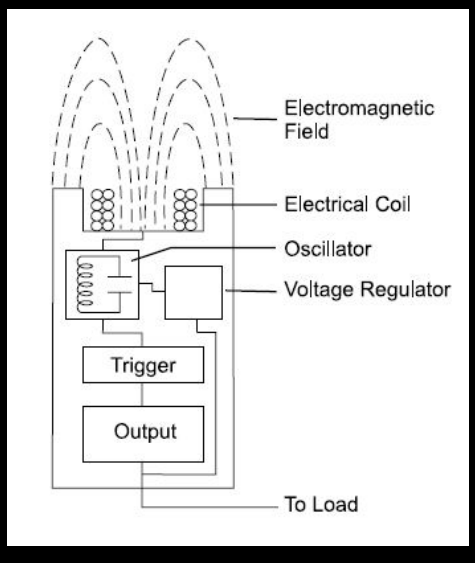
Potenciometrické snímače polohy

- Tyto snímače pracují v principu jako lineární proměnný odpor, jehož jezdec se pohybuje po odporové dráze tak, že výstupní napětí ,na něm je závislé na jeho poloze. Odporová dráha je vytvořena buď pomocí drátem vinutého elementu nebo, dnes stále častěji, je vyráběna z jakostního vodivého plastu (Conductive Plastic).
- Využitím plastového elementu je dosahováno nejen téměř nekonečného rozlišení (v praxi asi 0,01 mm), ale lze měřit i při podstatně vyšších rychlostech posunu (až do 10m/s).

Induktívne snímače koncovej polohy

- Sú určené pre bezkontaktnú indikáciu kovových predmetov, nachádzajúcich sa v určitej vzdialenosti od čela snímača.
- Táto vlastnosť ich predurčuje na použitie v regulačných, automatizačných a meracích aplikáciach.

https://www.micro-epsilon.sk/service/mediathek/



Induktívne snímače polohy

(LVDT - Linear Variable Differential Transformer)

- Induktivní snímače dráhy (LVDT) se vyznačují mimo jiné i tím, že jsou velmi robustní, a proto mohou být nasazeny v zařízeních, u kterých dochází k vysokému stupni vibrací a zrychlení. Také oscilující pohyby s velmi malými zdvihy a měření v rozsahu pod 1 mm tyto snímače dobře zvládnou. Hlavním důvodem je především to, že měření dráhy probíhá bezdotykově; jádro – kovová posuvná tyč se pohybuje v těle cívek, které jsou umístěny v pouzdře, ale nedotýká se jich. Těmito cívkami vyráběné magnetické pole se rozlaďuje a právě toto rozladění je měřítkem pro vyhodnocení posunu, měřené délky.
- **LVDT (Linear Variable Differential Transformer)** se napájí střídavým napětím cca 2-10 V o kmitočtu mezi 0,5 – 5 kHz, na výstupu je pak střídavé napětí příslušné amplitudy, které je určeno k dalšímu elektronickému zpracování.

Kapacitné snímače

Kapacitné snímače sú určené pre bezkontaktnú indikáciu kovových aj nekovových predmetov, ktorých permitivita je dostatočne veľká. Vyhodnocujú zmenu kapacity vyvolanú predmetom, nachádzajúcim sa pred aktívnou plochou snímača. Táto vlastnosť ich predurčuje na použitie v regulačných, automatizačných a meracích aplikáciach.

Je možné ich použiť na snímanie tekutín, práškových materiálov, skla,plastov, dreva a pod.

Vhodnou voľbou materiálov a citlivosti môžu tieto snímače snímať aj predmety za nekovovými materiálmi. Táto možnosť sa využíva predovšetkým na snímanie hladín kvapalných a sypkých materiálov s nádržiach.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

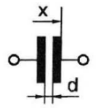
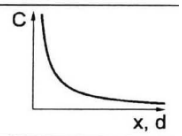
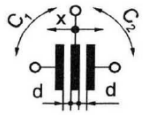
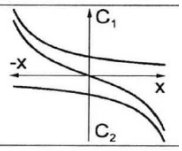
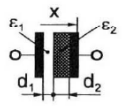
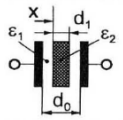
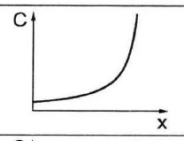
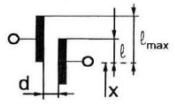
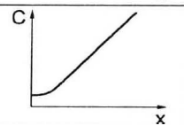
C je kapacita kondenzátora
ε_0 je permitivita vákua
ε_r je merná permitivita
S je účinná plocha elektród
d je vzdialenosť elektród

Magnetické snímače

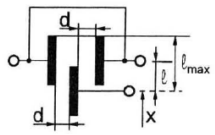
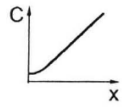
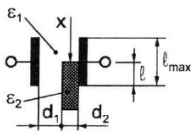
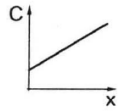
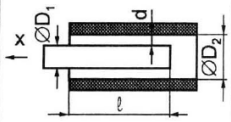
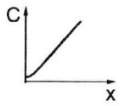
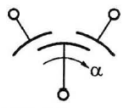
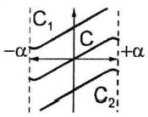
- Magnetické snímače reagujú na priblíženie k magnetickému pólu. Umožňujú bezkontaktnú detekciu magnetických častí, alebo predmetov nesúcich magnetický prvok (magnet - ferit, neodym) na vzdialenosť niekoľkodesiatok mm. Nepotrebujú napájacie napätie a na pripojenie k záťaži stačí dvojvodičové vedenie.

  Použitie v rôznych oblastiach, kde rozhoduje nízka cena, jednoduchosť a vysoká spoľahlivosť, napríklad **dverové spínače**, **výťahová technika, snímanie otáčok feromagnetických ozubených kolies**.

Typy a princípy činnosti kapacitných snímačov

Typ snímače	schéma	funkční vztahy	charakteristika
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)}$; $\frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d}\left(1-\frac{\Delta d}{d}\right)$	
deskový diferenční s proměnnou mezerou		$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d(x)}$; $C_2 = \varepsilon \frac{S}{d(x)}$; $\frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d}\left[1+2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$; $\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1+d_2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{N} - \frac{\Delta d_1}{d_1+d_2}}$; $N = \frac{\varepsilon_2 (d_1+d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$	
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_0 - d_1(x)\left(1-\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)}$	
deskový s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}$; $\frac{\Delta C}{\Delta \ell} \doteq -\frac{C_{max}}{\ell_{max}}\left(1+\frac{\Delta d}{d}\right)$	

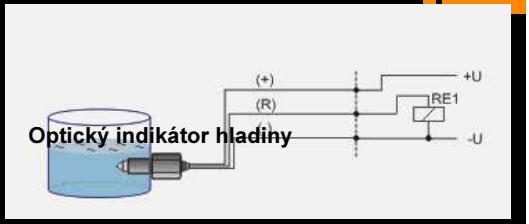
Typy a princípy činnosti kapacitných snímačov

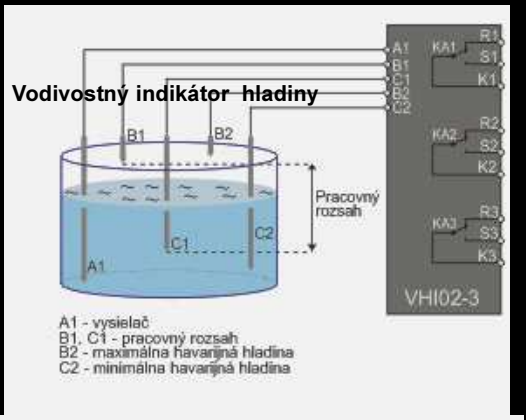
Typ snímače	schema	funkční vztahy	charakteristika
deskový s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}$; $\frac{\Delta C}{\Delta \ell} \doteq -\frac{C_{max}}{\ell_{max}}\left[1+\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí dielektrika		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1+d_2}\left[1+\frac{\ell(x)}{\ell_{max}} \cdot \frac{1-\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2}+\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}\right]$	
válcový s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{2\pi \cdot \ell(x)}{\ln \frac{D_1}{D_2}}$; $\frac{\Delta C}{\Delta \ell} \doteq -\frac{C_{max}}{\ell_{max}}\left[1-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
diferenční s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}$	

Indikátory hladiny kvapalín

Indikátory hladiny kvapalín poskytujú informáciu o výške hladiny snímaného média v automatizačnej technike a to pre reguláciu úrovne hladín alebo ich indikáciu pre riadiace systémy.
Sú použité dva princípy merania výšky hladiny kvapalín: **vodivostný** a **optický**.

Vodivostný princíp je vhodný pre meranie elektricky vodivých kvapalín, bez ohľadu na ich viskozitu, priehľadnosť a priesvitnosť.
Hladinomery na optickom princípe sú vhodné pre kvapaliny aspoň čiastočne priesvitné, pre suspenzie, alkohol a jeho roztoky s vodou, naftu a pod.

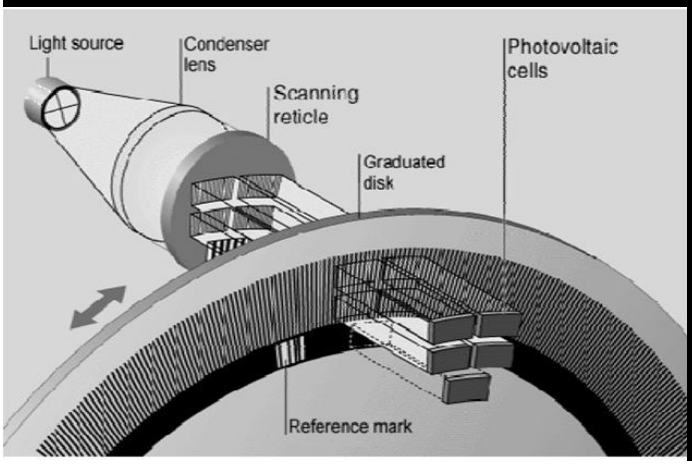


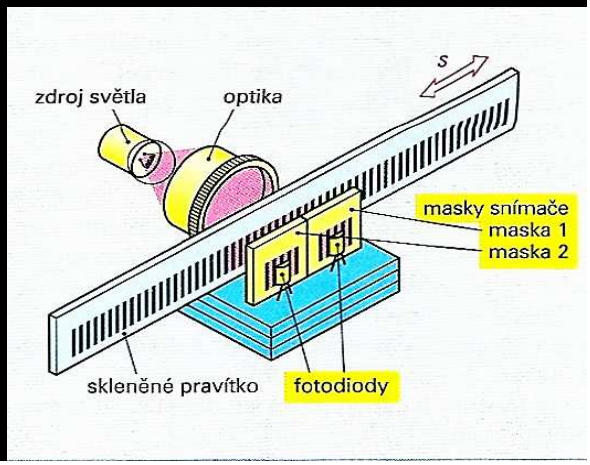


SONDY PRE VODIVOSTNÉ A OPTICKÉ INDIKÁTORY HLADINY

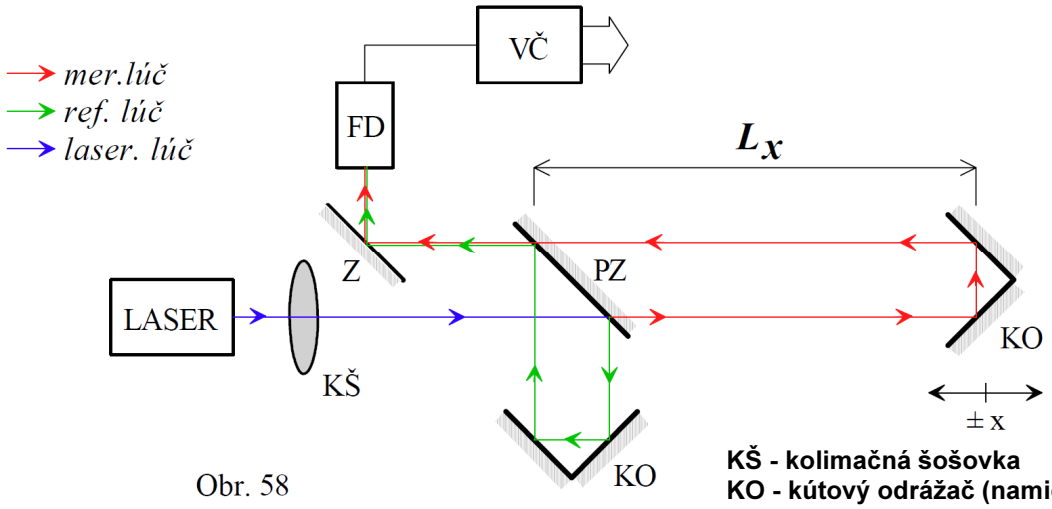
Optoelektronické snímače polohy

- Měřicí princip, zjednodušeně řečeno, je následující. Zdroj světla (vysílač) a světlocitlivý prvek (přijímač) se relativně pohybuji vůči skleněnému měřítku, na kterém jsou vyznačeny dílky o určité hustotě (stupnice). Tyto dílky mají funkci clonky a přerušují světelný paprsek vysílače dopadající na aktivní plochu přijímače. Počet těchto přerušení (počet dílků) je pak přímo úměrný naměřené dráze. Vestavěná elektronika převádí každý světelný impuls na impuls elektrický, ten je zesílen a veden na výstup.





Optický snímač
Laserové (interferenčné) meradlo



Obr. 58

KŠ - kolimačná šošovka
KO - kútový odrážač (namiesto zrkadla
L_x - meraná vzdialenosť
Z, PZ - zrkadlo, polopriepustné zrkadlo
FD - fotodetektor
VČ - vratný čítač

- interferencia merného a ref. lúča
- rozliš. schopnosť až λ/8 (He - Ne → 80 nm)