

## 1. Snímače tlaku - úvod

Tlak je odvodená veličina, pri ktorej meraní môžeme pracovať s dvomi definíciami:

1. tlak  $p$  definovaný ako sila  $F$  pôsobiaca kolmo na plochu  $S$

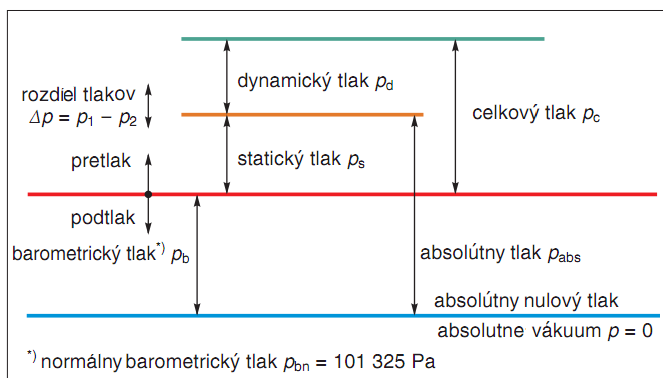
$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

2. tlak  $p$  definovaný prostredníctvom hydrostatického stĺpca tekutiny s hustotou  $\rho$  a výške  $h$  ( $g$  je zemské gravitačné zrýchlenie)

$$p = h\rho g \quad (2)$$

Hlavnou jednotkou tlaku v sústave SI je pascal (Pa). Je to tlak, ktorý vyvolá sila jedného newtona na rovnomerne rozloženej ploche  $1 \text{ m}^2$  kolmo ku smeru tejto sily. Vzhľadom k tomu, že pascal je jednotka veľmi malá, používajú sa v praxi násobky hPa, kPa, MPa. Okrem jednotky Pa je povolené používať aj jednotku bar ( $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$ )

Hodnota tlaku sa obvykle udáva oproti dvom základným vzťahným hodnotám a to k absolútnemu nulovému tlaku alebo k barometrickému tlaku (tlak vzduchu v danom mieste pri podmienkach merania), alebo sa meria rozdiel (diferencia) tlakov, z ktorých žiadny sa



Obr. 1 Pojmy z oblasti merania tlaku

nezhoduje s barometrickým tlakom (Obr. 1). *Absolútny tlak* je tlak meraný od absolútnej tlakovej nuly, *pretlak* a *podtlak* sa meria od okamžitého barometrického tlaku  $p_b$  (tlaku v okolitej zemskej atmosfére). Pri prúdiacich kvapalinách a plynch prístupuje ku *statickému tlaku*  $p_s$  ešte *kinetický tlak*  $p_k$ , prípadne *dynamický tlak*  $p_d$ . Kinetický tlak je funkcia rýchlosti prúdenia  $v$  a hustoty prúdiacej tekutiny  $\rho$ ; dynamický tlak zahŕňa

vplyv stlačiteľnosti tekutiny. Súčiniteľ stlačiteľnosti  $s$  je pre nestlačiteľné tekutiny (kvapaliny) rovný 1 a potom  $p_d = p_k$ , lebo platí

$$p_k = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3a)$$

$$p_d = p_k s \quad (3b)$$

Pre celkový tlak  $p_c$  v prúdiacej kvapaline platí  $p_c = p_s + p_d$ . Zatiaľ čo statický tlak má charakter skalára, dynamický tlak je vektor s orientáciou totožnou s orientáciou vektora rýchlosti prúdenia.

Prístroje pre meranie tlaku sa všeobecne nazývajú tlakomery. Súčasne sa však označenie *tlakomer* (*manometer*) používa pre prístroj na meranie pretlaku; prístroje pre meranie podtlaku sa označujú ako *podtlakomery* (*vákuometre*) a prístroje pre meranie rozdielu tlakov ako *rozdielové* (*diferenčné*) *tlakomery*. Prístroje určené pre meranie barometrického tlaku sú *barometre* a prístroje, ktoré merajú absolútny tlak sa nazývajú *tlakomery absolútneho tlaku*.

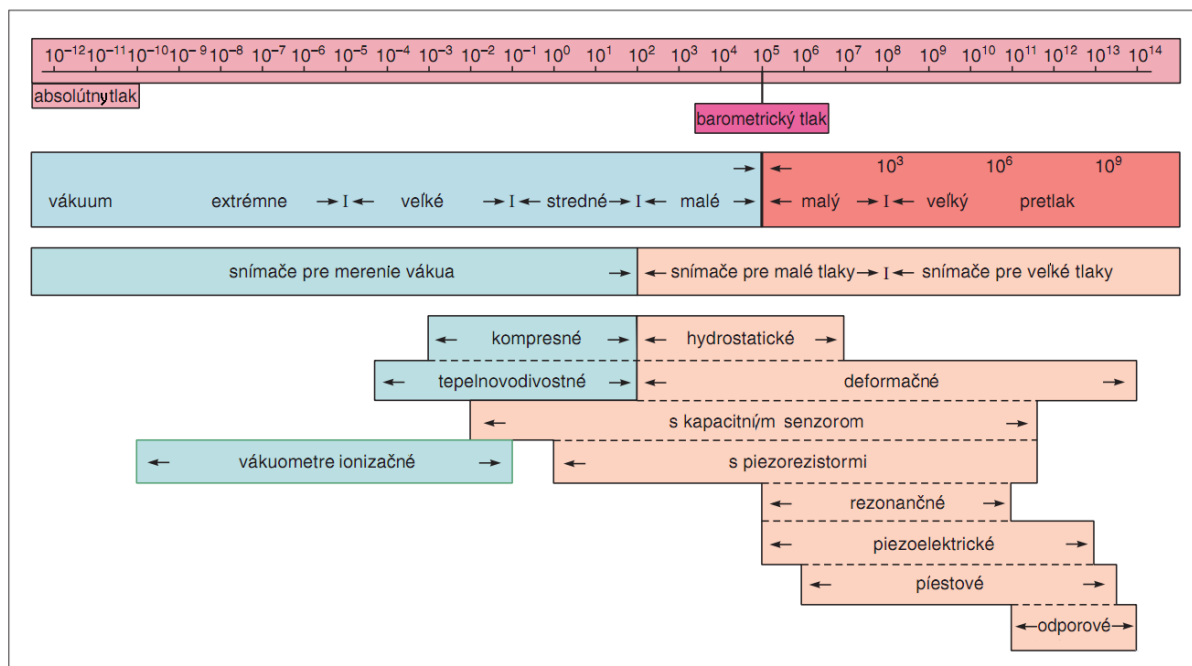
Ďalej sa môžeme stretnúť s termínmi snímač tlaku a prevodník tlaku. Pojmom *snímač tlaku* sa zvyčajne označuje tlakomer, ktorý funguje ako automatizačný prvok, napr. meračí člen v regulačnom obvode. Citlivou časťou snímača, ktorá je v bezprostrednom styku s meraným médiom, je senzor. Snímač teda tvorí určitý konštrukčný celok a senzor je jeho

súčasťou. Senzorom tlaku je napr. membrána, Bourdonova trubica a pod. Pre snímače tlaku s elektrickým výstupom sa používa tiež označenie *elektromechanické tlakomery*.

Označenie *prevodník tlaku* má veľmi podobný význam ako snímač tlaku; ide o elektronické zariadenie určené pre meranie tlaku, ktoré je schopné preniesť informáciu o meranom tlaku prostredníctvom elektrických signálov k ďalším zariadeniam. Ide teda opäť o konštrukčný celok vybavený vhodným senzorom tlaku. Ak je činnosť prevodníka alebo snímača tlaku riadená mikroprocesorom, hovorí sa o *inteligentnom prevodníku* alebo *inteligentnom snímači tlaku*.

Pre meranie tlaku sa využívajú rôzne fyzikálne princípy, ktoré sa líšia podľa charakteru prevodu tlaku na výstupný signál. Rozdelenie technických tlakomerov (snímačov tlaku) do jednotlivých skupín je uvedené v tab. 1 (str. 7) spolu so stručnou charakteristikou princípu merania a možnosťami použitia.

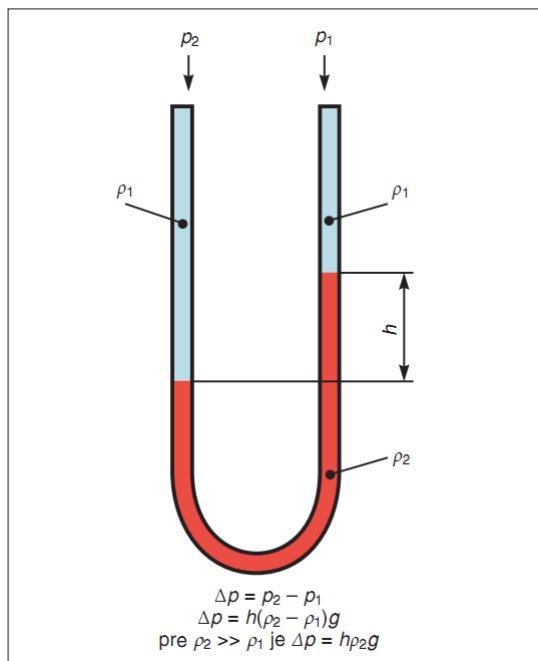
V technickej praxi sa môžeme stretnúť s meraním tlaku v rozmedzí od  $10^{-12}$  až do  $10^{12}$  Pa. Žiadny snímač tlaku nemôže merať tlak v celom tomto rozsahu. Meracie rozsahy jednotlivých typov sa vzájomne prekrývajú, čo je možné využiť pri výbere typu tlakomera vhodného pre danú úlohu (Obr. 2).



Obr. 2 Orientačné rozdelenie tlakomerov podľa meracieho rozsahu

## 2. Hydrostatické tlakomery

Činnosť hydrostatických tlakomerov je založená na účinku hydrostatického tlaku, ktorý vyvodzuje stĺpec kvapaliny o výške  $h$  a hustote  $\rho$  zo vzťahu (2). Mierou tlaku je výška stĺpca kvapaliny  $h$ , a meranie tlaku je tak prevedené na meranie dĺžok. Pretože hustota kvapaliny je funkcia teploty, je aj údaj hydrostatického tlakomera závislý na teplote. Ako tlakomerná kvapalina sa najčastejšie používa ortuť alebo voda, popr. vhodná organická kvapalina (etanol, tetrachlór, a pod.). Dĺžka trubíc býva maximálne 1,5 m; tým je daný aj rozsah merania, tzn. napr. 0,2 MPa pri použití ortuti alebo 15 kPa pre vodu. Presnosť odčítania polohy hladiny kvapaliny je možné zabezpečiť až na 0,05 mm.



Obr. 3 Schéma U-tlakomera

Najčastejšie používaným hydrostatickým tlakomerom je *U-tlakomer*, vytvorený zo sklenenej trubice tvaru U z polovice naplnenej tlakomernou kvapalinou (Obr. 3). Modifikáciou U-tlakomera je *nádobkový tlakomer*, ktorého jedno rameno je rozšírené a poloha hladiny sa odčíta iba v užšom ramene. Väčšiu citlivosť má *mikrometer*, ktorý vznikne sklonením meracej trubice nádobkového tlakomera.

Hydrostatické tlakomery sú väčšinou jednoduché, spoľahlivé a presné prístroje, ktoré sa využívajú pre laboratórne účely. V riadiacich obvodoch sa nepoužívajú, pretože neposkytujú signál prenositeľný na diaľku. Problematické je taktiež použitie ortuti, a to pre jej vysokú cenu a jedovatosť.

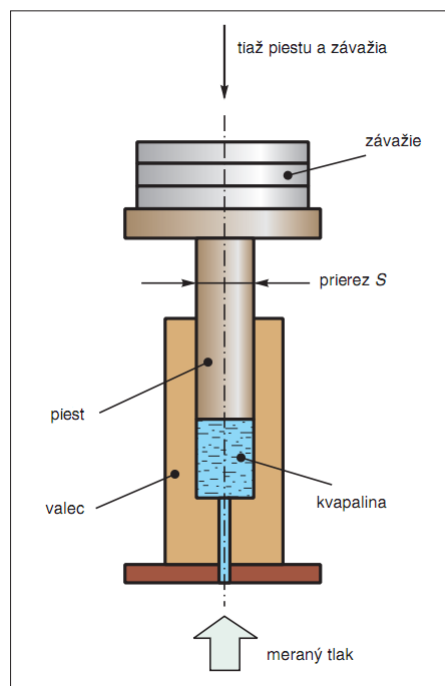
### 3. Tlakomery so silovým účinkom

V tlakomeroch so silovým účinkom sa meranie tlaku prevádza na meranie sily, ktorej účinky sú vyvažované napr. závažím alebo pružinou. Do tejto skupiny tlakomerov patrí piestový a zvonový tlakomer.

Podstatnou súčasťou *piestového tlakomera* je piest presného prierezu umiestený vo valci (Obr. 4). Tlak sa na piest prenáša kvapalinou alebo plynom, ktorým je celý systém tlakomera vyplnený. Sila, ktorá vznikne pôsobením meraného tlaku na piest je kompenzovaná tiažou piesta a závažia. Rovnováhy síl sa dosiahne v okamihu, kedy sa piest nepohybuje v smere osi.

Ak uvažujeme s hmotnosťou piesta  $M_p$ , hmotnosťou závažia  $M_z$ , a čelnou plochou piesta  $S$ , pre meraný tlak  $p$  platí

$$p = \frac{(M_p + M_z)g}{S} \quad (4)$$



Obr. 4 Princíp piestového tlakomera

Pre dosiahnutie kvapalinového trenia medzi piestom a valcom sa musí piest alebo valec otáčať. Pretože kompenzačnú silu spôsobenú závažím možno určiť veľmi presne, využívajú sa piestové tlakomery pre *overovanie a kalibráciu* iných tlakomerov (viď kap. 9), najmä deformačných (Obr. 5). Pri presnom meraní musí byť veľmi presne známa aj hodnota gravitačného zrýchlenia v mieste merania a je treba tiež brať ohľad na pôsobenie vztlaku vo vzduchu.



Obr. 5 Piestový tlakomer Stiko

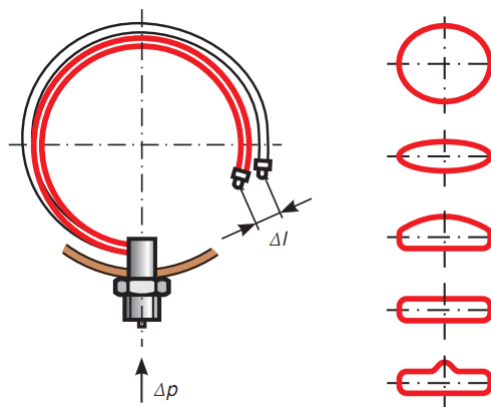
Piestovými tlakomermi môžeme merať tlaky od 0,05 do 2 000 MPa a väčšie. Pri vysokotlakových prístrojoch sa používa pákový prevod medzi piestom a závažím. Pri prevádzkovom piestovom tlakomeri je kompenzačná sila vyvodzovaná pružinou. Výhodou tohto prístroja je, že použitím prídavného závažia môžeme potlačiť ľubovoľnú časť rozsahu.

*Zvonový tlakomer* je nízkotlaková modifikácia piestového tlakomera. Meraný tlak pôsobí na dno zvonu ponoreného do nádoby čiastočne naplnenej kvapalinou. Ak je vnútri zvonu pretlak, zvon sa vynára. Rovnováha sa zaisťuje buď pôsobením tiaže závažia, deformáciou pružiny alebo zmenou vztlaku. Podobne ako piestový tlakomer môže fungovať zvonový tlakomer, v tomto prípade s rozsahom asi do 1 000 Pa.

#### 4. Deformačné tlakomery

Princíp funkcie deformačných tlakomerov je založený na pružnej deformácii, a tým i na zmene geometrického tvaru vhodného tlakomerného prvku vplyvom pôsobenia meraného tlaku. Najčastejšie používanými deformačnými prvkami sú Bourdonova trubica, membrána, škatuľa a vlnovec. Deformačné prvky sa zhotovujú z uhlíkových a niklových ocelí, z mosadzi, z fosforového a berýliového bronzu a ďalších vhodných zliatin.

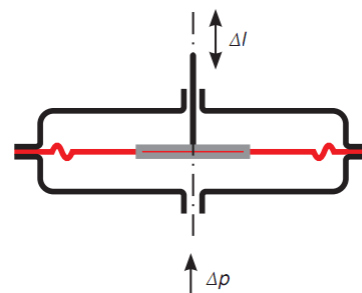
*Trubicové tlakomery* sú najpoužívanejším typom deformačných tlakomerov. Tlakomerným prvkom je Bourdonova trubica (patent francúzskeho vynálezcu E. Bourdona z roku 1849), ktorá je najčastejšie trubica oválneho alebo eliptického prierezu stočená do kruhového oblúka v tvare písmena C alebo U, špirály alebo skrutkovice a pod. Existujú aj ďalšie, zložitejšie tvary prierezu rôzne zvlnené. Trubica je jedným koncom pevne spojená s telesom vybaveným závitom pre pripojenie prívodu tlaku (Obr. 6). Voľný koniec trubice je uzavretý a spojený cez prevodové ústrojenstvo s ukazovateľom na stupnici. Pri pôsobení tlaku sa snaží eliptický prierez zmeniť na kruhový a zakrivenie oblúka, do ktorého je trubica stočená, sa pritom mení. Okrem najčastejšie používaného mechanického ozubeného prevodu sa k prenosu na ukazovateľ používajú aj iné spôsoby, napr. magnetický prevod.



Obr. 6 Bourdonova trubica

Pre malé tlaky je trubica mosadzná a jej profil je plochejší, pre veľké tlaky je oceľová s takmer kruhovým profilom. Meracie rozsahy trubicových tlakomerov bývajú od 0 do 0,5 MPa až 2 GPa. Trubicovými tlakomermi sa dá merať aj podtlak. Tlakomery s vysokou triedou presnosti (0,1 až 1) môžu fungovať aj ako sekundárny etalón tlaku. Prevádzkové prístroje majú triedu presnosti 1,6; meradlá s horšou presnosťou sa používajú ako informatívne. Puzdrá prevádzkových tlakomerov pre ťažké a chemické prevádzky môžu byť naplnené glycerínom, ktorý chráni meraciu trubicu a mechanizmus proti korózii a plní funkciu tlmenia pri chvení.

*Membránové tlakomery* používajú ako tlakomerný prvok kovovú membránu kruhového tvaru zvlnenú sústredenými kruhmi (Obr. 7). Membrána je zovretá medzi dvomi prírubami a z jednej strany je privádzaný meraný tlak. Ten vyvolá priehyb membrány, ktorý sa



Obr. 7 Membrána

**Meranie procesných veličín**

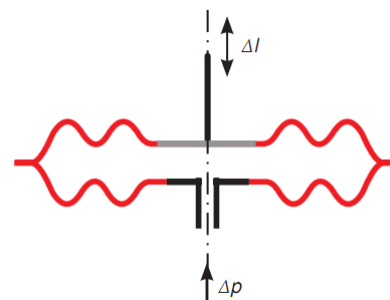
prenáša na ukazovateľ. Závislosť zdvihu na tlaku je približne lineárna. Ich výhodou je väčšia citlivosť než citlivosť trubicových tlakomerov. Ak je tlak privedený na obe strany membrány, môžeme využiť membránové tlakomery aj k meraniu rozdielov tlakov. Proti korózii možno membránu ľahko chrániť povlakom, či fóliou z vhodného materiálu.

Membránové tlakomery sú vhodné predovšetkým pre malé a stredné tlaky do asi 4 MPa. Taktiež je možné ich využiť aj k meraniu tlaku kašovitých látok, pretože merací priestor možno pomerne ľahko vyčistiť. Výhodou membránových tlakomerov sú malé zotrvačné hmoty systému. Také snímače sú vhodné pre meranie aj pomerne rýchlo pulzujúcich tlakov. Membrána snímača je veľmi tenká, má malý priemer a jej deformáciu možno elektricky snímať (napr. kapacitne, indukčnosťne či piezoelektricky).

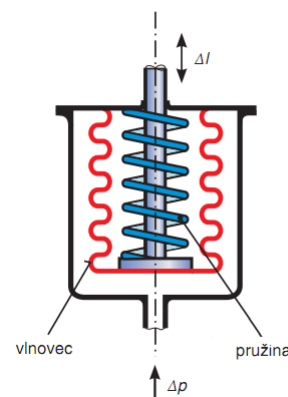
*Škatuľové tlakomery* sa používajú pre meranie malých pretlakov, podtlakov či rozdielov tlakov. Meracím prvkom je škatuľa tvorená dvoma zvlhými membránami s priemerom 50 až 100 mm (Obr. 8). Deformácia sa prenáša pákovým prevodom na ukazovateľ. Horná hranica meracieho rozsahu býva 10 až 1000 Pa. Pre dosiahnutie väčšej citlivosti sa spojuje niekoľko škatúľ do jedného konštrukčného celku.

Tlakomerná škatuľa sa používa aj v prístroji na meranie barometrického tlaku, v tzv. *aneroide*. V tomto prípade je priestor škatule nepriedušne uzatvorený, evakuovaný a meraný barometrický tlak pôsobí na škatuľu z vonkajšku.

*Vlnovcové tlakomery* sa používajú na meranie malých tlakov a rozdielov tlakov do asi 0,4 MPa. Schéma meracieho prvku je na Obr. 9. Tlakomerným prvkom je tenkostenný kovový mech - vlnovec, ktorý je umiestnený v puzdre, do ktorého je privádzaný merný tlak. Deformácia vlnovca  $\Delta l$  sa tiahlom prenáša na ukazovateľ. Odolnosť proti deformáciám (tuhosť vlnovca) možno ľahko zväčšiť vložením pružiny; upraví sa tak charakteristika a merací rozsah tlakomera. Oproti predošlým typom deformačných tlakomerov ma vlnovec lepšiu linearitu. V prípade merania rozdielu tlakov sa väčší tlak privádza do puzdra snímača, menší do vlnovca. Niekedy sa namiesto kovového mechu používa mech z plastu (napr. teflónu); funkciu deformačného prvku potom úplne preberá pružina.



Obr. 8 Škatuľa



Obr. 9 Vlnovec



Obr. 10 Manovakuometer s B.trubicou

Kovové vlnovce s pružinou sa často používali v pneumatickej regulačnej technike (pneumatické vysielace, prevodníky, regulátory a pod.).

Deformačné tlakomery boli v mnohých oblastiach použitia nahradené modernejšími typmi snímačov. Zachovávajú si však dôležité miesto v oblasti merania tlaku, a to pre niektoré svoje prednosti jednoduchosť, spoľahlivosť, nezávislosť na napájaní, odolnosť proti magnetickému rušeniu, odolnosť proti elektromagnetickému rušeniu, nízku cenu. Príklady vyhotovenia ukazovacích deformačných tlakomerov sú na Obr. 10 a Obr. 11.

**Meranie procesných veličín**

Pri celkovom hodnotení deformačných tlakomerov je jednou z ich hlavných predností veľká predstavujúca sila. Meracie systémy môžu byť robustné a je možné k nim pripojiť ďalšie prídavné zariadenia, napr. zapisovacie ústrojenstvo a prevodníky pre diaľkový prenos. Pre prevod na elektricky signál možno využiť odporové, indukčné, tenzometrické a kapacitné metódy. Ich ďalšími prednosťami sú malé rozmery, malá hmotnosť, veľký merací rozsah, dostatočná presnosť, jednoduchosť a spoľahlivosť aj v ťažkých prevádzkových podmienkach. Deformačné manometre patria k najčastejšie používaným typom tlakomerov v priemysle. Deformačné tlakomerné prvky sa takisto používajú pri konštrukcii *manostatov*, čo sú prístroje vybavené jedným alebo niekoľkými elektrickými kontaktmi, ktoré sa používajú k dvojpolohovej regulácii tlaku (Obr. 12). Na manostate je možné nastaviť veľkosť tlaku a spínaciu hysteréziu.



Obr. 11 Membránový tlakomer



Obr. 12 Tlakový spínač

Nedostatkom deformačných tlakomerov je elastické dopružovanie a prípadne trvalé deformácie meracieho prvku počas prevádzky. Nedostatkom je aj ovplyvňovanie údajov okolitou teplotou. Teplota ovplyvňuje modul pružnosti materiálu deformačného prvku a teplotnou rozťažnosťou prevodového mechanizmu mení mechanický prevod. Deformačné tlakomery vyžadujú pravidelné kontrolné kalibrácie, zvlášť pri meraní pulzujúcich tlakov. Merací rozsah deformačného tlakomeru sa volí tak, aby pomaly kolísajúci meraný tlak dosiahol maximálne dve tretiny a rýchlo sa meniaci tlak maximálne polovicu meracieho rozsahu prístroja.

PRIEMYSELNÁ INFORMATIKA  
Meranie procesných veličín

Tab. 1

Tlakomery (snímače tlaku)	Charakteristika princípu merania	Poznámka	Typ tlakomera (snímača)	Merací rozsah	Presnosť (% z rozsahu)	Možnosti použitia
hydrostatické tlakomery	princíp je založený na definícii hydrostatického tlaku, mierou tlaku je výška stĺpca kvapaliny	ovplyvňujúcou veličinou je hustota tlakomernej kvapaliny a jej teplota	U-trubicový	závisí na hustote tlakomernej kvapaliny	až 0,05	v laboratóriách, v metrologických laboratóriách, presné barometre
			nádobkový	do 200 kPa (náplň Hg)	až 0,05	
			mikromanometer so sklonným ramenom	do 5 kPa (náplň voda)	1 až 3	
			kompresné vákuometre	$10^{-3}$ až $10^3$ Pa		
silové tlakomery	využívajú definíciu tlaku ako sily pôsobiacej na plochu	na hustote kvapaliny nezávisí údaj, ale merací rozsah	zvonový	do 1000 Pa	1	laboratórne meranie, kalibrácia iných manometrov
			piestový	0 až 500 MPa	0,0015 až 0,1 (1 až 5)	etalónové tlakomery, (tlakomery pre meranie tlaku v pneumatikách)
deformačné tlakomery	mierou tlaku je veľkosť deformácie pružného prvku		trubicový (Bourdonov)	do $10^9$ Pa	bežné 1 až 2, presné 0,1	najrozšírenejšie priamo ukazujúce prevádzkové tlakomery, prípadne doplnené elektrickým výstupom
			membránový	do $10^6$ Pa	0,5 až 2	
			vlnocový	do $10^5$ Pa	1 až 2	
			škatuľový	do $10^3$ Pa	1 až 2	
snímače tlaku s elektrickým výstupom	ako snímací prvok je použitý vhodný deformačný člen (najčastejšie membrána) a vyhodnocuje sa zmena polohy	zmena polohy jazdca potenciometra	potencometrický		0,5 až 1	ako doplnok ku rezonančným manometrom
		zmena polohy jadra indukčnej cievky	indukčnosť		0,5	
		zmena osvetlenia alebo zmena svetelného toku	optický		0,1	
		zmena vzdialenosti elektród kondenzátora	kapacitný	-14 až 70 MPa	0,05 až 0,2	
	ako snímací prvok je použitý vhodný deformačný člen (nosník, membrána) a vyhodnocuje sa zmena mechanického napätia	zmena mechanického napätia sa meria tenzometrom ako zmena odporu	tenzometrický	-0,1 až 60 MPa	0,025 až 0,5	
		vyhodnocuje sa zmena rezonančnej frekvencie mechanického kmitania v závislosti na mechanickom napätí	rezonančný	0 až 50 MPa	0,01 až 0,2	moderné rezonančné snímače patria k najpresnejším tlakomerom, prevádzkové aj laboratórne prístroje
		vznik náboja pri mechanickom namáhaní	piezoelektrický	až 30 GPa	1	meranie rýchlych tlakových dejov a pulzácií
elektrické tlakomery pre extrémne tlaky	mierou tlaku je zmena elektrickej veličiny	závislosť odporu na tlaku	odporový	80 MPa až 10 GPa	0,5 až 2	meranie veľkých pretlakov
		závislosť tepelnej vodivosti plynov na tlaku	tepelnevodivostný	$10^{-4}$ až 100 Pa	2 až 10	meranie veľkého vákua
		ionizácia plynu pri malom tlaku	ionizačný	$10^{-10}$ až $10^{-1}$ Pa	10	meranie extrémneho vákua