

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ TLAKU

PRESSURE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN JAKUBEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2009



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakubec Jan

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření tlaku

v anglickém jazyce:

Pressure measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie týkající se možných způsobů zjišťování tlaku (absolutní, relativní, podtlak, přetlak) s rozbořem jejich významu a použití ve strojírenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na způsoby zjišťování tlaku se zhodnocením jejich výhod a nevýhod.



Seznam odborné literatury:

1. ČECH J., PERNIKÁŘ J., PODANÝ K.: Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno 2005. p 175. ISBN 80-214-3070-2.
2. KRÍŽ R., VÁVRA P.: Strojírenská příručka – 2. Sv. D: Měřicí technika a bezdemontážní diagnostika. Praha: SCIENTIA 1993
3. ZEHNULA K.: Snímače neelektrických veličin. SNTL Praha 1977

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 22.10.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

JAKUBEC Jan: Měření tlaku.

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru 2301R016 předkládá přehled možných způsobů měření tlaku. Literární studie shrnuje možnosti a varianty určování tlaku absolutního, relativního, barometrického, podtlaku, přetlaku a vakua s rozбором jejich významu pro strojírenskou praxi. Jedná se zejména o tlakoměry kapalinové, pístové a zvonové, deformační a elektrické s příklady jejich použití.

Klíčová slova: Tlak, vakuum, tlakový rozdíl, měření, metrologie, manometr.

ABSTRACT

JAKUBEC Jan: Pressure measurement.

The project elaborated in a scope of engineer studies in branch 2301R016 submits summary of various methods of pressure measurement. Literary study draws up possibilities and variants of pin-pointing the absolute, relative and barometric pressure, suction, excess pressure and vacuum with analysis of its significance for engineering procedures. Main area is pressure of fluid, piston and bell-shaped gauges, deformation and electrical with examples of their practical use in engineering.

Keywords: Pressure, vacuum, pressure-difference, measurement, metrology, pressure gauge.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAKUBEC, Jan. *Měření tlaku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření tlaku vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

Ve Voděradech dne 26 .5.2009

.....

Jan Jakubec



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.



OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	9
2. MĚŘENÍ TLAKU	10
2.1. Přístroje k měření tlaku	11
3. KAPALINOVÉ TLAKOMĚRY	12
3.1. U-trubicový manometr	13
3.2. Nádobkový manometr	14
3.3. Mikromanometr se sklonnou trubicí	14
3.4. Betzův manometr	15
3.5. Kompenzační manometr	16
3.6. Prstencový manometr	16
3.7. Kompresní vakuometr	17
3.8. Kapalinové barometry	18
3.9. Použití kapalinových tlakoměrů	19
4. PÍSTOVÉ A ZVONOVÉ TLAKOMĚRY	19
4.1. Zvonový manometr s účinkem vztlaku	19
4.2. Zvonový manometr bez účinku vztlaku	20
4.3. Pístový manometr	21
4.4. Použití pístových a zvonových tlakoměrů	21
5. DEFORMAČNÍ TLAKOMĚRY	22
5.1. Trubicový tlakoměr	23
5.2. Membránový tlakoměr	24
5.3. Vlnovcový tlakoměr	25
5.4. Krabicový tlakoměr	25
5.5. Použití deformačních tlakoměrů	26
6. ELEKTRICKÉ TLAKOMĚRY	26
5.1. Odporový tlakoměr	26
5.2. Ionizační vakuometr	27
5.3. Bolometrický vakuometr	28
5.4. Použití elektrických tlakoměrů	28
7. ZÁVĚR	29

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

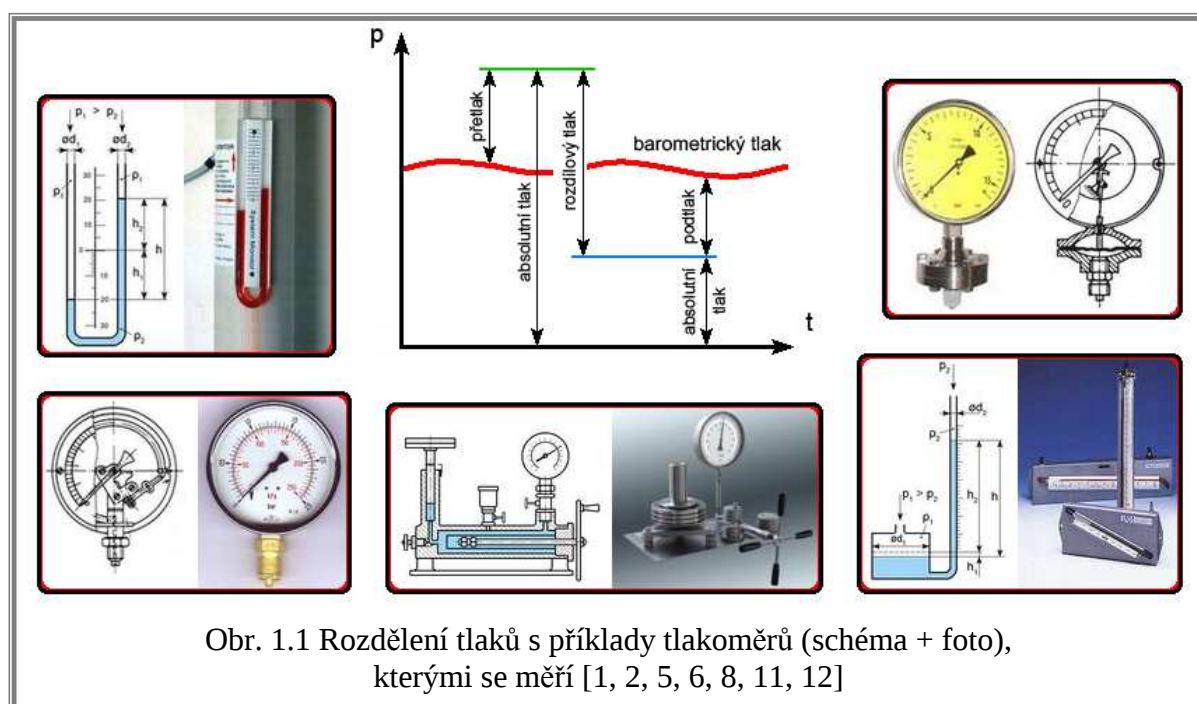
1. ÚVOD

Tato práce pojednává o měření tlaku, které spadá do vědního oboru metrologie. Metrologie neboli v překladu „nauka o míře“ (řecky metron = míra, logos = pojednávání) je obor, který zahrnuje všechny poznatky z činnosti v oblasti měření. Zásadním posláním metrologie je zajišťování jednotnosti a správnosti měření a měřidel. Na mezinárodní úrovni je zajištěna pomocí *Metrické konvence*, která byla založena 20. května 1875 v Paříži. Česká republika je jejím členem od roku 1993. V České republice je hlavním metrologickým orgánem *Český metrologický institut* (ČMI), na který navazují další organizace.

Počátky měření se datují k počátku kulturní historie lidstva a začínají měřením délek a hmotnosti. Měřicí technika se vyvíjela podle toho, jak se zvyšovaly technické vědomosti společnosti. S počátkem tovární výroby vznikají požadavky na vytvoření dalších veličin. Největší rozmach metrologie nastal počátkem 20. století. S rozvojem společnosti se zdokonaluje i měřicí technika. Téměř každý vědní obor je na měřicí technice závislý. Provoz všech technických zařízení je dnes bez využití moderních měřidel téměř nemyslitelný.

Samotné měření tlaku je důležité v technických provozech se vzduchovými a hydraulickými rozvody, u tlakových nádob apod. Pro měření tlaku se využívá různých fyzikálních principů, které se liší podle charakteru převodu tlaku na výstupní signál.

Tlakoměry dělíme podle několika hledisek. Podle rozsahu měření na *manometry* k měření přetlaků, *vakuumetry* k měření vakua, *manovakuometry* k měření přetlaků i vakua. Dále *tahoměry* k měření malých podtlaků, *diferenční tlakoměry* k měření tlakových rozdílů a *barometry* k měření tlaků ovzduší (obr.1.1). Podle fyzikálního principu dělíme tlakoměry na *kapalinové*, které jsou založeny na účinku hydrostatického tlaku kapaliny, *pístové* a *zvonové*, u kterých se měření tlaku převádí na měření síly, jejíž účinky jsou vyvažovány např. závažím nebo pružinou, *deformační*, kde měřítkem tlaku je deformace pružného členu a *elektrické*, které využívají principu tlakové závislosti některých elektrických veličin. Podle stupně přesnosti se dělí na *provozní* používané ve výrobních provozech, *kontrolní*, které jsou o třídu přesnější než provozní a používají se ke kontrole provozních tlakoměrů a *laboratorní*, které jsou nejpřesnější.





2. MĚŘENÍ TLAKU [1, 4, 5]

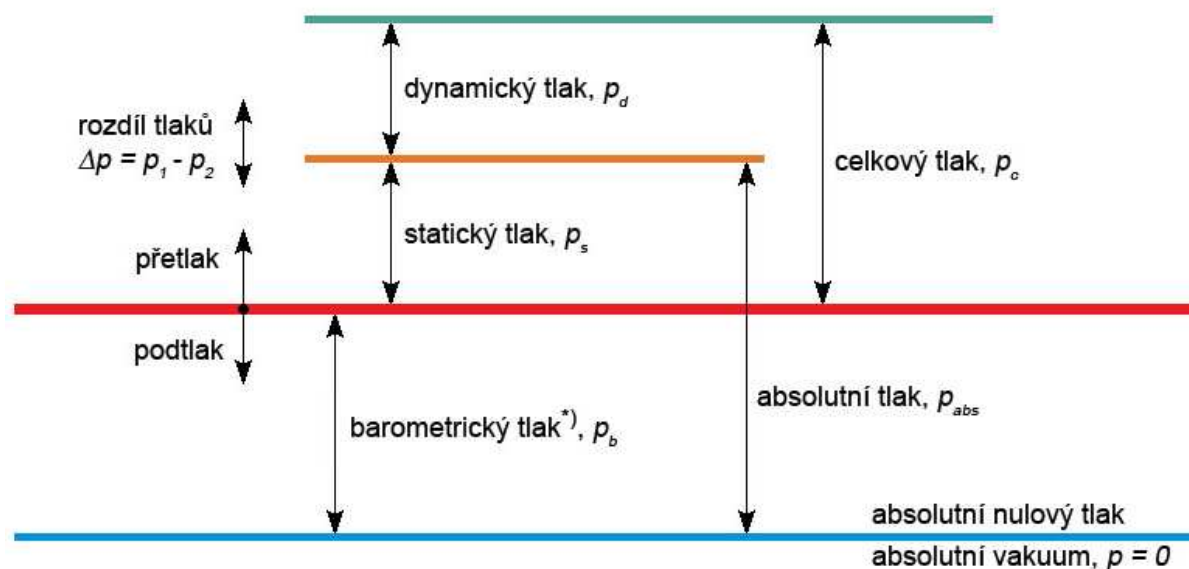
Tlak je definován jako podíl elementární síly dF působící kolmo na element plochy dS :

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (2.1)$$

Nebo jako hydrostatický tlak sloupce kapaliny o výšce h a hustotě ρ :

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad (2.2)$$

Tlak udáváme dvojím způsobem, buď jako absolutní tlak (měří se od nulové hodnoty tlaku), nebo jako relativní tlak (přetlak nebo podtlak), který se měří od okamžitého barometrického tlaku (obr. 2.1).



^{*)} normální barometrický tlak, $p_{bn} = 101\,325\text{ Pa}$

Obr. 2.1 Základní rozdělení tlaků [6]

Barometrický tlak, p_b – tlak vzduchu v daném místě za skutečných podmínek

Absolutní tlak, p_a – tlak měřený od absolutní tlakové nuly

Absolutní nulový tlak (absolutní vakuum) – teoretický nulový tlak v prostoru dokonale zbaveném jakýchkoliv hmotných částic

Statický tlak, p_s – v celém průtočném průřezu stejný

Dynamický tlak, p_d – zahrnuje vliv stlačitelnosti tekutiny

Celkový tlak, p_c – je roven součtu statického a dynamického tlaku

Přetlak – rozdíl barometrického tlaku a tlaku absolutního, který je vyšší než barometrický

Podtlak – rozdíl barometrického tlaku a tlaku absolutního, který je nižší než barometrický

Rozdíl tlaků (tlaková difference), Δp – rozdíl dvou tlaků, z nichž ani jeden není shodný s tlakem barometrickým

Vakuum – fyzikální pojetí takto označuje jakýkoliv tlak nižší než barometrický

Jednotkou tlaku dle soustavy SI je 1 pascal (1 Pa), což představuje tlak síly o velikosti 1 N na plochu 1 m².

$$(1\text{Pa} = 1\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2})$$

V technické praxi se pak setkáme s násobky základní jednotky jako kPa, MPa a GPa. Pro vyjádření barometrického tlaku se také používá hPa.

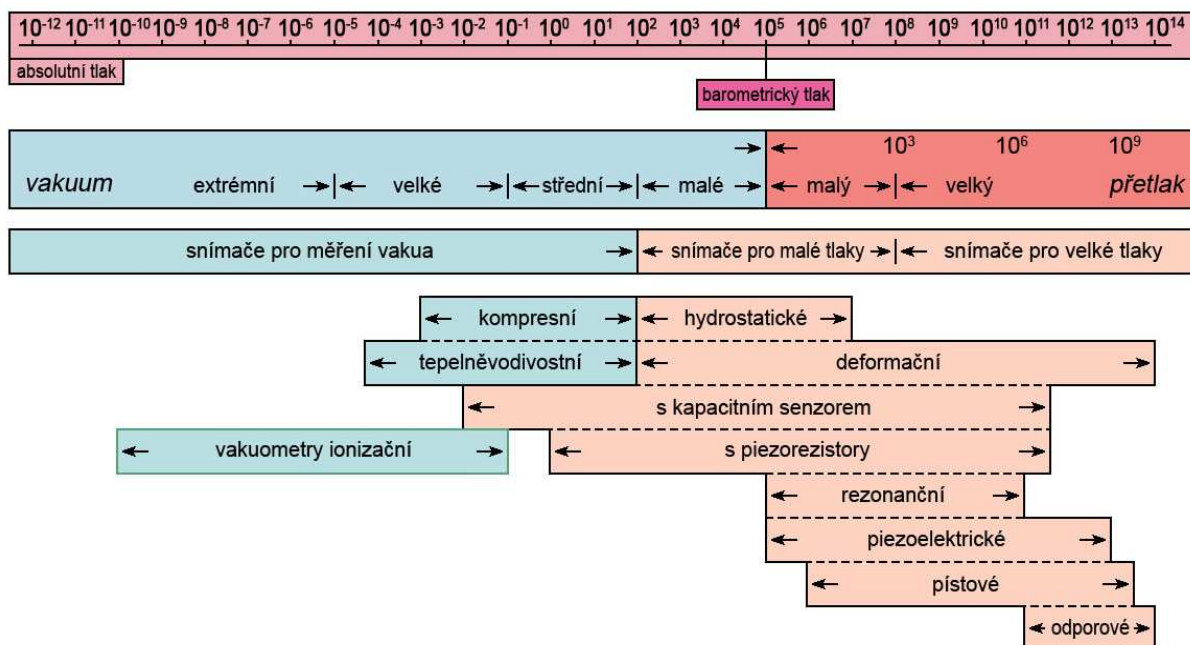
2.1. Přístroje k měření tlaku [1, 4, 6]

Obecný název pro přístroj k měření tlaku je tlakoměr. Podle měřeného tlaku a podle použití se jim přiřazují tyto názvy:

- manometry* – k měření přetlaků
- vakuometry* – k měření vakua
- manovakuometry* – k měření přetlaků i vakua
- tahoměry* – k měření malých podtlaků
- diferenční tlakoměry* – k měření tlakových rozdílů
- barometry* – k měření tlaků ovzduší

Podle funkčního principu pak dělíme tlakoměry na:

- Kapalinové tlakoměry – měřítkem tlaku je výška sloupce kapaliny
- Pístové a zvonové tlakoměry – tlak určuje zdvih zvonu (zvonové) nebo hmotnost závaží na pístu známého průřezu (pístové)
- Deformační tlakoměry – tlak je měřen pomocí deformace pružného prvku
- Elektrické tlakoměry – změna tlakově závislé elektrické veličiny udává měřítko tlaku



Obr. 2.2 Orientační rozdělení tlakoměrů podle měřicího rozsahu [6]



3. KAPALINOVÉ TLAKOMĚRY [1, 2, 4, 5, 6]

Měřený tlak je vyrovnáván hydrostatickým tlakem sloupce použité kapaliny. Hodnota tohoto tlaku je dána výškou sloupce a hustotou dané kapaliny. Pro různé rozsahy měření se používá kapalina o různé hustotě (tab. 3.1).

Tab. 3.1 Vlastnosti tlakoměrných kapalin [5, 13]

	hustota ρ [kg.m ⁻³] při teplotě:			
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
líh	806,3	-	791	-
voda	999,8	999,7	998,2	995,6
tetrachlor	1633,9	1614,3	1594,7	1575,1
rtuť	13595,1	13570,4	13545,7	13521,2
	výhody		nevýhody	
líh	nízké povrchové napětí		hořlavý, pohlcuje vlhkost z ovzduší	
voda	dostupná, závislá jen na teplotě		velké povrchové napětí (u trubic malých průměrů a měření malých tlakových rozdílů)	
tetrachlor	dá se dobře barvit		změna hustoty znečištěním, působí korozivně	
rtuť	velká stálost vlastností		velké povrchové napětí (nesmáčí stěny), zdravotně závadná, působí korozivně	

Délka trubic bývá maximálně 1,5 m, čímž je dán rozsah měření. Např. 0,2 MPa při použití rtuti nebo 15 kPa pokud použijeme vodu. Přesnost čtení polohy hladiny kapaliny lze zajistit až na 0,05 mm.

Dle konstrukčního provedení se kapalinové tlakoměry dělí na:

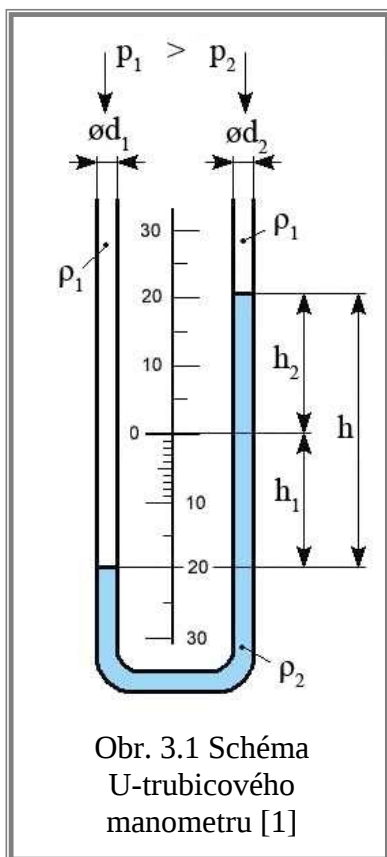
- *U-trubicový manometr* - vytvořený z trubice tvaru U z poloviny naplněné kapalinou
- *nádobkový manometr* - jedno rameno je rozšířené do nádoby a poloha hladiny se odečítá pouze v užším rameni
- *mikromanometr se sklonnou trubicí* - vznikne skloněním měřicí trubice nádobkového tlakoměru
- *Betzův manometr* - nádobkový manometr s velmi přesným odečítáním hladiny
- *kompensační manometr* - velmi přesný, protože výšku hladiny odečítáme stále v jedné poloze
- *prstencový manometr* - tlakoměr s vysokou citlivostí
- *kompresní vakuometr* - určen k měření malých absolutních tlaků
- *kapalinový barometr* - k měření atmosférického tlaku v ovzduší

3.1. U-trubicový manometr [1, 4, 5]

U-trubicový manometr je v podstatě skleněná trubice ve tvaru písmene U se stupnicí (obr. 3.1), popř. dvě přímé trubice ve spodní části spolu spojené (např. gumovou hadicí) a asi z poloviny naplněné tlakoměrnou kapalinou. Délka trubice nepřesahuje 1,5 m, a tím je určen rozsah měření podle toho, jakou použijeme tlakoměrnou kapalinu.

Obvykle se používá voda (rozsah měření je 15 kPa), tetrachlor (25 kPa) nebo rtuť (130 kPa). Trubice nemusí být kalibrovány.

U-trubicové manometry jsou vyráběny jako jednoduché s milimetrovým měřítkem, nebo velmi přesné s optickým čtením výchytky kapaliny. Přesnost odečítání výchytky lze zajistit až na 0,05 mm.



Obr. 3.1 Schéma U-trubicového manometru [1]



Obr. 3.2 Laboratorní U-trubicový manometr [11]

Manometry této konstrukce lze použít pro měření přetlaku nebo tlakového rozdílu při statickém tlaku až 10 MPa, mají-li vhodné uspořádání. Náplní je rtuť, trubice z nerezové oceli a výška hladiny se odečítá magneticky (plováček + magnet).

Zásadní nevýhodou U-trubicového manometru je to, že musíme odečítat výšku sloupce kapaliny v obou ramenech.

Tlakový rozdíl, který měříme $\Delta p = p_1 - p_2$ vychýlí kapalinu o míru $h = h_1 + h_2$ a platí:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad (3.1)$$

kde $\rho_2 [kg \cdot m^{-3}]$ je hustota tlakoměrné kapaliny, $\rho_1 [kg \cdot m^{-3}]$ je hustota měřeného prostředí, $g [m \cdot s^{-2}]$ je tíhové zrychlení

Při měření tlaku plynu lze hodnotu ρ_1 zanedbat a tím lze rovnici (3.1) zjednodušit na:

$$\Delta p = \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (3.2)$$

Z uživatelské rovnice (3.1) lze také napsat rovnici statické charakteristiky U-trubicového manometru:

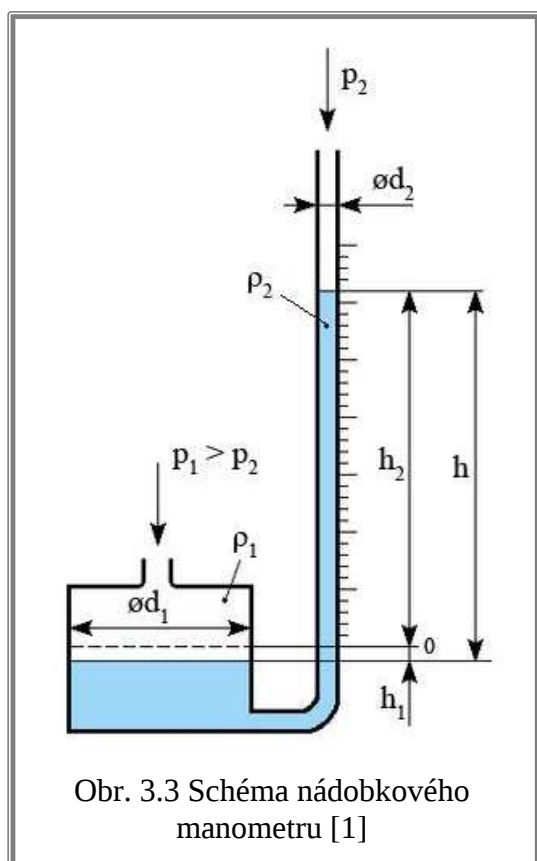
$$h = \frac{\Delta p}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g} \quad (3.3)$$



3.2. Nádobkový manometr [1, 4, 5]

Hlavním znakem nádobkového manometru je odstranění nevýhody U-trubicového manometru, tj. odečítání výchylky sloupce v obou ramenech tlakoměru. Jedno rameno je rozšířeno do nádoby a čte se výchylka pouze v trubici o stálém průřezu (obr 3.3).

Výhodou je tedy eliminace nevýhody U-trubicového manometru (odchylku odečítáme pouze na jednom rameni manometru), naopak nevýhodou požadavek na konstantní průřezy nádobek a trubic (kalibrované), aby se neměnila hodnota převodu e .



Tlakový rozdíl, který měříme $\Delta p = p_1 - p_2$ lze vyjádřit z rovnice (3.1) pomocí rovnosti objemů $S_1 \cdot h_1 = S_2 \cdot h_2$:

$$\begin{aligned}\Delta p = p_1 - p_2 &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = \\ &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h_2 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + 1 \right) = \\ &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h_2 \cdot e\end{aligned}\quad (3.4)$$

kde $S_1 [m^2]$ je průřez nádoby,
 $S_2 [m^2]$ je průřez trubice,
 $e [-]$ je převod tlakoměru

Z uživatelské rovnice (3.4) lze také napsat rovnici statické charakteristiky nádobkového manometru:

$$h = \frac{\Delta p}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot e} \quad (3.5)$$

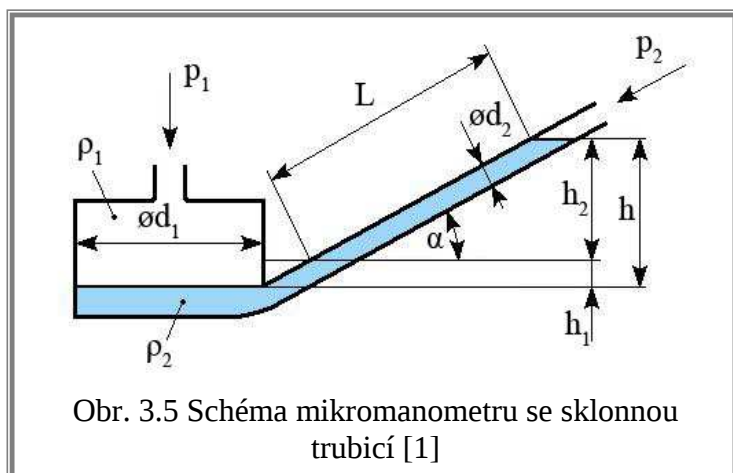
3.3. Mikromanometr se sklonnou trubicí [1, 4, 5]

Jedná se o nádobkový manometr, jehož trubicí lze jednoduše sklápět o úhel v rozsahu (0° ; 90°), a tím zvyšovat jeho citlivost měření (obr. 3.5). Sklápěním trubice a zmenšováním úhlu α se snižuje rozsah manometru a zvyšuje citlivost.

Rozsah měření je určen délkou trubice. Běžná délka trubic bývá 200 a 600 mm, náplň je líh, přesnost 0,01 mm. Konstrukce je provedena tak, aby bylo umožněno nastavení sklonu ramene pro převod v číselné řadě 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, popř. 1 - 0,5 - 0,2 - 0,1 - 0,05 - 0,02.

Mikromanometr se sklonnou trubicí se díky své přesnosti měření používá pro přesná cejchovní měření.





Obr. 3.5 Schéma mikromanometru se sklonnou trubicí [1]

Výhodou je vysoká přesnost měření, možnost změny citlivosti a rozsahu manometru. Ale měřený rozsah tlaků je malý a měření při malých úhlech sklonu trubice jsou nepohodlná, protože přístroj pomalu nabíhá. Průřezy nádobek a trubic musí být konstantní (kalibrovány), aby se neměnila hodnota převodu e .

Nejvhodnější náplní je etylalkohol (líc), rtuť se nepoužívá.

Tlakový rozdíl, který měříme $\Delta p = p_1 - p_2$ je dán vztahem:

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \right) = \\ &= (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot L \cdot e \end{aligned} \quad (3.6)$$

kde $S_1 [m^2]$ je průřez nádoby, $S_2 [m^2]$ je průřez trubice, $L [m]$ je výchylka kapalinového sloupce v trubici

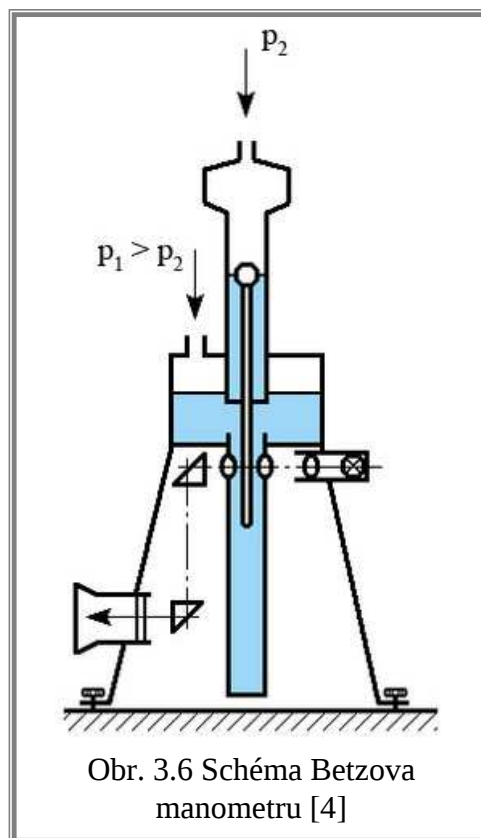
3.4. Betzův manometr [4, 5]

Jedná se rovněž o nádobkový manometr, vyznačující se velmi přesným odečítáním hladiny tlakoměrné kapaliny v trubici manometru.

Hladina kapaliny se detekuje pomocí skleněného plováčku, na kterém je zavěšen skleněný pásek, na němž je vyryta stupnice. Obraz měřítka se optickým systémem promítá na matnici, kde se čte údaj výchylky kapaliny v trubici manometru s přesností 0,05 mm (obr. 3.6). Délka trubice bývá 200 mm, pro rozsah měření (0 ÷ 2000) Pa nebo 500 mm (0 ÷ 5000) Pa.

Nevýhodou Betzova manometru je, že průřezy nádobek i trubic musí být konstantní, aby se neměnila hodnota převodu e . Z tohoto důvodu musí být trubice tlakoměrů kalibrovány. Nevýhodou je i dlouhá nabíhací doba a skutečnost, že neposkytují signál vhodný pro dálkový přenos dat a pro další zpracování v řídicích obvodech.

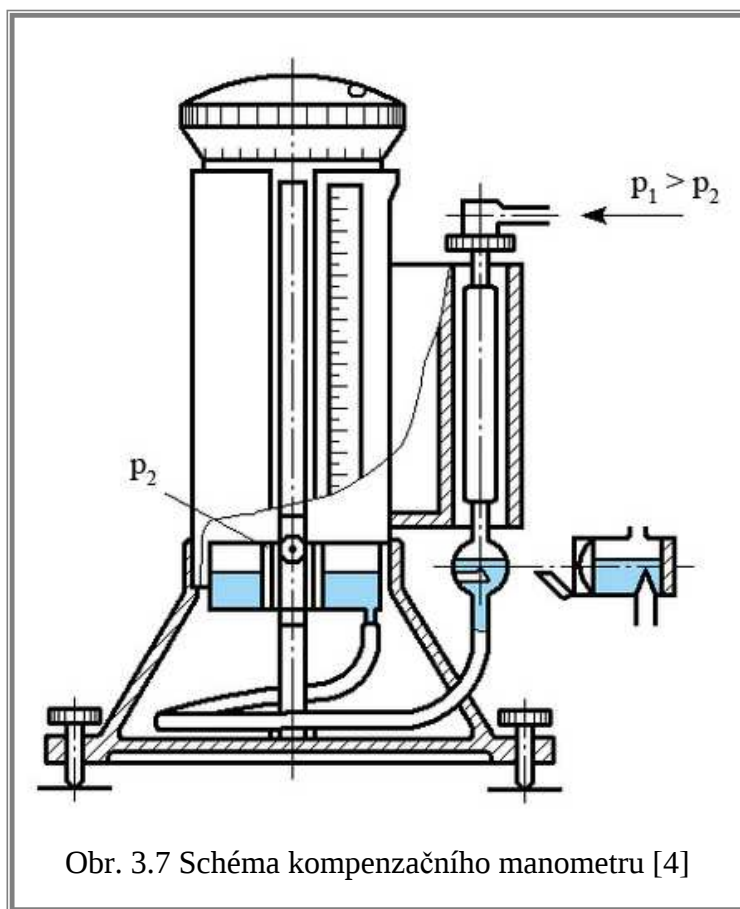
Jinak jsou to spolehlivé a přesné přístroje, používané zejména k laboratorním účelům pro měření časově stálých tlakových rozdílů (při jen mírně pulzujícím tlaku je měření velmi složité).



Obr. 3.6 Schéma Betzova manometru [4]



3.5. Kompenzační manometr [1, 4]



Další variantou laboratorního nádobkového manometru je kompenzační tlakoměr diferenční, vyznačující se vysokou přesností čtení výšky hladiny tlakoměrné kapaliny.

Ke zpřesnění dochází proto, že výšku hladiny v rameni odečítáme stále v jedné poloze. Do trubice přivádíme vyšší z obou měřených tlaků a nádobku, do níž je zaváděn menší tlak, zvedáme tak dlouho, až se hladina kapaliny v druhé nádobce vrátí do původní polohy. Nastavení se provádí mikrometrickým šroubem s přesností 0,01 mm. Poloha hladiny v pohyblivé nádobce se zjišťuje pomocí hrotového stavoznaku.

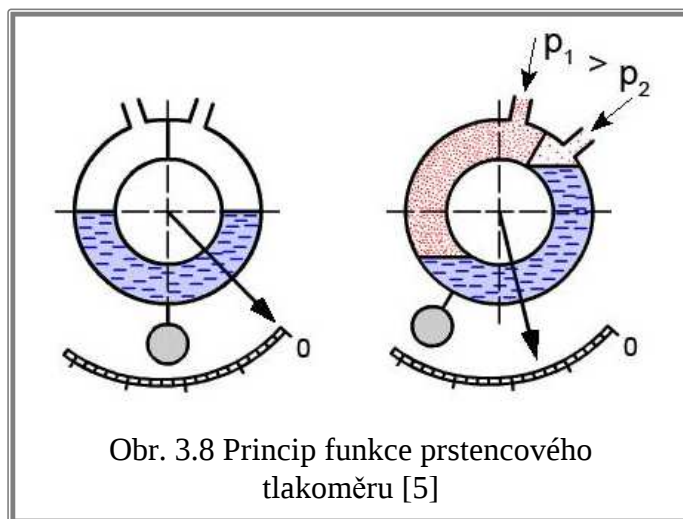
Rozdíl výšek hladin lze odečítat s přesností v setinách mm. Jako tlakoměrná kapalina zde slouží destilovaná voda, která zajišťuje rozsah měření (0 ÷ 1500) Pa.

3.6. Prstencový manometr [5]

Hlavní částí prstencového manometru je dutá kruhová trubice ve tvaru anuloidu, uprostřed otočně uložená. Uložení je břitové, aby se dosáhlo minimálního tření. Trubice je téměř do poloviny naplněna tlakoměrnou kapalinou, která spolu s přepážkou dělí vnitřní prostor na dvě části. Každá z dílčích částí je připojena pomocí ohebných přívodů (gumové hadice) k tlakovému prostředí.

Na spodní části prstence je připevněno závaží, které určuje svou tíhou základní rovnovážnou polohu. Pokud je mezi oběma přívody p_1 a p_2 tlakový rozdíl, vznikne vychýlením sloupce kapaliny v těžišti plochy přepážky tlaková síla, která vytvoří kroučící moment a tím natočí prstenec o úhel α (obr. 3.8).

S prstencem je propojeno zobrazovací zařízení nebo čidlo úhlové výchylky (potenciometr, indukční snímač apod.).



Pro měření tlakových rozdílů je prstencové těleso kovové a jako náplň se používá parafínový olej, voda nebo tetrachlor. Výstupní signál tohoto tlakoměru nezávisí na množství ani hustotě kapalinové náplně. Pro měření malého absolutního tlaku se používá tlakoměr se skleněným prstencem a rtuťovou náplní. Pro snímače vysokotlaké je prstenec vyroben z ocelové trubky a náplň je rtuť. Prstencové manometry se používají jako provozní přístroje.

Výhodou je vysoká citlivost, měří přetlak, podtlak a tlakový rozdíl. Jednoduchá změna rozsahu lze provést výměnou závaží i za provozu, výhodná je také necitlivost na změnu teploty. Nevýhodou je velká setrvačnost.

Závislost mezi tlakovým rozdílem a vychýlkou α je popsána rovnicí:

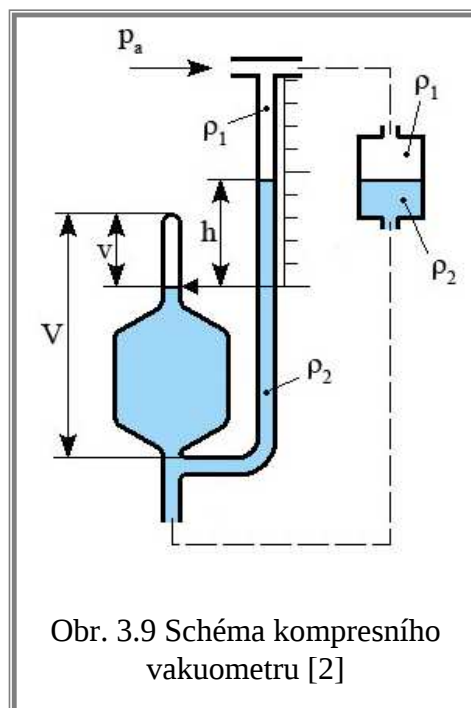
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{M \cdot g \cdot R'}{S' \cdot r'} \cdot \sin \alpha' \quad (3.7)$$

kde M [N] je kroutící moment, R', r' [m] poloměry prstence, S' [m²] je průřez prstence, α' [°] je úhel natočení prstence

3.7. Kompresní vakuometr [1, 2, 4]

Je určen k měření malých absolutních tlaků v rozsahu ($10^3 \div 10^{-3}$) Pa. Princip spočívá v uzavření určitého objemu vzduchu o měřeném absolutním tlaku p_a a jeho stlačení tlakem rtuťového sloupce o výšce h . K ovládání rtuťové náplně slouží hladinová nádobka. Před měřením je hladinová nádobka s prostorem vakuometru spojena gumovou hadicí v takové výšce, aby rtuť opustila prostor vakuometru a shromáždila se v této nádobce (obr. 3.9). Měřený absolutní tlak bude v tomto případě v prostoru vakuometru.

Pomalým zvedáním hladinové nádobky dojde nejdříve k uzavření kompresního prostoru o objemu V . Dalším zvedáním se objem v kompresním prostoru stlačuje až na objem v , určený ryskou na kompresní nádobce. Ve volné trubici, která je spojena s měřeným prostorem, komprese nenastává a sloupec rtuti vystoupí do výšky h nad hladinu rtuti v kompresním prostoru.



Pro pomalou kompresi platí $p \cdot V = konst.$, tedy:

$$p_a \cdot V = (p_a + \rho \cdot g \cdot h) \cdot v \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.8) pak napíšeme rovnici pro určení tlaku:

$$p_a = \frac{v}{V - v} \cdot \rho \cdot g \cdot h = e \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (3.9)$$



3.8. Kapalinové barometry [1, 7]

Barometry slouží k měření barometrického (atmosférického) tlaku v ovzduší. Podle jejich konstrukčního provedení je dělíme:

- *Gay-Lussacův barometr* – má nevýhodu dvojího odečítání (stejně průměry trubic v místě odečítání eliminují kapilární vlivy)
- *Fortinův barometr* – odstraňuje nevýhodu dvojího odečítání, neodstraňuje kapilární nepřesnosti
- *Přesný dvoutrubicový barometr* – odečítání tlaku v jednom místě, není potřeba korigovat kapilární vlastnosti
- *Staniční barometr*

U kapalinových barometrů je potřeba korigovat barometrický tlak. Skutečnost, že normální hodnota barometrického tlaku je 101 325 Pa je příčinou, že jedinou použitelnou tlakoměrnou kapalinou v barometrech je rtuť.

Naměřená výška sloupce rtuti, případně z ní určený místní tlak se přepočítává:

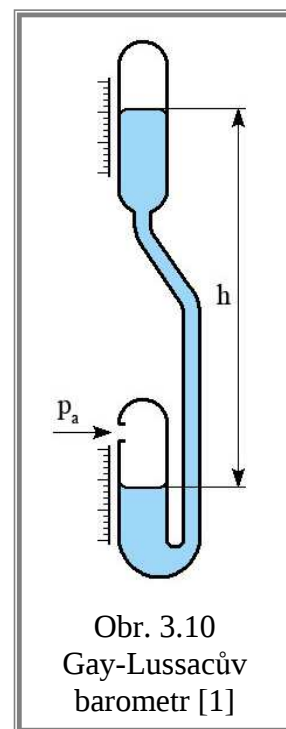
- korekcí na kapilární vlivy
- na teplotu 0°C
- na 45° severní zeměpisné šířky
(na tíhové zrychlení $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$)
- na nulovou nadmořskou výšku (hladina moře)

Kapalinové barometry pracují na stejném principu jako nádobkové nebo U-trubicové manometry. Téměř výhradně se jako tlakoměrná kapalina používá rtuť.

Gay-Lussacův barometr

Jedná se o dvouramenný rtuťový barometr (obr. 3.10). Delší rameno je zataveno a nad hladinou je vakuum. Nad hladinu v kratším rameni je přiveden tlak okolního vzduchu.

Hladinu odečítáme ve dvou místech a konstrukce je provedena tak, aby byl průměr ramen v místech odečítání shodný. Tím jsou částečně eliminovány kapilární vlivy, ale směr pohybu v obou ramenech je protismyslný, proto nemají menisky rtuti stejný tvar a odečítání je částečně nepřesné (meniskus = kapilární jev, zakřivení hladiny kapaliny v důsledku interakce se stěnou nádoby).



Obr. 3.10
Gay-Lussacův
barometr [1]

Pokud rozdíl hladin označíme jako h , lze pro Gay-Lussacův barometr napsat rovnici tlaku ve tvaru:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.10)$$

Při průmyslovém použití těchto barometrů je potřeba údaje korigovat podle jeho teploty, protože hustota rtuti i trubice mění s teplotou své vlastnosti.

3.9. Použití kapalinových tlakoměrů [1, 4, 5]

Základní výhodou kapalinových tlakoměrů je jejich přesnost, jsou většinou velmi jednoduché a spolehlivé. Nevýhodou je skutečnost, že neposkytují digitální signál vhodný pro dálkový přenos dat a pro další zpracování v řídicích obvodech. Problematické je také použití rtuti, a to pro její vysokou cenu a zdravotní závadnost.

Nejčastěji se používají v metrologických laboratořích, nenahraditelné jsou také jako přesné barometry. V současné době jsou až na výjimky nahrazeny modernějšími tlakoměry, zejména deformačními přístroji s elektrickým výstupem.

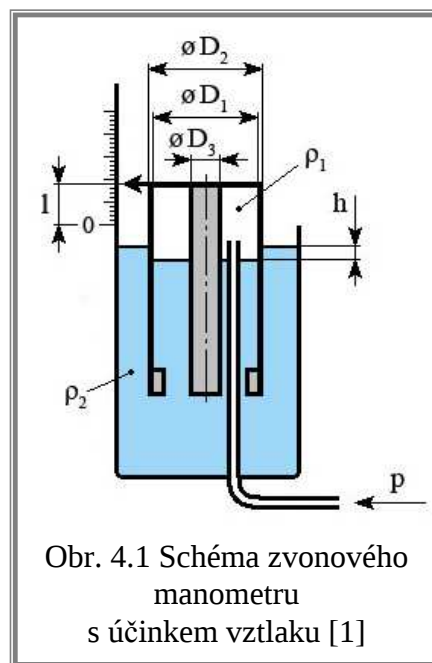
4. PÍSTOVÉ A ZVONOVÉ TLAKOMĚRY [1, 2, 4]

Někdy jsou také nazývány jako tlakoměry se silovým účinkem. Měření tlaku je u nich převedeno na měření síly, jejíž účinek je v rovnováze s účinkem zjišťovaného tlaku. Měřený tlak působí na píst vyvážený závažím nebo pružinou. Z velikosti vyvážení a z rozměrů pístu lze určit měřený tlak. Do této skupiny tlakoměrů řadíme tlakoměr pístový a zvonový.

4.1. Zvonový manometr s účinem vztlaku [1, 4, 5]

Zvonový manometr se skládá ze zvonu ponořeného do kapaliny, pod který se zavádí měřený tlak (obr. 4.1). Měřítkem tlaku je pak zdvih zvonu.

Ve výchozím stavu není pod zvon přiveden přetlak, zvon v kapalině plove a ukazatel je na nule stupnice. Při zavedení tlaku pod zvon se začne zvedat vnitřní řídící silou $F_i = p \cdot S$. Proti působí vnější řídící síla způsobená úbytkem tlaku při vynořování zvonu $F_e = (S_2' - S_1') \cdot \rho_2 \cdot g \cdot l'$.



Obr. 4.1 Schéma zvonového manometru s účinem vztlaku [1]

Při rovnosti těchto sil se zvon zastaví a jeho zdvih je úměrný měřenému tlaku podle vztahu:

$$p = \frac{S_2' - S_1'}{S_1'} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot l' = e \cdot \rho_2 \cdot g \cdot l' \quad (4.1)$$

kde S_1' [m^2] je vnitřní plocha dna zvonu, S_2' [m^2] je vnější plocha dna zvonu, ρ_2 [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota kapaliny v nádobě, l' [m] je zdvih zvonu

Zvětšení měřicího rozsahu lze provést dvěma způsoby:

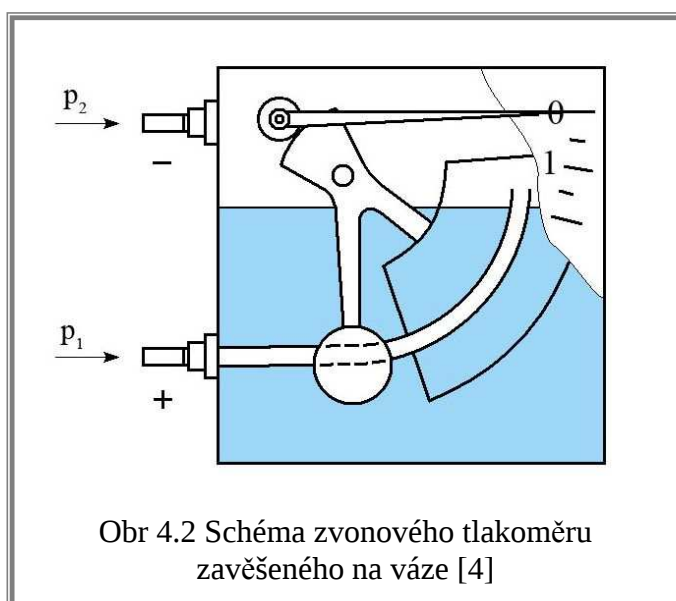
- Při zachování citlivosti:* Při maximální výchylce zatížíme zvon závažím tak, aby se opět ponořil do výchozí polohy. Rozsah tímto zvětšíme na dvojnásobek. Takto lze rozsah měnit, dokud to dovolí pokles kapaliny v nádobě.
- Při snížené citlivosti:* Zvětšením měřicího rozsahu (převodního čísla tlakoměru) při jednom zdvihu zvonu. Toho docílíme vložením přídatného vztlakového tělesa o průřezu S_3' do zvonu.

Výraz pro určení tlaku se při zvětšení měřicího rozsahu změnil na tvar:

$$p = \frac{S_2' - S_1' + S_3'}{S_1' - S_3'} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot l' = e' \cdot \rho_2 \cdot g \cdot l' \quad (4.2)$$

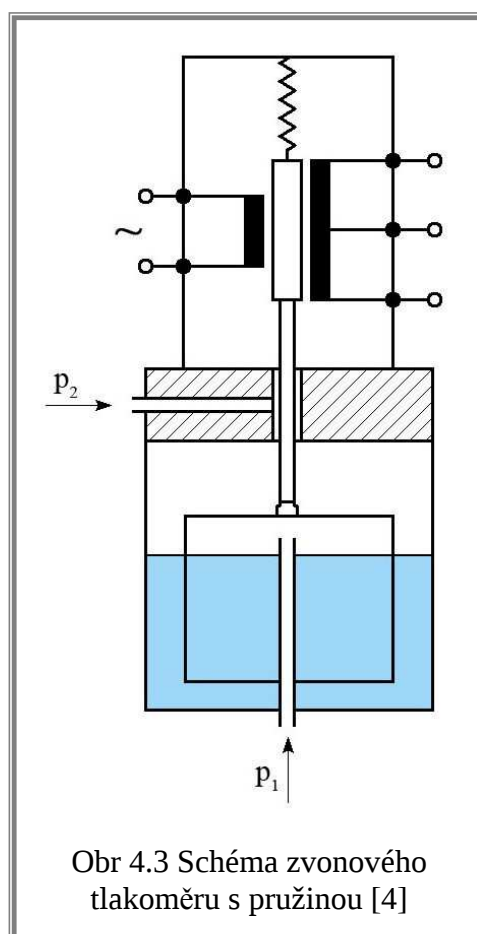
Zvonový tlakoměr se používá k měření statických tlaků do 500 Pa. Má vysokou přesnost a značnou představovací sílu. Jako tlakoměrná kapalina do nádoby tlakoměru se používá voda, olej, petrolej nebo toluen. Slouží k laboratorním měřením a kalibraci jiných tlakoměrů.

4.2. Zvonový manometr bez účinku vztlaku [1, 4, 5]



Má podobnou konstrukci jako zvonový manometr s účinkem vztlaku, ale je navíc vybaven zdrojem kompenzační síly, která vyrovnává sílu F_i , a tím udržuje zvon ve stejné poloze. Kompenzační síly je dosaženo pomocí závaží nebo pružiny.

Tyto přístroje se používají jako provozní. Jelikož síla pružiny působí proti tlakové síle F_i , lze značně omezit zdvih zvonu a jeho polohu snímat elektrickým snímačem.



Obr. 4.2 zobrazuje schéma zvonového tlakoměru, kde je měřítkem tlaku vynoření zvonu, ale ten je zavěšen na sklonné váze, která je zdrojem kompenzační síly. Zdvih zvonu se ozubeným převodem přenáší na otočný ukazatel se stupnicí kalibrovanou v hodnotách měřeného tlaku.

Obr. 4.3 zobrazuje schéma zvonového tlakoměru k měření tlakových rozdílů. Tlakoměr je vybaven indukčním vysílačem pro dálkový přenos signálu. Kompenzační síly je dosaženo pomocí pružiny. Výměnou této pružiny lze měnit měřicí rozsah přístroje.

4.3. Pístový manometr [1, 2, 4, 9]

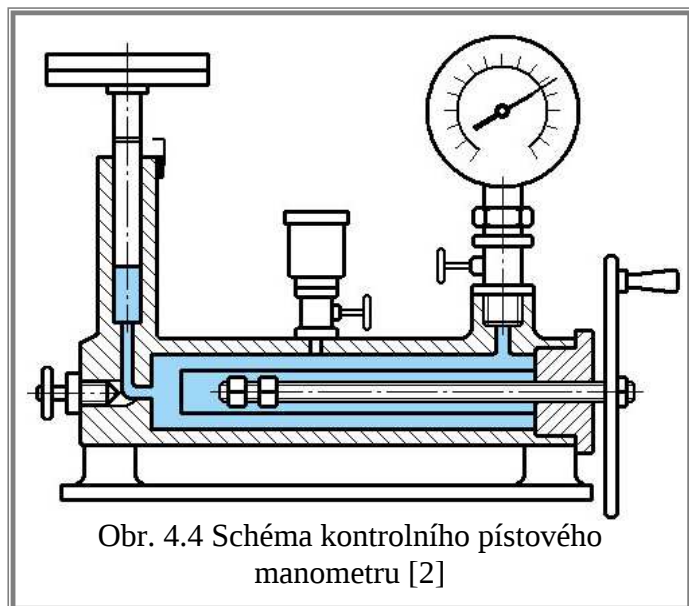
Jedná se o etalonový přístroj, používající se téměř výhradně ke kalibraci deformačních tlakoměrů v rozsahu 40 kPa ÷ 2 GPa. Tlak přivedený na jednu stranu pístu, je vyrovnáván vnější silou, působící na druhou stranu pístu. Ta je určena buď hodnotou závaží, nebo deformací cejchované pružiny, což je méně přesné.

Pístové manometry fungují dle definice tlaku jako podíl síly F působící na jednotkovou plochu S dle rovnice:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad (4.3)$$

Skládá se z olejového čerpadla, nádoby s olejem a pístu přesného průřezu opatřeného talířem, na který se umísťuje závaží. Píst je po celé délce zalapován ve válci. Mírou měřeného tlaku zavedeného do válce je pak zatížení tohoto pístu. U provozního pístového tlakoměru je kompenzační síla vyvozována pružinou.

Při měření vysokých tlaků, kdy by byla buď příliš velká vyvažovací síla, nebo příliš malý průměr pístu, se používá multiplikátor. Podstatou multiplikátoru je diferenční píst, na nějž z obou stran působí přetlaky p_1 a p_2 . Přetlak p_1 je vyvozen buď působením sloupce kapaliny, nebo jednoduchým pístovým tlakoměrem.



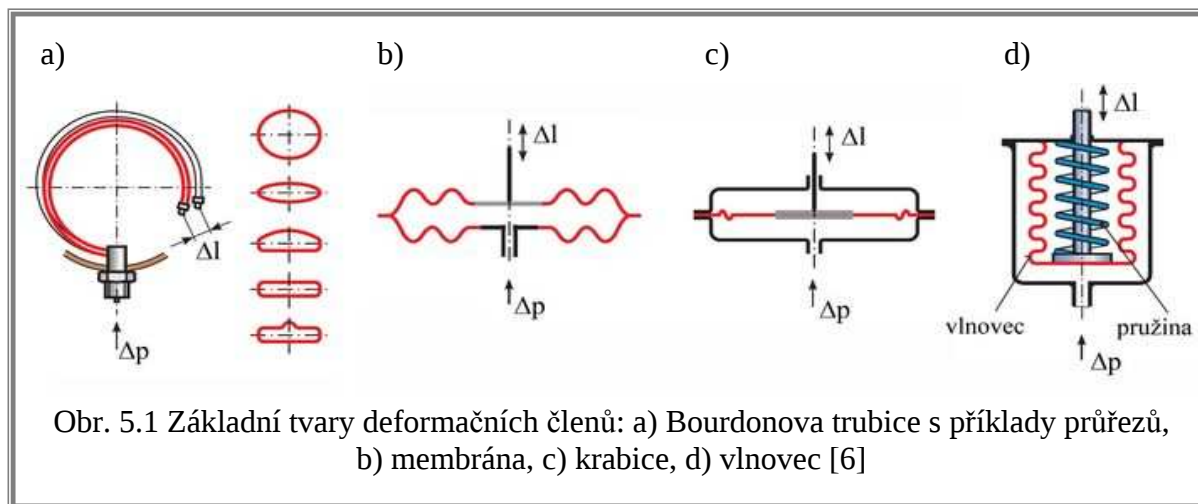
Výhodou tohoto přístroje je, že lze potlačit libovolnou část rozsahu použitím přídavného závaží. Pro převod na elektrický signál je možno použít libovolného snímače tlakové síly.

4.4. Použití pístových a zvonových tlakoměrů [1, 2, 4, 5]

Pístové tlakoměry používáme zejména v laboratorních provozech pro ověřování a kalibraci tlakoměrů deformačních v rozsahu 40 kPa ÷ 2 000 MPa (obr. 4.5). Podobně jako pístový tlakoměr může sloužit i zvonový tlakoměr ke kalibraci jiných tlakoměrů, v tomto případě s rozsahem do 1 000 Pa. Má vysokou přesnost a značnou přestavovací sílu.

5. DEFORMAČNÍ TLAKOMĚRY [1, 2, 4, 5]

Funkční princip deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci a tím na změně geometrického tvaru tlakoměrných prvků vlivem působení měřeného tlaku. Toto namáhání musí být v rozsahu pružných deformací. Nejčastěji používané deformační členy jsou Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec (obr. 5.1).



Deformační prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu a dalších vhodných slitin. Výchylka je příliš malá, proto se zpracovává buď převodem na přímý ukazatel, nebo se deformace snímá elektricky (indukčně, kapacitně, piezoelektricky apod.)

Výhody deformačních tlakoměrů:

- velká přestavující síla umožňující použití přídatného zařízení pro dálkový přenos informací
- malé rozměry a malá hmotnost
- robustnost provedení
- jednoduchost a spolehlivost v provozu
- jednoduchá obsluha i údržba
- velký měřicí rozsah
- dostatečná přesnost

Nevýhody deformačních tlakoměrů:

- elastické dopružování
- trvalé deformace měřicího prvku během provozu

Odstranění nevýhod lze docílit použitím dokonale vystárlého materiálu deformačních prvků nebo použitím umělého stárnutí. Tím se materiál zbaví vnitřního pnutí a pružné vlastnosti se potom nemění.

Při měření je nutno zajistit, aby teplota měřicího prvku a převodů nepřesáhla hodnotu 80 °C. Teplota totiž ovlivňuje modul pružnosti deformačního členu a teplotní roztažnost převodového ústrojí mění mechanický převod. Měřicí rozsah je nutno volit tak, aby pomalu kolísající tlak nepřekročil dvě třetiny maximálního tlaku (rozsahu tlakoměru) a rychle se měnící tlak nepřekročil jeho polovinu.

Protože se nejedná o tzv. definiční přístroje, je nutné všechny deformační tlakoměry kalibrovat a ověřovat. Např. pomocí kontrolního pístového tlakoměru.

Dle konstrukčního provedení se deformační tlakoměry dělí na:

- *trubicové* - k měření podtlaků, vakua a přetlaků
- *membránové* - k měření podtlaků, vakua, přetlaků a tlakových rozdílů
- *vlnovcové* - k měření podtlaků, přetlaků a tlakových rozdílů
- *krabicové* - k měření podtlaků, přetlaků a tlakových rozdílů

5.1. Trubicový tlakoměr [1, 4, 5]

Tyto tlakoměry nazývané také jako Bourdonovy jsou nejpoužívanějším typem deformačních tlakoměrů. Deformačním prvkem je trubice oválného průřezu, stočená do kruhového oblouku, spirály nebo šroubovice. Otevřeným koncem je trubice pevně spojena s tělesem tlakoměru a do tohoto konce se přivádí měřený tlak. Druhý konec trubice je uzavřen a spojen mechanickým převodem s ukazatelem na stupnici.

Při působení měřeného tlaku p se průřez trubice deformuje a poloměr zakřivení oblouku r , do kterého je trubice stočena, se přitom zvětšuje o Δr . Posunutí volného konce φ je úměrné měřenému tlaku. Uspořádání měřicího prvku trubicového tlakoměru je znázorněno na obr. 5.3.

Pro nízké tlaky je trubice z mosazi nebo bronzu a je velmi zploštělá, pro vysoké tlaky je z oceli a blíží se kruhovému profilu. Měřicí rozsahy trubicových tlakoměrů bývají $(0 \div 200)$ MPa (výjimečně 2 GPa).

Vyrábějí se jako tlakoměry kontrolní ve třídách přesnosti 0,4 - 0,6 - 1,0 a jako provozní tlakoměry ve třídách přesnosti 1,6 - 2,5 - 4 - 6 - 10 - atd. K převodu na elektrický signál se používá odporových tenzometrů, které se lepí na stěnu trubice v podélném nebo tečném směru.

Popis k obr. 5.3:

a ...šířka profilu

b ...délka profilu

r ...poloměr zakřivení

φ ...středový úhel

Δa ...změna šířky profilu

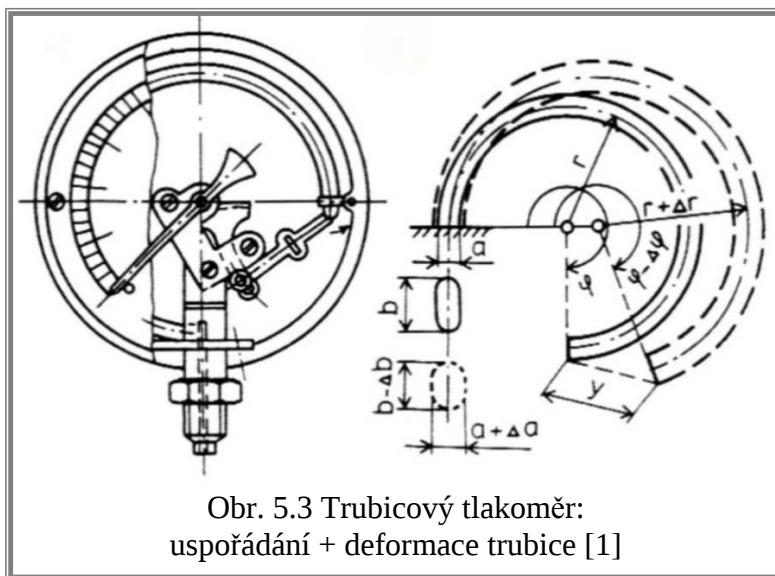
Δb ...změna délky profilu

Δr ...změna poloměru

$\Delta \varphi$...změna středového úhlu



Obr. 5.2 Trubicový tlakoměr
provozní firmy Prematlak [12]



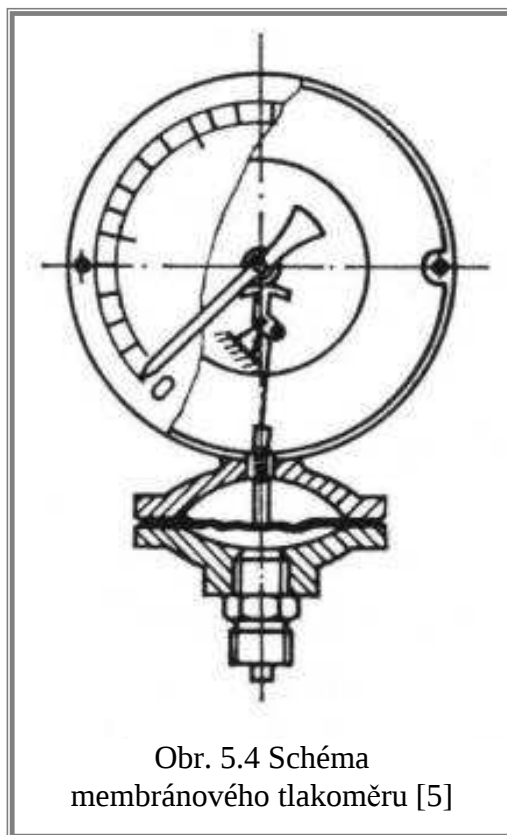
Obr. 5.3 Trubicový tlakoměr:
uspořádání + deformace trubice [1]

5.2. Membránový tlakoměr [1, 2, 4, 5]

Tlakoměrným prvkem je membrána kruhového tvaru zvlněná soustřednými vlisy. Jedná se o membránu s vlastní tuhostí (není vybavena pružinou, která by určovala její tuhost). Membrána je po obvodu sevřena mezi přírubami a z jedné strany je přiváděn měřený tlak. Ten vyvolá průhyb membrány a mechanickým převodem se převádí na úhlové natočení ručičky ukazatele (obr. 5.4).

Deformace membrány je ještě menší než deformace trubice u Bourdonských tlakoměrů, proto musí být použitý mechanický převod větší. Závislost zdvihu na měřeném tlaku je přibližně lineární. Membránové tlakoměry se vyrábějí pro tlaky do 4 MPa. Klasická konstrukce tlakoměru má komoru s membránou umístěnou pod mechanismem ukazatele.

Pro měření malých tlaků se využívá tenké pryžové membrány s textilní vložkou s kovovými příložkami, kde je deformačním prvkem pružina z ocelového drátu. Snímače tlaku s tenkou membránou se vyznačují velkou citlivostí. Pro snímání průhybu membrány se většinou používá kapacitní metody.



Obr. 5.4 Schéma membránového tlakoměru [5]



Obr. 5.5 Membránový tlakoměr průmyslový firmy Ramses [8]

Pro měření vyšších tlaků se používají tuhé membrány (kruhové desky). Pro převod měřeného tlaku na elektrický signál se používá u tuhých membrán především principu kapacitního a indukčního měření výchylky.

Speciálním použitím membránových tlakoměrů je měření tlakových rozdílů (diferenční tlakoměry) a to v rozsahu do 0,5 MPa při měření statického tlaku do 50 MPa. V těchto případech jsou membrány chráněny proti poškození při jednostranném přetížení. Membrány jsou kovové a komora je vyplněna tlumící kapalinou (destilovaná voda, olej, atd.).

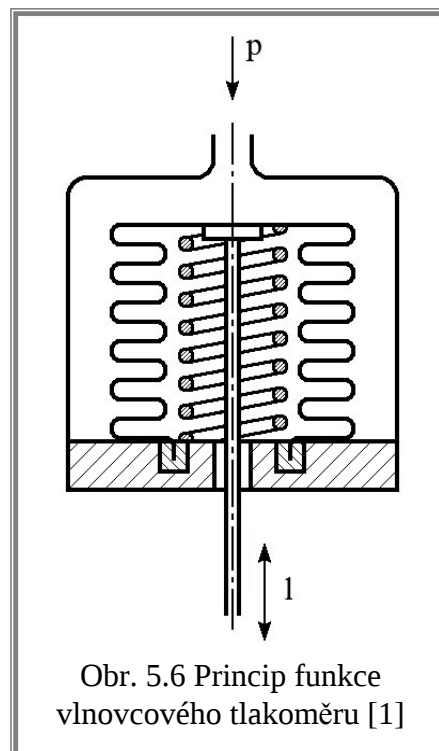
Výhodou membránových tlakoměrů jsou malé hmotnosti jejich částí, tím je malá setrvačná hmotnost membrány, a proto je možnost je použít v provozech s otřesy a chvěním. Takové snímače jsou vhodné i pro měření rychle pulzujících tlaků. Další výhodou je vyšší citlivost měření než u trubicových tlakoměrů.

5.3. Vlnovcový tlakoměr [1, 4, 5]

Tlakoměrným prvkem je kovový měch - vlnovec, který je umístěn v pouzdře. Měřený tlak musí působit vně vlnovce, při měření tlakového rozdílu musí vně vlnovce působit větší tlak. Působením tlaku se vlnovec deformuje (mění svou délku). Deformace vlnovce l se přenáší táhlem na ukazatel. Odolnost proti deformaci (tuhost vlnovce) lze snadno zvětšit vložením pružiny, jak je vidět na obr. 5.6. Dojde tak k úpravě statické charakteristiky, kterou určuje právě pružina uvnitř vlnovce, a měřicího rozsahu tlakoměru.

Někdy se místo kovového měchu používá měch z umělé hmoty (např. teflonu). Funkci deformačního prvku pak zcela přebírá pružina. Měřicí rozsah je do 0,4 MPa tlaku nebo tlakového rozdílu při statickém tlaku max. 2,5 MPa.

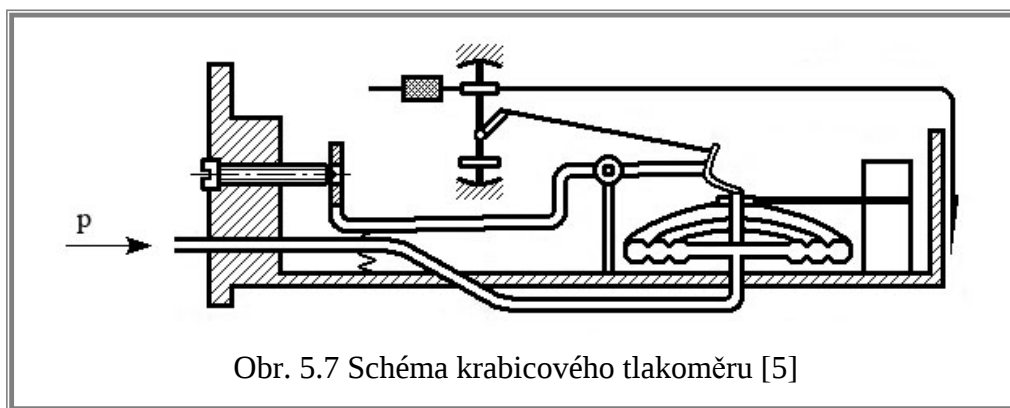
Hlavní použití kovových vlnovců s pružinou je v regulační technice, kde se jich používá v pneumatických vysílačích, převodnících, přijímačích atd.



Obr. 5.6 Princip funkce vlnovcového tlakoměru [1]

5.4. Krabicový tlakoměr [1, 4, 5]

Je to v podstatě membránový tlakoměr, u kterého se zvětšení síly a zdvihu dosahuje zvětšením plochy membrány, protože jediná membrána dává při měření tlaku poměrně malý zdvih. Tlakoměrným prvkem je plochá krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami o průměru 50 mm až 100 mm (obr. 5.7).



Obr. 5.7 Schéma krabicového tlakoměru [5]

Deformace krabice se převádí na ukazatel mechanickým (pákovým) převodem. K převodu výchylky krabice na elektrický signál musí být použito snímače s minimálním silovým zatížením, protože přestavující síla je malá.

Krabicové tlakoměry se používají pro měření malých přetlaků, podtlaků či tlakových diferencí. Měřicí rozsah bývá $(10 \div 1\,000)$ Pa. Tlakoměrné krabice se používá i v přístroji sloužícím pro měření barometrického tlaku, v tzv. aneroidu. V tomto případě je prostor krabice neprodyšně uzavřen, vakuován a měřený barometrický tlak působí na krabici zevnějšku.



5.5. Použití deformačních tlakoměrů [1, 2, 4, 5]

Všech typů deformačních manometrů se používá při konstrukci manostatů, které při dosažení požadovaného nebo nastaveného tlaku spínají nebo rozpínají ovládací kontakty regulačního obvodu (obvykle dvoupolohová regulace). Jedná se např. o ovládání kompresoroven, domácích vodáren apod. Kontakty jsou buď mechanické, nebo rtuťové.

Další oblastí použití deformačních tlakoměrů je u tlakových lahví a nádob (například při svařování plynem).

6. ELEKTRICKÉ TLAKOMĚRY [3, 4]

Využívají tlakovou závislost některých elektrických veličin (např. závislost změny elektrického odporu na vysokém tlaku u některých materiálů nebo vodivost vzduchu při vysokém vakuu). Podle principu funkce se používají k měření vysokého vakua nebo velmi vysokých tlaků.

Do skupiny elektrických tlakoměrů řadíme odporové tlakoměry (využívají závislosti odporu vodiče na tlaku) a vakuometry, které se dělí na ionizační (využívají závislosti ionizace plynu na tlaku) a bolometrické (využívají tlakové závislosti tepelné vodivosti plynu v okolí vodiče nebo polovodiče).

6.1. Odporový tlakoměr [1, 3, 4]

Princip měření u odporových tlakoměrů spočívá ve využití tlakové závislosti elektrického odporu. Jelikož se tento jev projevuje pouze při vysokých tlacích, mají měřicí rozsah $80 \text{ MPa} \div 3 \text{ GPa}$.

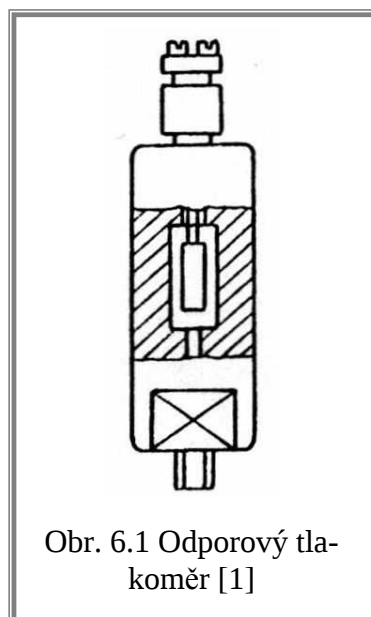
V silnostěnné nádobě je v olejové lázni uložena cívka s navinutým odporovým drátem. Obvyklé materiály drátu jsou manganin, nikelin nebo konstantan. Speciální materiály se používají, aby se vyloučil vliv teploty na změnu odporu. Do nádoby je přiveden měřený tlak, který objemově stlačuje drát, čímž klesá jeho elektrický odpor.

Působí-li na elektrický vodič objemový tlak, je poměrná změna odporu rovna:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_p \cdot p \quad (6.1)$$

kde $\alpha_p [\text{Pa}^{-1}]$ je tlakový součinitel odporu materiálu vodiče (pro manganinový drát $\alpha_p = 26,5 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$), p je měřený tlak

Výhodou je možnost měření v těžko přístupných a vzdálených místech, snadná automatizace měření, vysoká přesnost. Nevýhodou je složitější konstrukce a vyšší cena.



Obr. 6.1 Odporový tlakoměr [1]

6.2. Ionizační vakuometr [2, 3, 4, 10]

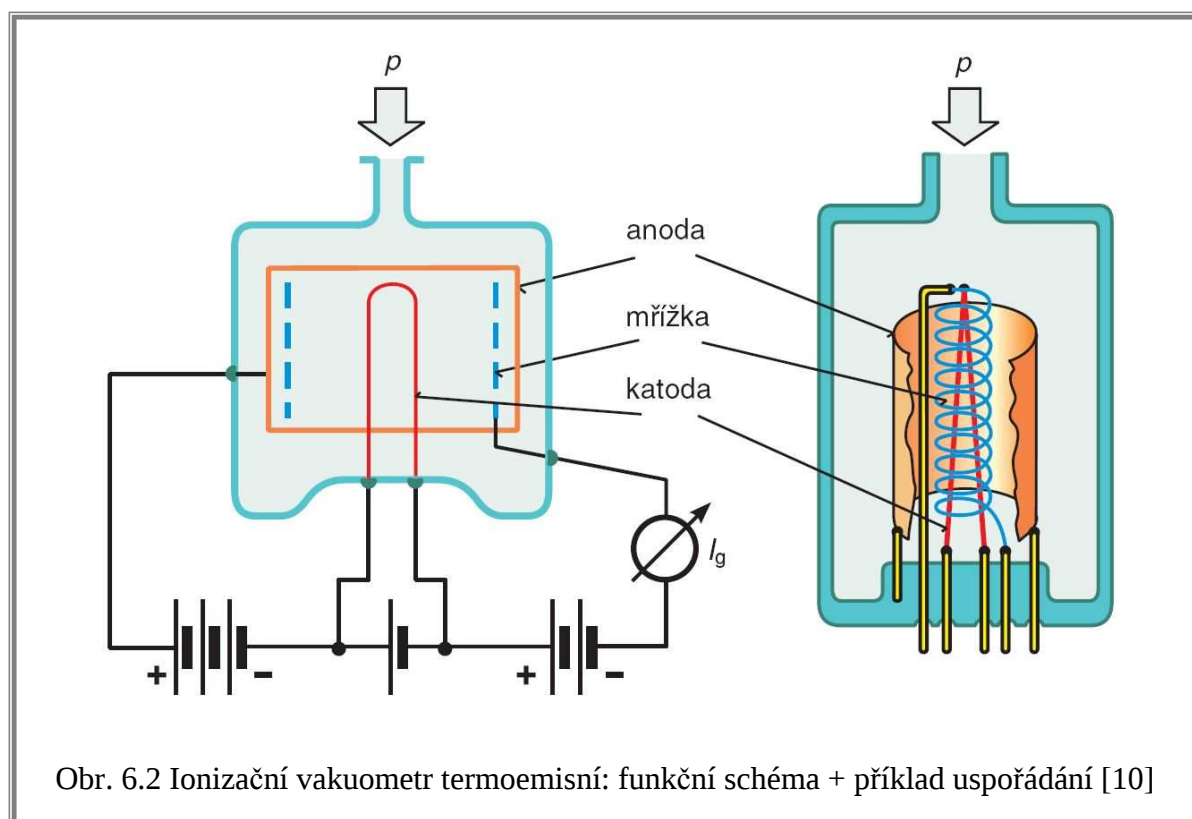
Ionizační vakuometry využívají elektrickou ionizaci molekul v měřeném prostředí a jsou vhodné pro měření velmi malých tlaků až do 10^{-10} Pa. Je u nich využito různých způsobů ionizace (termoemise, doutnavý výboj, radioaktivní zdroj).

Ionizační vakuometr termoemisní je v podstatě otevřená trioda (obr. 6.2), do jejíhož prostoru je přiveden měřený tlak. Žhavená katoda emituje proud elektronů (od několika μA do 1 mA), které jsou přitahovány napětím k anodě a narážejí do molekul vzduchu, z jejichž obalu vyraží elektrony.

Mřížka mezi anodou a katodou přitahuje záporným předpětím takto ionizované molekuly vzduchu, čímž je generován mřížkový proud I_g , přímo úměrný počtu molekul zbytkového plynu. Ten je pak mírou absolutního tlaku p_a . Rozsah měření je ($10^{-8} \div 10^{-1}$) Pa absolutního tlaku s přesností cca 10%.

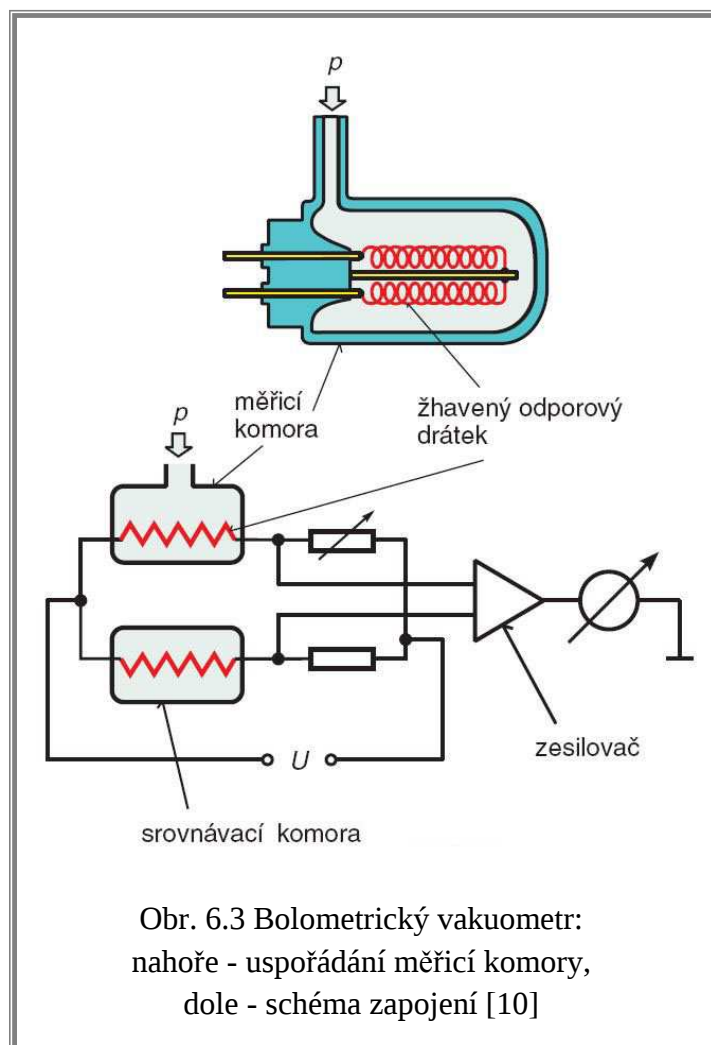
Závislost mřížkového proudu I_g na měřeném tlaku udává vztah:

$$I_g = k \cdot I_a \cdot p_a \quad (6.2)$$



Ionizační vakuometr se studenou katodou (Peningův) obsahuje dvě chladné elektrody (anodu a katodu), mezi nimiž je vysoké stejnosměrné nebo střídavé napětí ($2 \div 5$ kV). Při malém absolutním tlaku vzniká mezi elektrodami velmi řídký doutnavý výboj, který je podpořen magnetickým polem. Elektrony se tak pohybují jen v malém prostoru snímače a mohou plyn několikrát ionizovat. Základní měřicí rozsah je ($10^{-3} \div 10^{-1}$) Pa.

6.3. Bolometrický vakuometr [3, 4, 10]



Bolometrický vakuometr využívá tlakovou závislost tepelné vodivosti plynu. Ve skleněné nebo kovové nádobce, do které je přiváděn měřený tlak, je zataven platinový, wolframový nebo niklový tenký drátek stočený do spirálky. Tento drátek je vyhříváný elektrickým proudem na teplotu 200 až 300 °C (obr. 6.3).

Molekuly plynu v nádobce pak žhavený odporový drátek ochlazují. Spirálka je zapojena do jednoho ramene Wheatstonova můstku, do jehož druhého ramene je zapojena podobná spirálka umístěná v uzavřené komoře. Tato spirálka kompenzuje teplotní vliv při měření.

Měřítkem absolutního tlaku je teplota spirálky v měřicí komoře, která se vyhodnocuje jako změna elektrického odporu. Měřicí rozsah bolometrického vakuometru je $10^{-4} \div 100$ Pa. Pro měření absolutních tlaků nad 100 Pa nelze použít, protože při vyšších tlacích se tepelná vodivost plynu s tlakem téměř nemění.

6.4. Použití elektrických tlakoměrů [1, 3, 4, 10]

V průmyslu se elektrické tlakoměry používají k měření extrémních hodnot tlaků. Buď k měření velmi malých absolutních tlaků tedy velkého vakua (ionizační a bolometrické vakuometry), nebo k měření velkých přetlaků (odporové tlakoměry).

7. ZÁVĚR

Způsobů jak zjišťovat tlak je mnoho. Tato práce se zabývá jeho měřením pomocí tlakoměrů kapalinových, pístových a zvonových, deformačních a elektrických.

Tlakoměry kapalinové jsou přesné, spolehlivé, avšak často zastaralé přístroje, které neposkytují výstupní signál vhodný pro přenos dat. Proto se s nimi nejčastěji měří v laboratořích a také slouží jako přesné barometry. Tlakoměry pístové a zvonové se používají zejména pro ověřování a kalibraci tlakoměrů deformačních. Nejvíce používaným typem tlakoměrů ve strojírenských provozech jsou tlakoměry deformační. Používají se u všech typů tlakových nádob a lahví, při konstrukci manostatů v regulačních obvodech, apod. Elektrickými tlakoměry pak měříme extrémní vakua nebo velké přetlaky.

Vývoj těchto tlakoměrů je zaměřen zejména na snadnější odečítání hodnot a možnost poskytnutí výstupního signálu. U deformačních manometrů je mechanické zobrazovací zařízení nahrazováno digitálním displejem.

Největšího rozmachu však v současnosti dosahují tlakové senzory a snímače. Do této skupiny patří jednoduché senzory tlaku (OEM), jednoduché snímače tlaku a inteligentní snímače tlaku (SMART). Jejich hlavní výhodou je jejich velikost (velmi malé), snadná montáž, možnost dálkové regulace za provozu a výstupní signál (dnes už i bezdrátový) vhodný pro další zpracování na počítači.

Největší vývoj tedy očekávám zejména v oblasti tlakových snímačů. Na typy tlakoměrů uvedených v této práci, se už vývoj asi příliš nezaměří.



SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČECH, Jaroslav, PERNIKÁŘ, Jiří, PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie*. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
- [2] KŘÍŽ, Rudolf, VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka - 2. Sv. D : Měřicí technika a bezdemontážní diagnostika*. 1. vyd. Praha : SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993. 224 s. ISBN 80-85827-00-X.
- [3] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. vyd. Praha : SNTL, 1983. 371 s.
- [4] JENČÍK, Josef, VOLF, Jaromír. *Technická měření*. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
- [5] *Měření mechanických veličin : Měření tlaku* [online]. [2003] [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce_tlak.htm>.
- [6] KADLEC, Karel. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA* [online]. 2007, č. 2 [cit. 2009-02-23], s. 28-31. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au020728.pdf>>. ISSN 1210-9592.
- [7] DROBÍLEK, Jakub. *Měření tlaku s podporou počítače*. Brno, 2007. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc. Dostupný z WWW: <http://uai.fme.vutbr.cz/szz/2007/BP_Drobilek.pdf>.
- [8] *Ramses - sdružení : Měřicí a regulační technika* [online]. [2006] , 24. února 2009 [cit. 2009-04-29]. PDF katalog firmy Ramses. Dostupný z WWW: <http://www.ramses.cz/files/katalog/tlakomery/tlakomer_s_oddelovaci_membranou_prumyslovsky_sk.pdf>.
- [9] *Měření tlaku* [online]. [2003] [cit. 2009-03-25]. Dokument Word. Dostupný z WWW: <www.kod.tul.cz/info_predmety/Aov/TLAK02.DOC>.
- [10] KADLEC, Karel. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 4). *AUTOMA* [online]. 2007, č. 11 [cit. 2009-02-23], s. 42-46. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>>. ISSN 1210-9592.
- [11] *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity : Laboratorní technika* [online]. Brno : 2007-2008 [cit. 2009-02-25]. WWW stránka. Dostupný z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pages/manometr.html>>.
- [12] *MaR Systems : Měření a regulace* [online]. c2007 [cit. 2009-04-29]. PDF katalog firmy Prematlak. Dostupný z WWW: <<http://www.marsystems.cz/index.php?page=Tlakom%C4%9Bry&id=2>>.
- [13] VDOLEČEK, František. Snímače tlaku. *AUTOMA* [online]. 2000, roč. 2000, č. 4 [cit. 2009-02-25], s. 00-01. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27665>. ISSN 1210-9592.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	Šířka profilu	[m]
b	Délka profilu	[m]
dF	Elementární síla	[N]
dS	Elementární plocha	[m ²]
e	Převodní číslo (převod) tlakoměru	[-]
e'	Převodní číslo tlakoměru při zvětšení měřicího rozsahu	[-]
F	Síla	[N]
F_e	Vnější řídící síla	[N]
F_i	Vnitřní řídící síla	[N]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
h	Výška	[m]
I_a	Anodový proud	[A]
I_g	Mřížkový proud	[A]
k	Konstanta tlakoměru	[Pa·m ⁻¹]
k'	Konstanta tlakoměru při zvětšení měřicího rozsahu	[Pa·m ⁻¹]
L	Výchylka kapalinového sloupce	[m]
l'	Zdvih zvonu	[m]
M	Moment síly	[N·m]
m	Hmotnost	[kg]
p	Tlak	[Pa]
p_1, p_2	Tlak měřeného prostředí	[Pa]
p_a	Absolutní tlak	[Pa]
p_b	Barometrický tlak	[Pa]
p_c	Celkový tlak	[Pa]
p_d	Dynamický tlak	[Pa]
p_s	Statický tlak	[Pa]
R	Elektrický odpor	[Ω]
r	Poloměr zakřivení	[m]
R'	Vnější poloměr prstence	[m]
r'	Vnitřní poloměr prstence	[m]
S	Jednotková plocha	[m ²]
S'	Průřez prstence	[m ²]
S_1	Průřez nádoby	[m ²]
S_1'	Vnitřní plocha dna zvonu	[m ²]
S_2	Průřez trubice	[m ²]
S_2'	Vnější plocha dna zvonu	[m ²]
S_3'	Průřez přídatného vztlakového tělesa	[m ²]
V	Objem před stlačením	[m ³]
v	Objem po stlačení	[m ³]
Δa	Změna šířky profilu	[m]
Δb	Změna délky profilu	[m]
Δp	Tlakový rozdíl	[Pa]
ΔR	Změna elektrického odporu	[Ω]
Δr	Změna poloměru zakřivení	[m]



$\Delta\varphi$	Změna středového úhlu	[°]
α	Úhel sklonu trubice	[°]
α'	Úhel natočení prstence	[°]
α_p	Tlakový součinitel odporu	[Pa ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
ρ_1	Hustota měřeného prostředí	[kg·m ⁻³]
ρ_2	Hustota tlakoměrné kapaliny	[kg·m ⁻³]
φ	Středový úhel	[°]