FAKULTA STROJNÍ TUL

EXPM (část KEZ)

Vybrané způsoby měření tlaku, rychlosti a průtoku

Jan Kracík (jan.kracik@tul.cz)

Měření tlaku – Základní pojmy

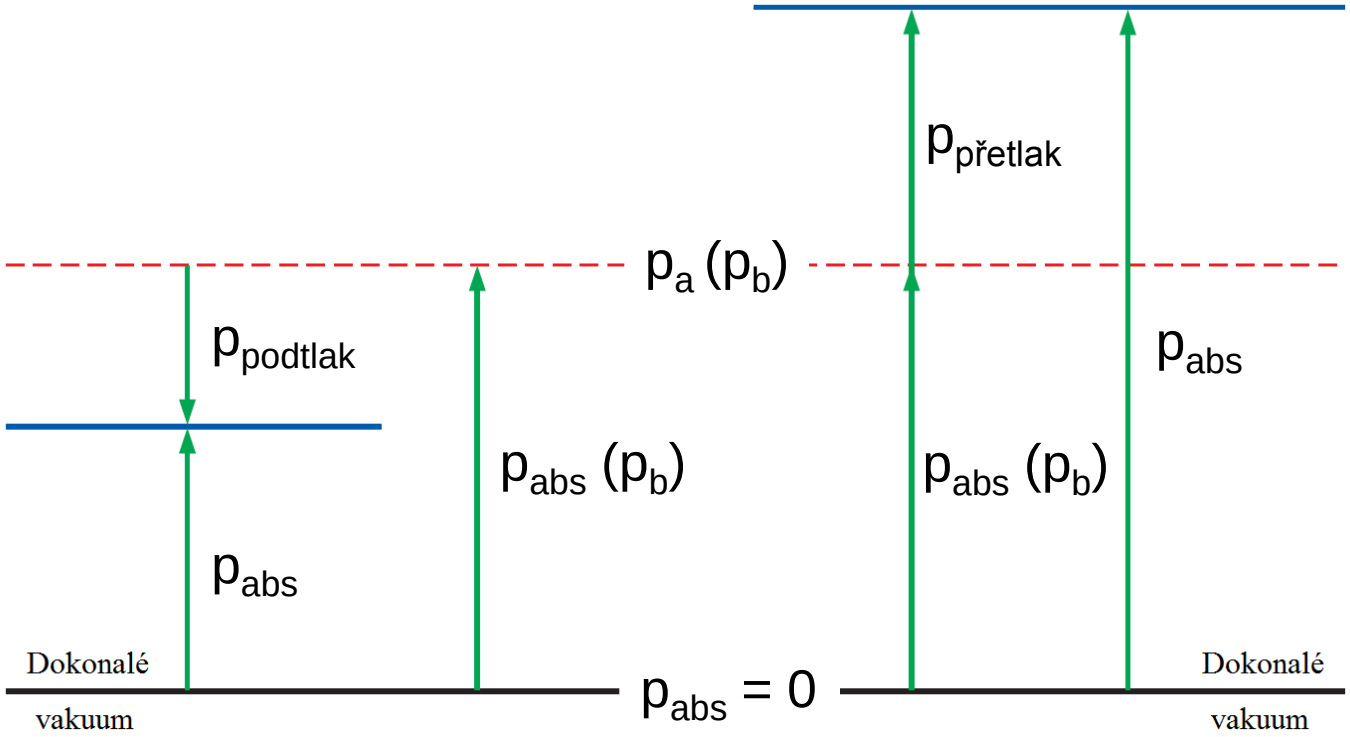
- Tlak můžeme měřit 3 způsoby: **absolutní**, **relativní** a **diferenční**

$$p_{abs} = p_{rel} + p_b$$

- Jednotkou je 1 Pascal (Pa) = (N/m^2) = ($kg/(ms^2)$)
- Jednotky obvykle uváděny bar(a), bar(g), bar(d)
- Přístroje nazýváme **barometry** (pro měření p_b, p_{abs}), **manometry** (pro měření p_{rel} a p_{abs}) nebo obecně **tlakoměry**

Měření tlaku – Základní pojmy

- Tlak můžeme měřit 3 způsoby: **absolutní**, **relativní** a **diferenční,** (barometrický tlak)



Měření tlaku – Základní pojmy (2)

- Definice pomocí základních jednotek SI a **hydrostatického tlaku**

$$\mathrm{p} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{S}} = \frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}^2}$$

$$(Pa) = \frac{(N)}{(m^2)} = \frac{(kg)\left(\frac{m}{s^2}\right)}{(m)(m)} = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

$$\mathrm{p} = \mathrm{h}\rho\mathrm{g}$$

$$(Pa) = (m)\left(\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{m}{s^2}\right) = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

Měření tlaku – Základní pojmy (3)

- **Celkový** tlak, **statický** tlak, **dynamický** tlak

$$p_{celk} = p_{stat} + p_{dyn}$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Měření tlaku – Základní dělení

Tradiční tlakoměry

- Kapalinové a mechanické

Tlakové snímače (převodníky)

- Obvykle elektro-mechanický princip
- Membránové, tenzometrické, piezoelektrické, kapacitní, LVDT

Tlakoměry pro měření nízkých tlaků (vakuometry)

- Využití specifických fyzikálních principů (tepelná vodivost, ionizace, stlačitelnost)

Tradiční tlakoměry

- Většinou **nemají elektrický výstup** (analogový manometr, závažová pumpa pro kalibraci, Bourdonova trubice, měchy, pružiny apod.)

- Žádný z těchto měřidel **není obvykle vhodný pro dynamické měření** tlaku (rychlé změny tlaku v čase)

Tradiční tlakoměry – U-Manometr

- Jedná se o jeden z nejjednodušších tlakoměrů
- Patří do skupiny kapalinových tlakoměrů
- **Průhledná** skleněná nebo plastová **trubice** ve tvaru písmene „U“ **částečně naplněná kapalinou**
- Použit nejčastěji pro měření relativního a diferenčního tlaku kapalin i plynů
- Pokud je měřená látka kapalina, **musí být kapalina v tlakoměru s měřenou kapalinou nemísitelná a mít vyšší hustotu!**
- Nutný **odečet 2 pozic** hladiny kapaliny

Tradiční tlakoměry – U-Manometr (2)

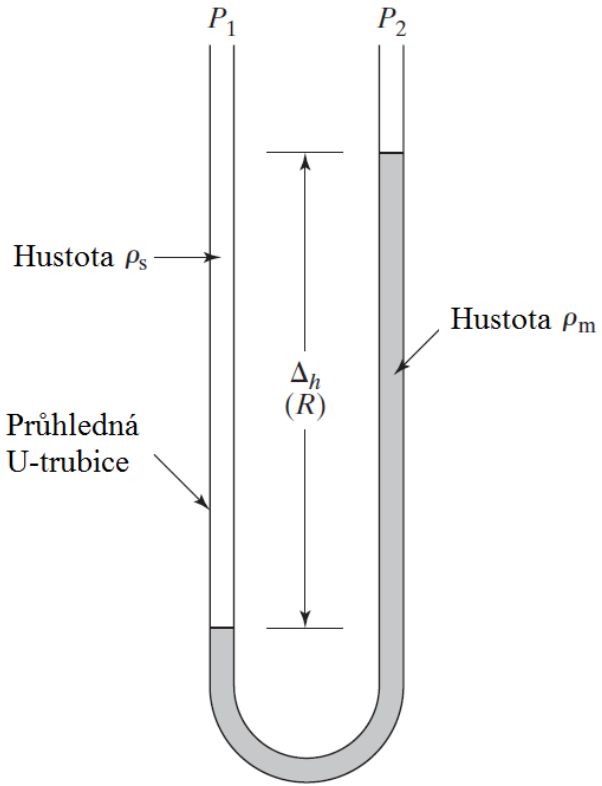
- Často je kapalina v tlakoměru obarvena barvivem
- Tlak obvykle vyjadřován v mmH_2O nebo mmHg
- V těchto případech je **nutné znát ještě teplotu kapaliny v tlakoměru**, protože ta má vliv na její hustotu
- Například rozdíly v hustotě vody v rozmezí teplot 10°C až 40°C jsou až 0.75 %
- Často je používána hustota vody při teplotě 4°C (1000 kg/m^3)
- U-manometry jsou obvykle **přesné i bez kalibrace** (nutná korekce na danou teplotu, tepelnou roztažnost, stupnice pro odečet)

U-Manometr – Princip, ukázka

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta h(\rho_m - \rho_s)g$$

$$\Delta p = \Delta h \rho_m g \quad \ldots\ldots \quad \rho_m \gg \rho_s$$

$$\Delta h = R = \frac{\Delta p}{\Delta \rho g}$$





Tradiční tlakoměry – Nádobkový manometr

- Princip vychází z U-manometru
- **Odečet pouze 1 pozice** hladiny kapaliny (v trubici)
- Průřez nádobky 10x – 500x větší než průřez trubice
- Změna hladiny v nádobce je podstatně menší oproti změně hladiny v trubici
- Požadavek na konstantní průřezy nádobky (A_1) a trubice (A_2) – nutná kalibrace!

Tradiční tlakoměry – Nádobkový manometr

- Princip vychází z U-manometru
- **Odečet pouze 1 pozice** hladiny kapaliny (v trubici)
- Průřez nádobky 10x – 500x větší než průřez trubice
- Změna hladiny v nádobce je podstatně menší oproti změně hladiny v trubici
- Požadavek na konstantní průřezy nádobky (A_1) a trubice (A_2) – nutná kalibrace!

$$V_1 = V_2$$

$$\Delta h_1 A_1 = \Delta h_2 A_2$$

Nádobkový manometr – Princip, ukázka

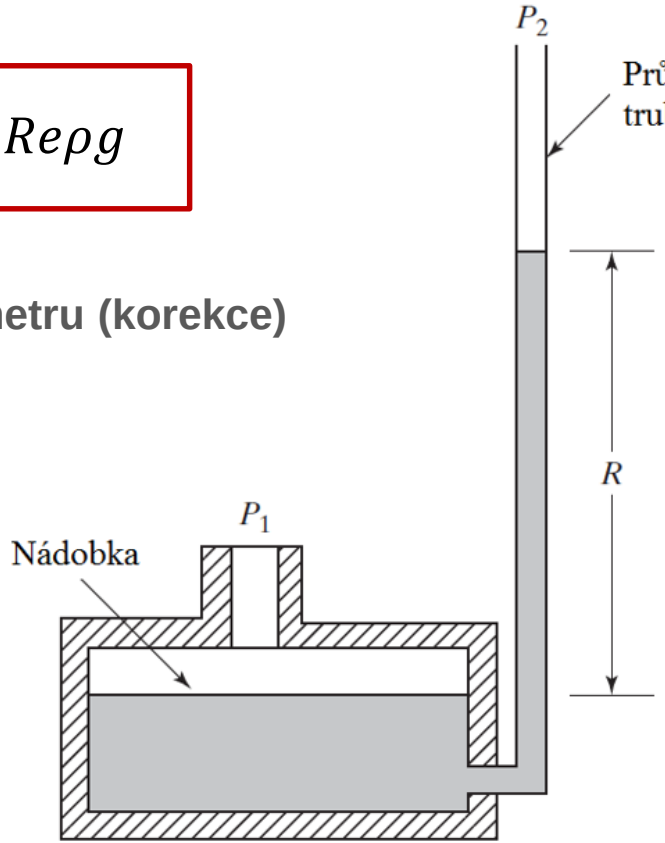
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta h \rho g = R e \rho g$$

- Konstanta **e je převod manometru (korekce)**

$$e = 1 + \frac{A_2}{A_1}$$

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$$

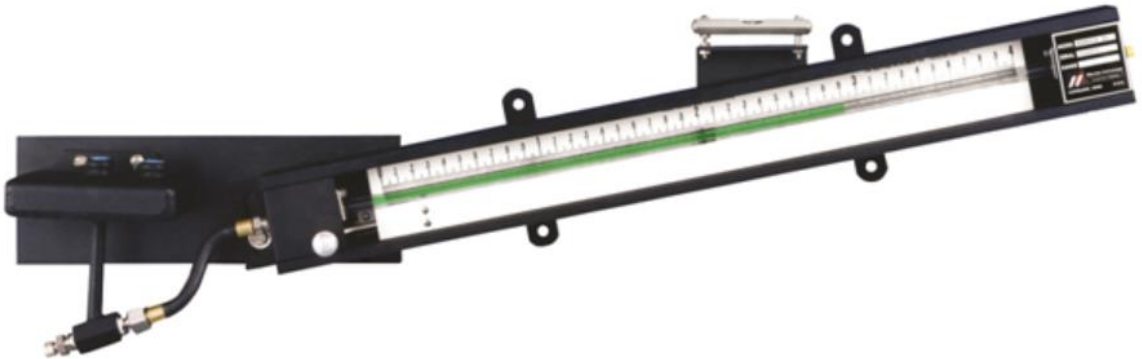
$$\Delta h_2 = R$$





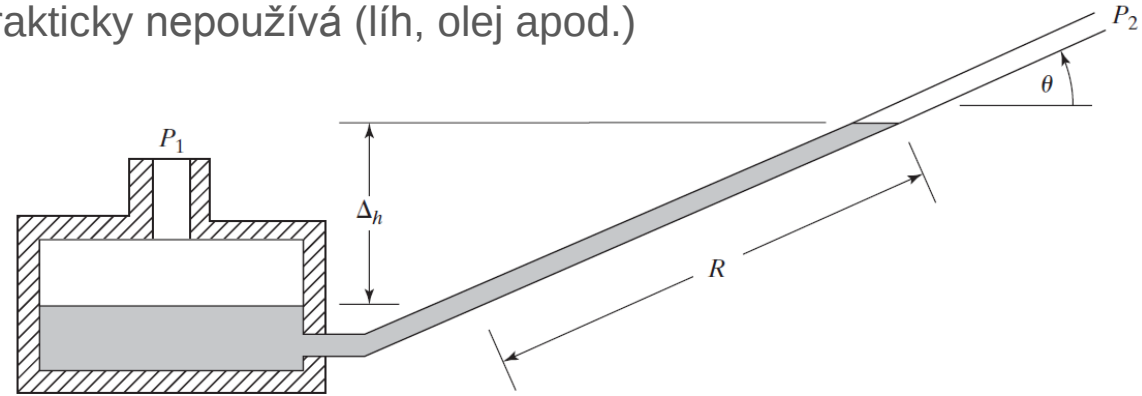
Tradiční tlakoměry – Sklonný manometr

- Princip vychází z U-manometru
- **Odečet pouze 1 pozice** hladiny kapaliny
- **Pro úpravu rozsahu a zvýšení citlivosti => vyšší přesnost**
- Rtuť se pro tento typ prakticky nepoužívá (líh, olej apod.)



Tradiční tlakoměry – Sklonný manometr

- Princip vychází z U-manometru
- **Odečet pouze 1 pozice** hladiny kapaliny
- **Pro úpravu rozsahu a zvýšení citlivosti => vyšší přesnost**
- Rtuť se pro tento typ prakticky nepoužívá (líh, olej apod.)

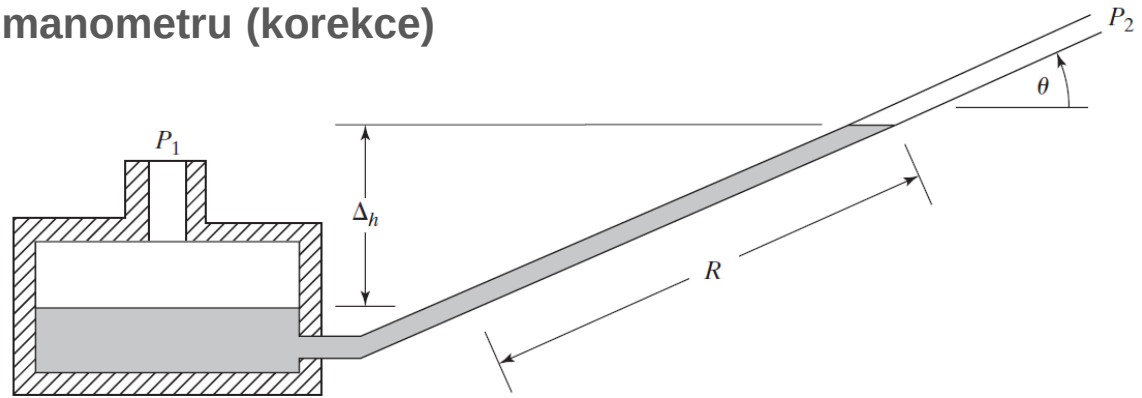


Sklonný manometr - Princip

$$\Delta h = R sin\theta$$

$$\Delta p = \Delta h e \rho g = R sin\theta e \rho g$$

- Konstanta ***e* je převod manometru (korekce)**

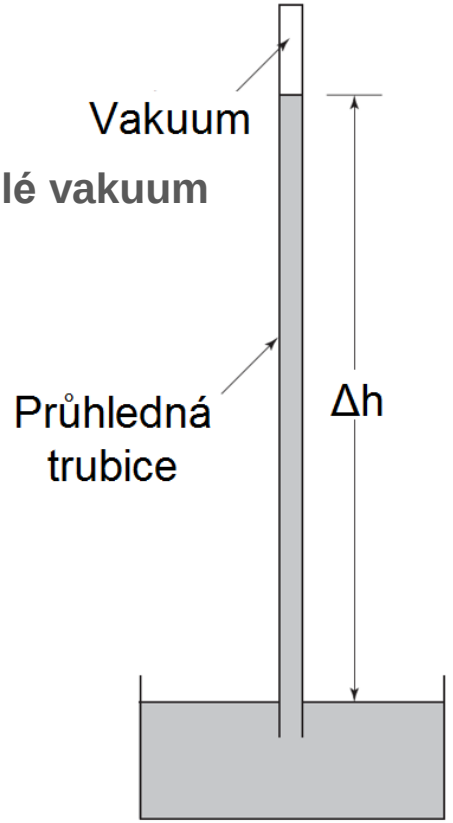


Tradiční tlakoměry – Barometr (staniční)

- Princip vychází z nádobkového manometru
- **Jeden z konců je utěsněn a prostor v něm tvoří téměř dokonalé vakuum**
- Jako kapalina se používá rtuť

$$\Delta h = \frac{p_{atm}}{\rho_{Hg} g e}$$



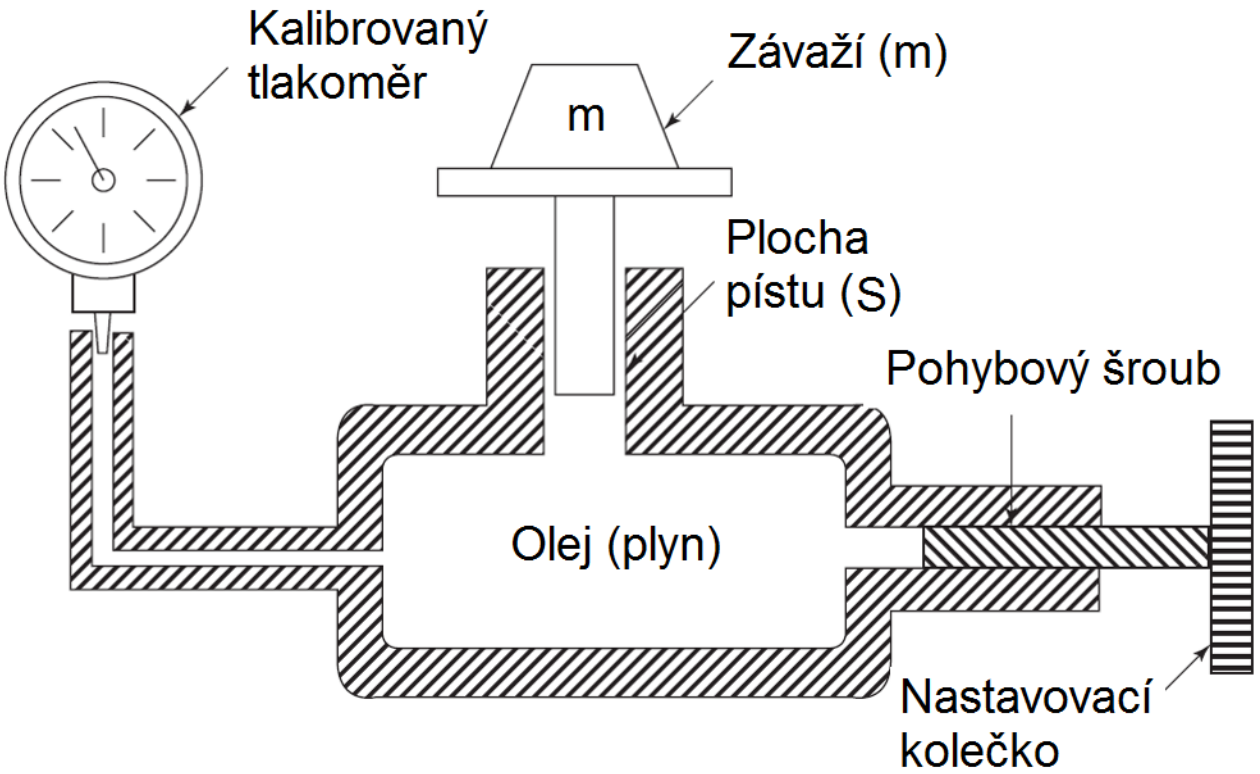


Tradiční tlakoměry – Pístový tlakoměr

- Tzv. závažová pumpa
- Vnitřní komora naplněna tekutinou
- Kapalinou může být olej, v případě plynu se používá upravený vzduch či dusík
- Především je **používán pro** přesnou **kalibraci** ostatních manometrů či snímačů tlaku
- Vychází ze základního principu **definice tlaku, síly a Pascalova zákona**
- **Tlak tekutiny v komoře je porovnáván s tlakem vyvozeným závažím**

Pístový tlakoměr – Princip

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S}$$



Pístový tlakoměr – Ukázky





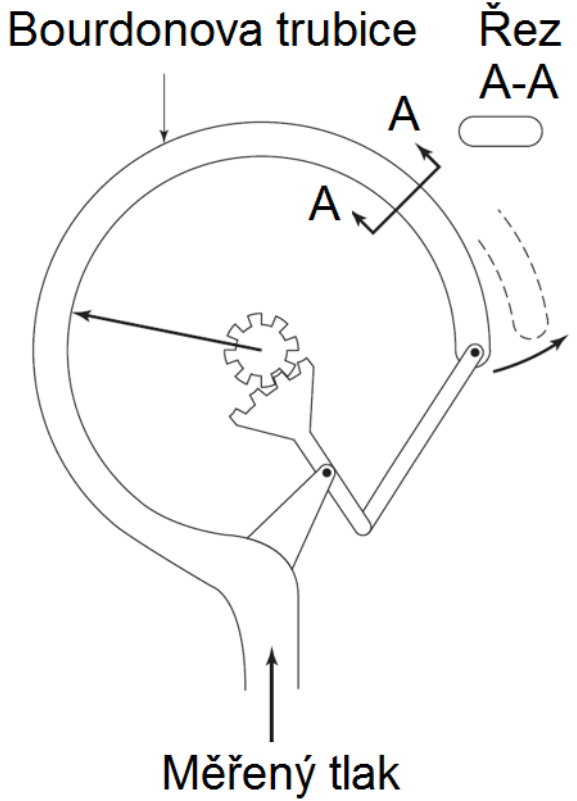
Tradiční tlakoměry – Deformační manometr

- Patří do skupiny tlakoměrů s tuhými členy (převodový mechanismus)
- Nejčastěji v analogovém provedení s ukazatelem, ale je možné i digitální provedení
- Výhodou je **okamžitý odečet hodnoty** tlaku většinou **bez nutnosti elektrického napájení**
- **Deformovaným členem** může být **Bourdonova trubice, vlnovec nebo membrána** apod.

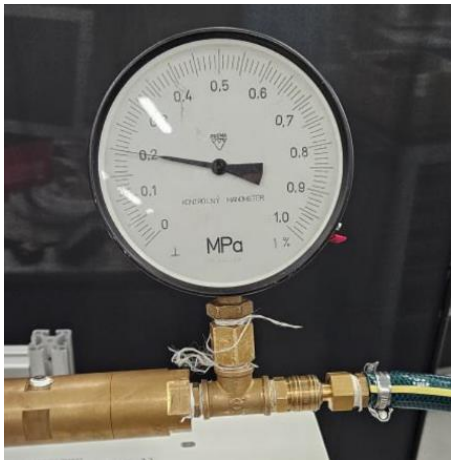
Tradiční tlakoměry – Deformační manometr (2)

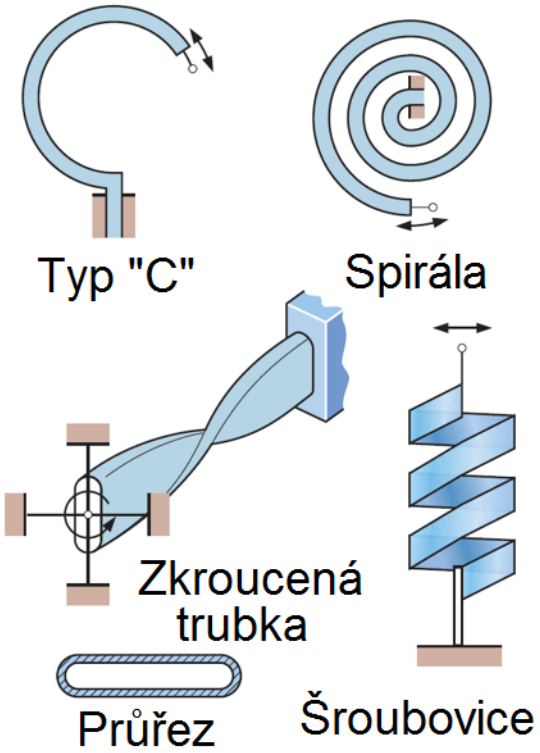
- Levné varianty mají přesnost nižší, obvykle ±5 % z rozsahu
- Dražší varianty mají přesnost vyšší, může být až ±0.5 % z rozsahu
- Pro **široký rozsah měřených tlaků** (varianty od velkých podtlaků až do vysokého přetlaku)
- **Deformace tuhého členu** může být využita pro přenos signálu na potenciometr nebo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) snímač a získán tak **elektrický výstup**

Deformační tlakoměr – Princip, ukázka, typy



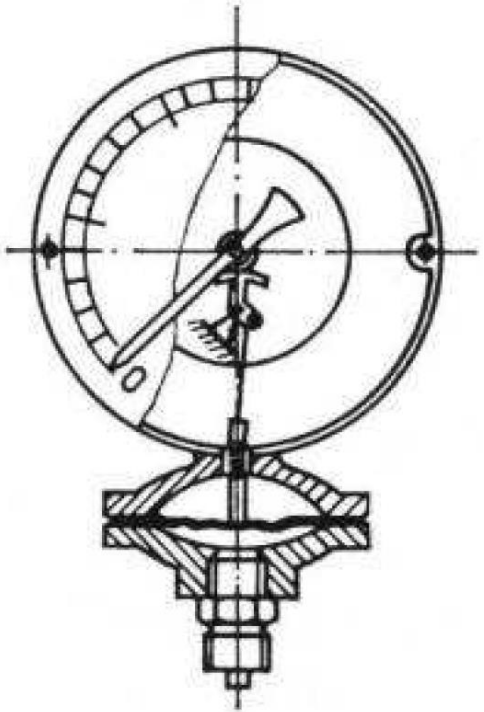






Deformační tlakoměr – Princip, ukázka, typy (2)

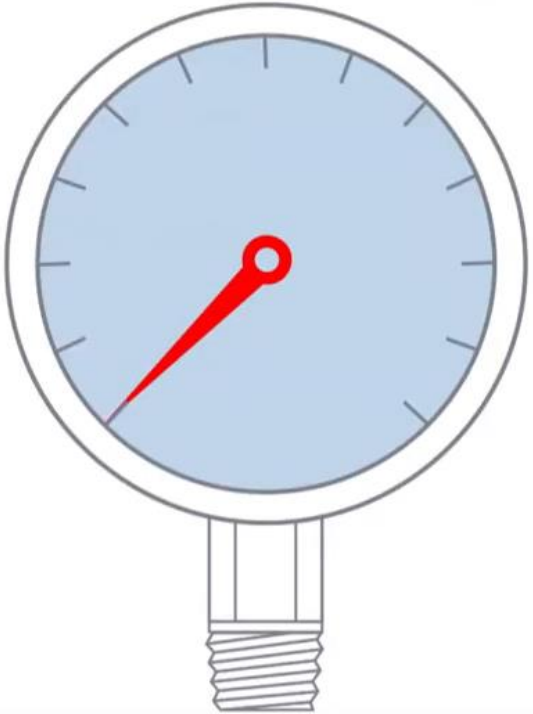
Membránový deformační tlakoměr



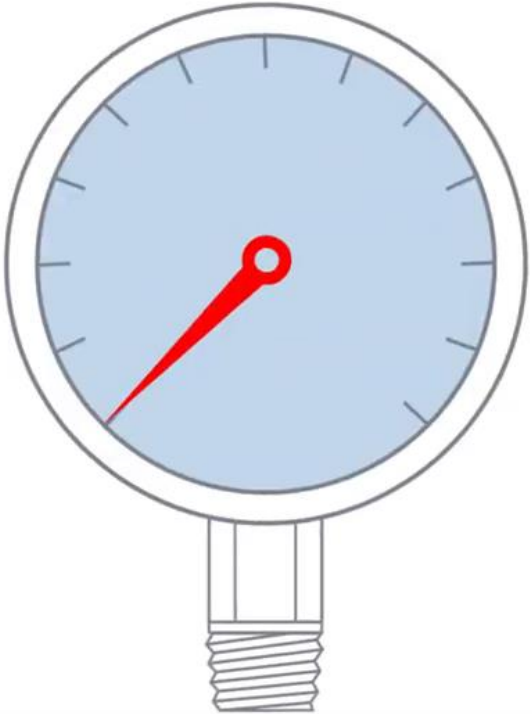


Deformační tlakoměr – Princip

Analogový manometr s Bourdonovou trubicí

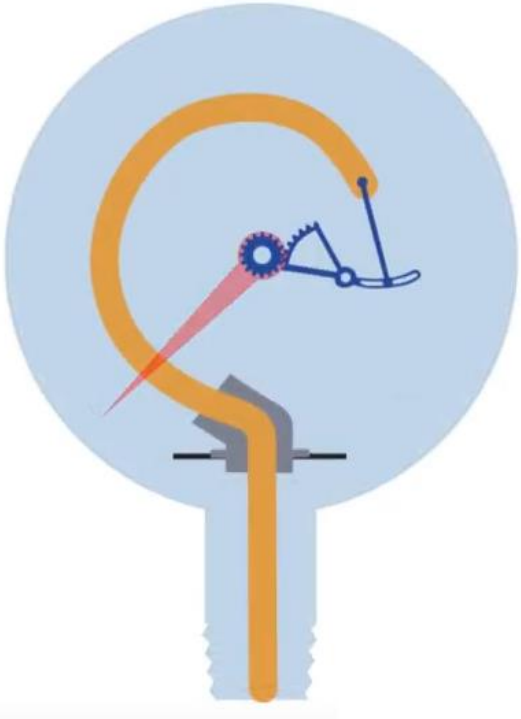


Analogový manometr s vlnovcem

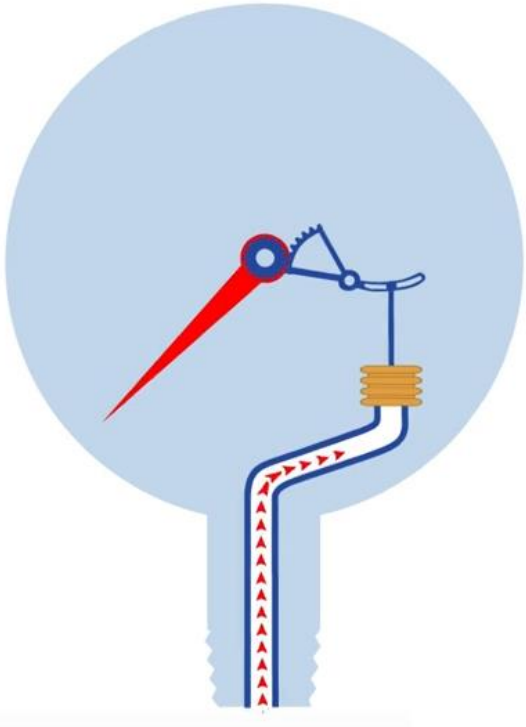


Deformační tlakoměr – Princip (2)

Analogový manometr s Bourdonovou trubicí

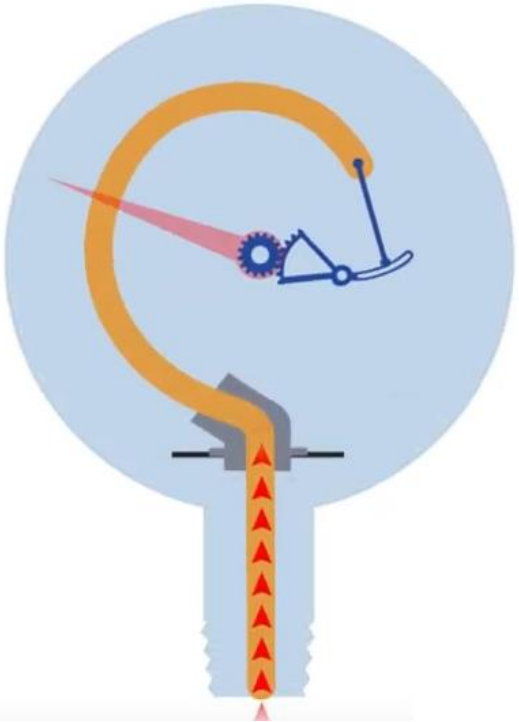


Analogový manometr s vlnovcem

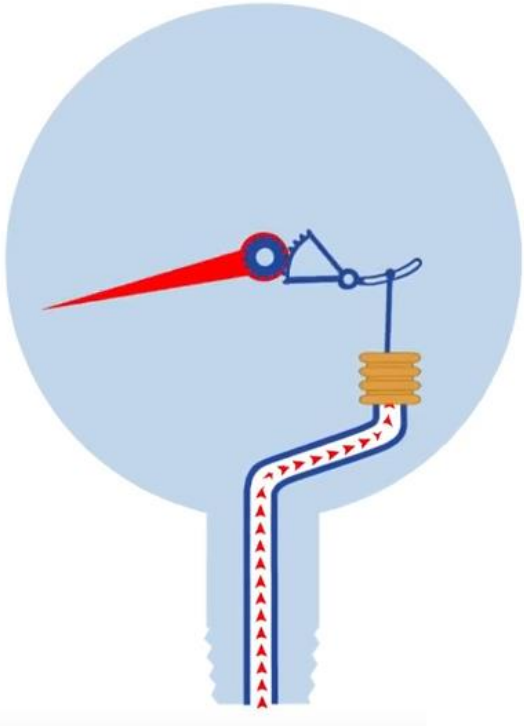


Deformační tlakoměr – Princip (3)

Analogový manometr s Bourdonovou trubicí

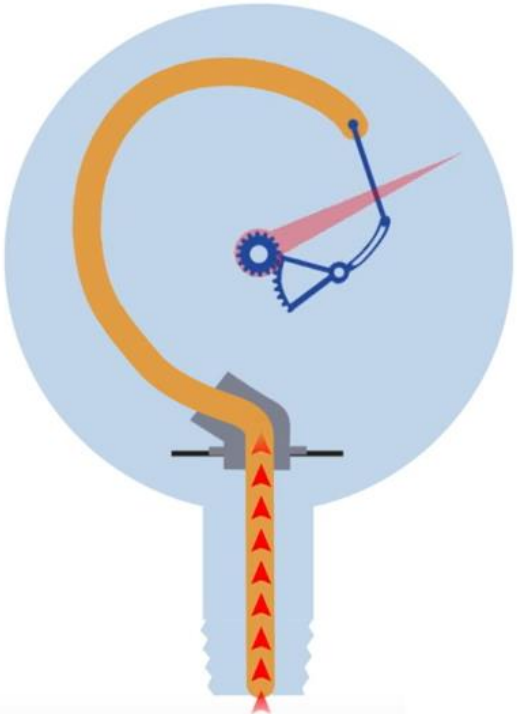


Analogový manometr s vlnovcem

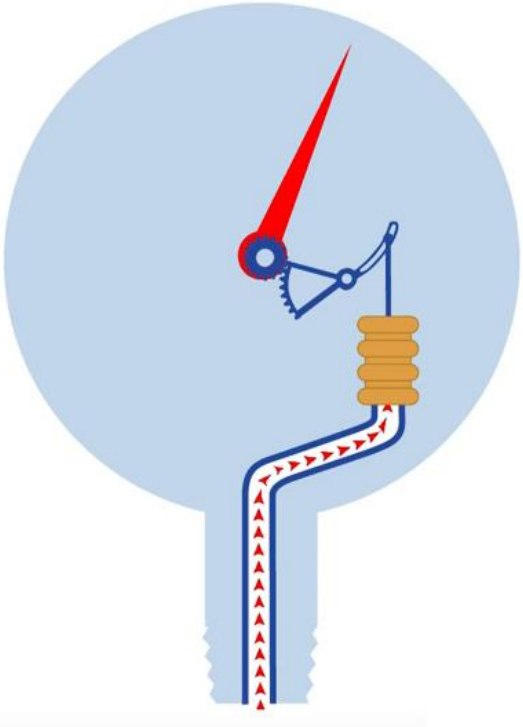


Deformační tlakoměr – Princip (4)

Analogový manometr s Bourdonovou trubicí

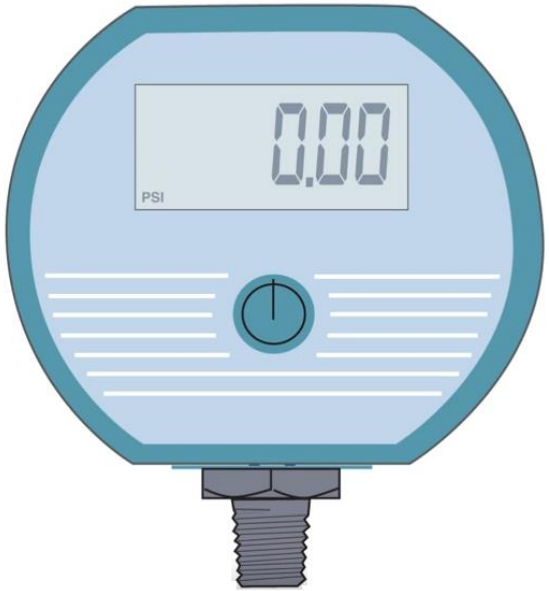


Analogový manometr s vlnovcem



Deformační tlakoměr – Princip (5)

Digitální manometr s tenzometry

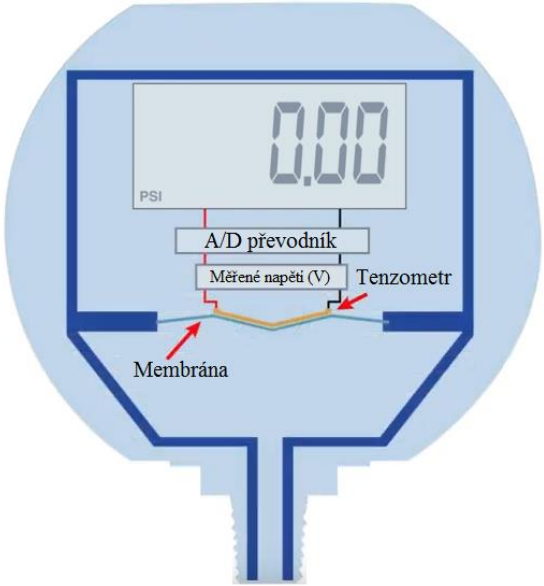


Digitální manometr s piezoelektrickým prvkem

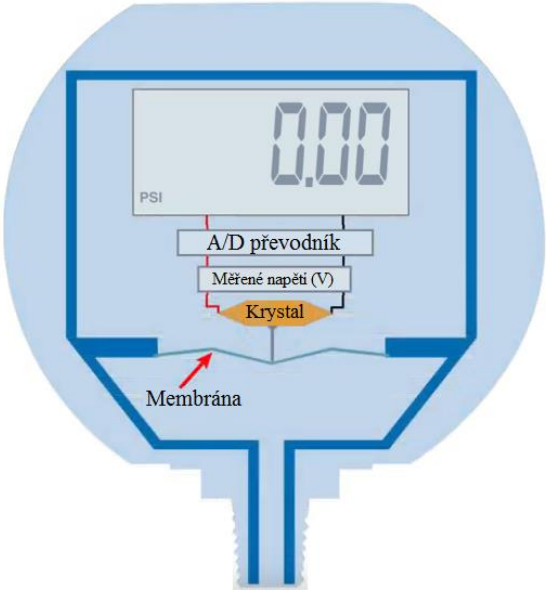


Deformační tlakoměr – Princip (6)

Digitální manometr s tenzometry

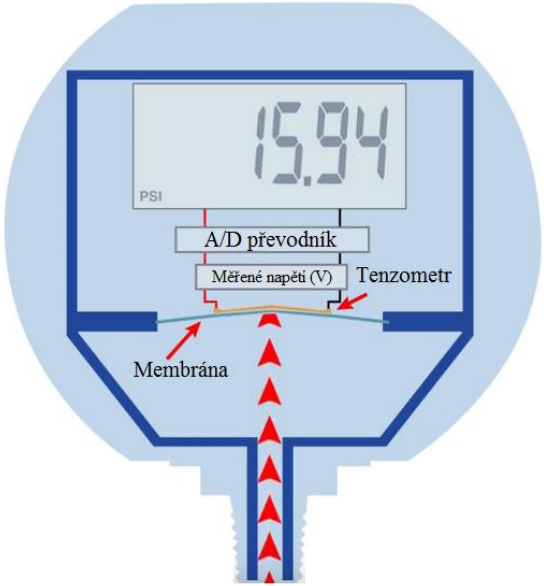


Digitální manometr s piezoelektrickým prvkem

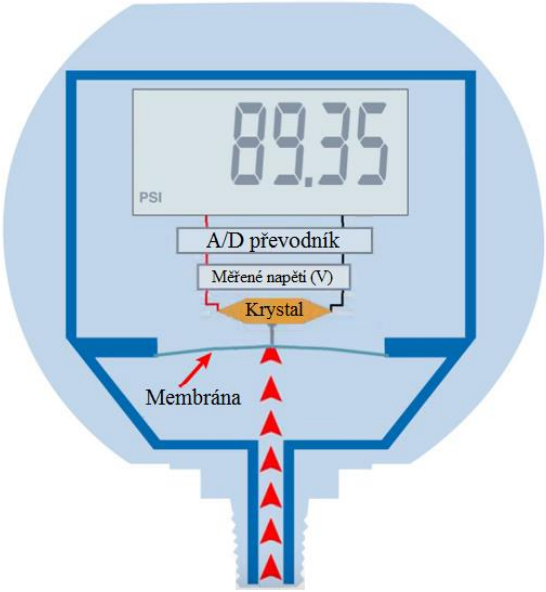


Deformační tlakoměr – Princip (7)

Digitální manometr s tenzometry



Digitální manometr s piezoelektrickým prvkem

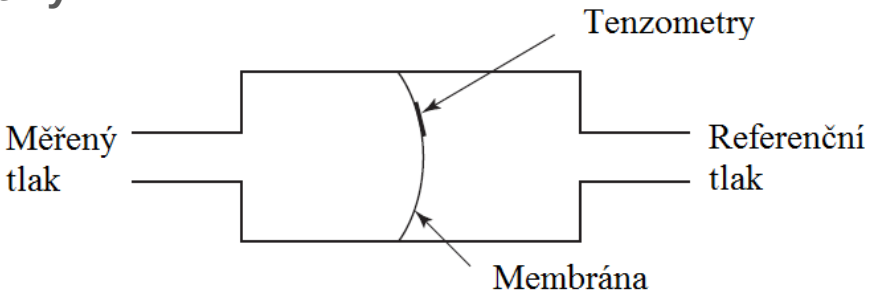


Tlakoměry s elektrickým výstupem

- **Mají elektrický výstup** (mohou využívat principy mechanických převodů používaných u deformačních tlakoměrů)
- Jedná se o **snímače tlaku**, někdy též nazývané **převodníky tlaku**
- Většina z nich není vhodná pro dynamická měření tlaku (rychlé změny tlaku v čase), ale záleží na jejich konstrukci
- Výjimkou jsou tzv. **piezoelektrické snímače** tlaku, které jsou **pro dynamická měření vhodné**
- Existuje několik typů konstrukčního uspořádání (absolutní, relativní, diferenční)

Tlakoměry s elektrickým výstupem (2)

- **Jeden vstup snímá tlak měřené tekutiny**
- **Druhý vstup je tzv. referenční**



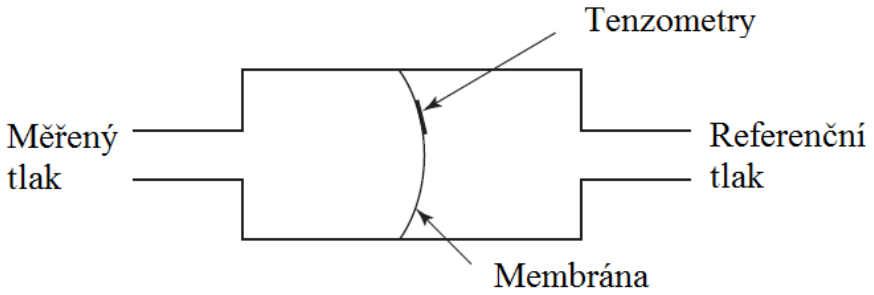
- Referenční vstup je buď utěsněn vůči okolí (absolutní) nebo vyveden do okolí (relativní)
- Často se používají anglické názvy
- **Absolutní** = Absolute = **A** (obvykle dražší)
- **Relativní** = Gauge (brit.) = Gage (Am.) = **G někdy též SG** (obvykle levnější)

Tlakoměry s elektrickým výstupem (3)

- **Diferenční** = Differential = **D**
- Na snímači je často uveden maximální rozsah
- Např. 3BARA znamená maximálně tlak 3 bar absolutně
- Např. 3BARG znamená maximálně tlak 3 bar relativně (vůči aEXPMosféře)
- Např. 1BARD znamená maximálně tlak 1 bar vůči druhému konci
- Jsou možná i jiná značení, záleží na výrobci a státu výrobce (např. PSIA, PSIG, PSID,…)

Tenzometrický snímač tlaku

- Běžný a relativně levný snímač
- Možná provedení A, G, SG, D



- Principem je **vychýlení nebo prohnutí membrány** jedním či druhým směrem
- **Velikost prohnutí** (deformace membrány) je **snímána tenzometry**
- **Výstupem** je buď **napětí** (V nebo mV) **nebo proud** (4–20 mA)
- **Vyšší výstupní napětí je méně náchylné na šum a rušení !**



Tenzometrický snímač tlaku (2)

- **Proudový výstup je minimálně ovlivněn okolním šumem a rušením !**
- Proto obecně platí, že **snímače s proudovým výstupem jsou dražší**
- Membrána buď vyrobena z kovu (starší typy) nebo z polovodiče (novější, vyšší citlivost)
- Polovodičem je obvykle křemíková membrána se zabudovanými tenzometry

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

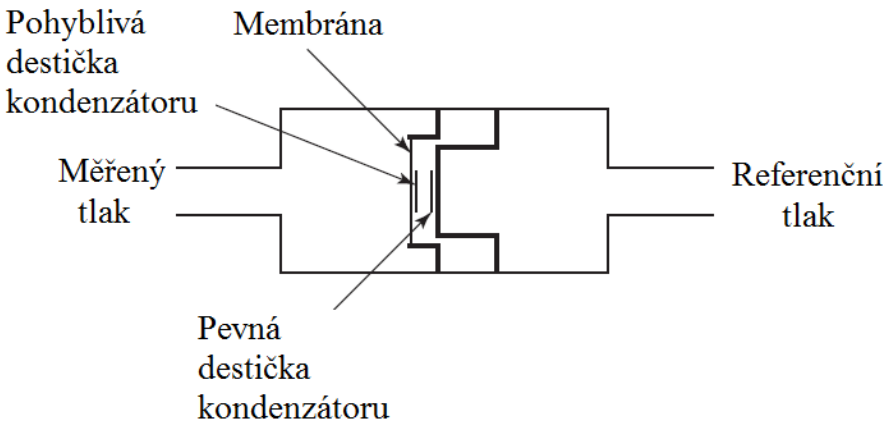


Kapacitní snímač tlaku

- Konstrukčně velmi podobný tenzometrickému snímači (provedení A, G, SG, D)
- Namísto tenzometrů **využívá pevnou a pohyblivou destičku kondenzátoru**
- **Vhodný** především **pro malé relativní nebo diferenční tlaky**
- **Vysoká citlivost**

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



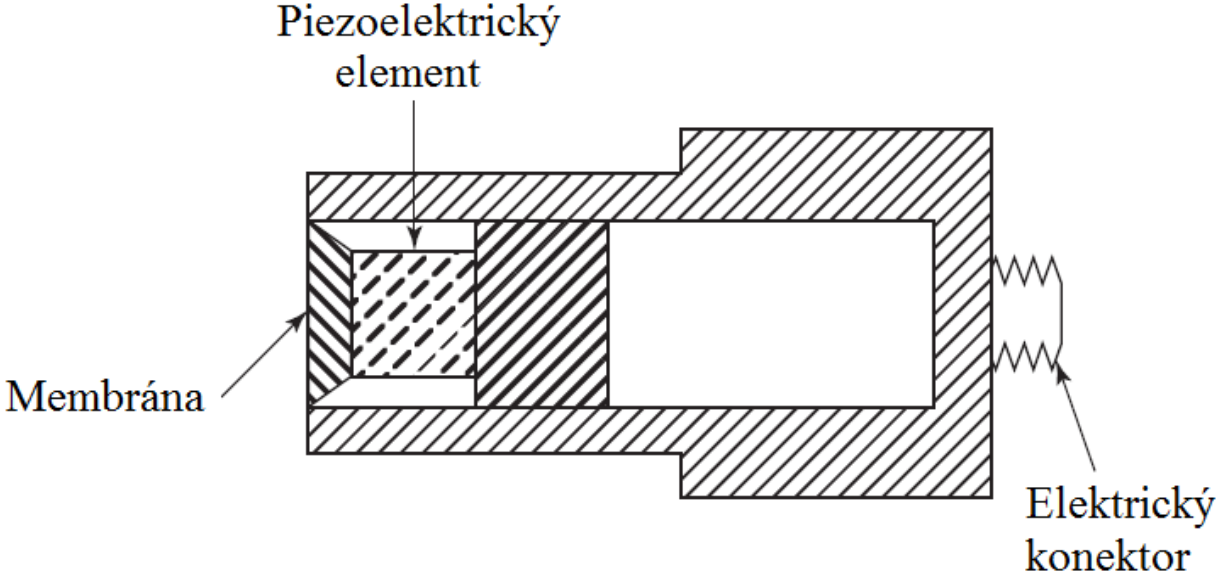


Piezoelektrický snímač tlaku

- **Vhodný pro dynamická měření tlaku**
- **Má vysokou vlastní frekvenci** (cca 150 kHz a více)
- **Využívá piezoelektrický element, který při deformaci mění elektrické vlastnosti**
- Často se také využívá změny měrného odporu (piezorezistivní s.)



Piezoelektrický snímač tlaku – Princip, ukázka





LVDT snímač tlaku

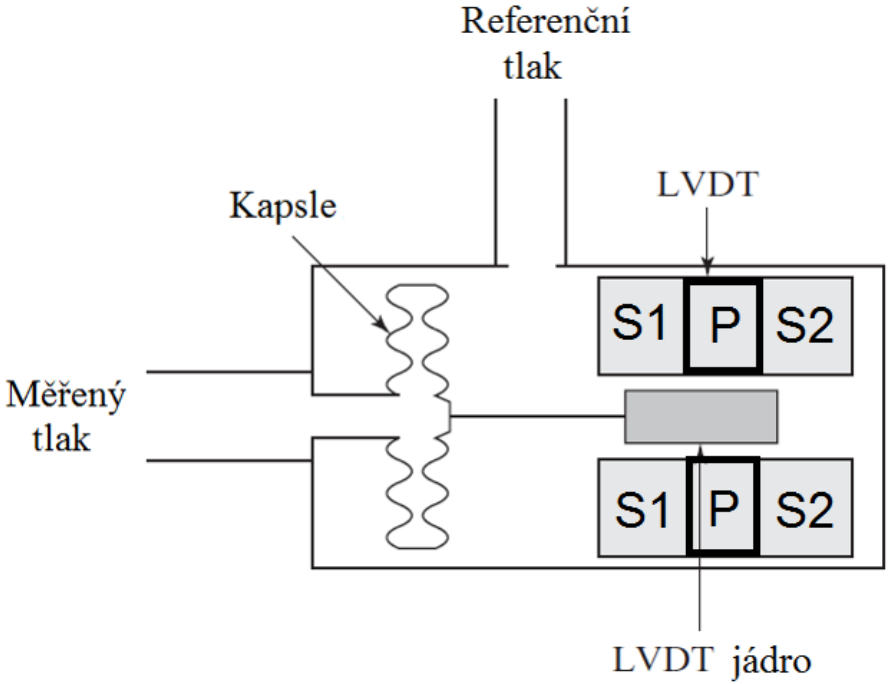
- LVDT = Linear Variable Differential Transformer
- Konstrukčně velmi podobný tenzometrickému snímači (provedení A, G, SG, D)
- **Dražší než tenzometrický snímač, ale odolnější a spolehlivější**
- Častá volba v procesním měření a těžkém průmyslu
- **V procesním měření je výstup často proudový** (4–20 mA)
- **Využívá elektromagnetické indukce**



LVDT snímač tlaku (2)

- Častá konfigurace: **1 primární cívka a 2 sekundární cívky**
- **Dle polohy posuvného jádra** z feromagnetického materiálu **dochází k ovlivnění magnetického pole**
- Pokud je jádro blíže některé ze sekundárních cívek, vzniká v této cívce vyšší napětí
- **Závislost výstupního napětí na poloze jádra je lineární pouze v omezeném rozsahu**

LVDT snímač tlaku – Princip, ukázka





Měření velmi nízkých tlaků (vysokého podtlaku)

- Pro malé a střední vakuum (podtlaky) mohou být často využity konvenční tlakoměry (Bourdonův, kapacitní, apod.)

- V případě, že chceme měřit vysoké, velmi vysoké a ultra-vysoké vakuum, často musíme využít jiných fyzikálních principů

- Vybrané tlakoměry (vakuometry) pro měření velmi nízkých tlaků:

1) Kompresní vakuometry *(hydrostatické, mechanické)*
2) Bolometrické vakuometry *(tepelná vodivost plynu závislá na tlaku)*
3) Ionizační vakuometry *(míra ionizace plynu závislá na tlaku)*

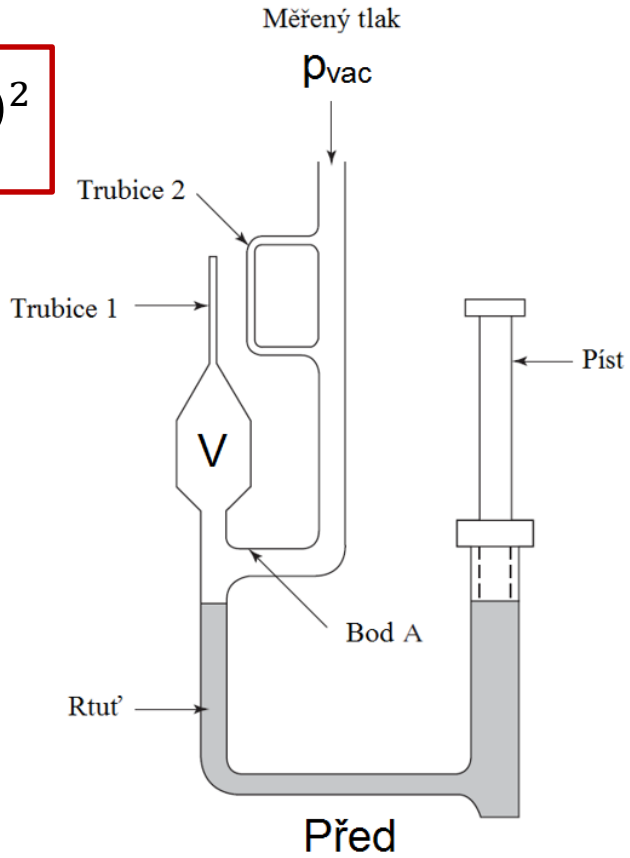
Kompresní vakuometr

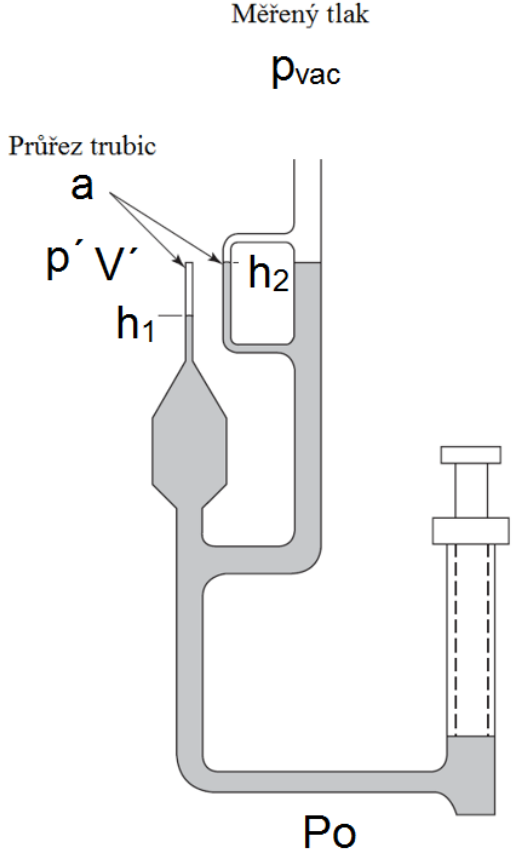
- Tzv. McLeodův vakuometr
- Měřicí rozsah 10^{-1} až 10^{-4} Pa absolutně
- Založen na principech mechaniky tekutin a termodynamiky
- **Nepoužitelný pro dynamická měření**
- **Vhodný pro kalibraci** jiných vakuometrů
- Vztah pro výpočet vychází z Boyleova zákona ($T_1 = T_2$)
- Vhodný pouze pro „suché” plyny, které nekondenzují



Kompresní vakuometr (2)

$$p_{vac} = K(h_2 - h_1)^2$$





Bolometrický vakuometr



- Tzv. Piraniho vakuometr
- Má **elektrický výstup**
- Měřicí rozsah 10^5 až 10^{-4} Pa absolutně
- **Využívá závislosti tepelné vodivosti plynů na tlaku při velmi nízkých tlacích**
- Často využívá dvě komory, jednu aktivní a jednu referenční pro kompenzaci okolní teploty

Bolometrický vakuometr – Princip, ukázky

$$\dot{Q} = C(T_{vl} - T_{st})p_{vac}$$

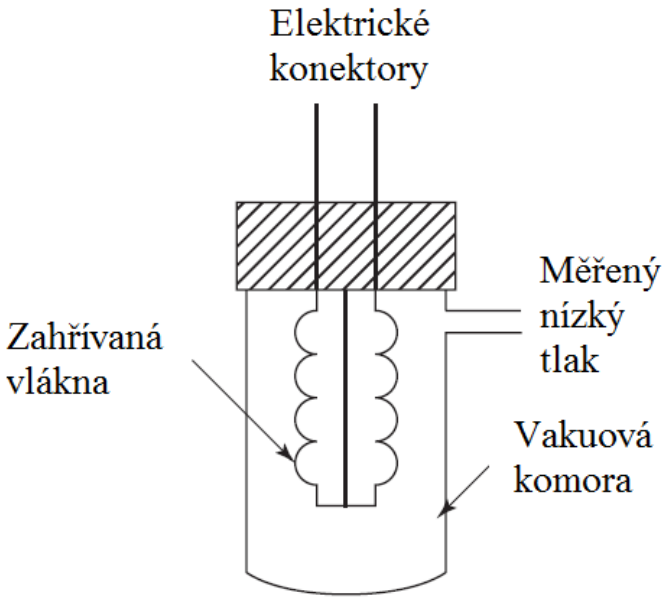
$$p_{vac} = \frac{\dot{Q}}{C(T_{vl} - T_{st})}$$



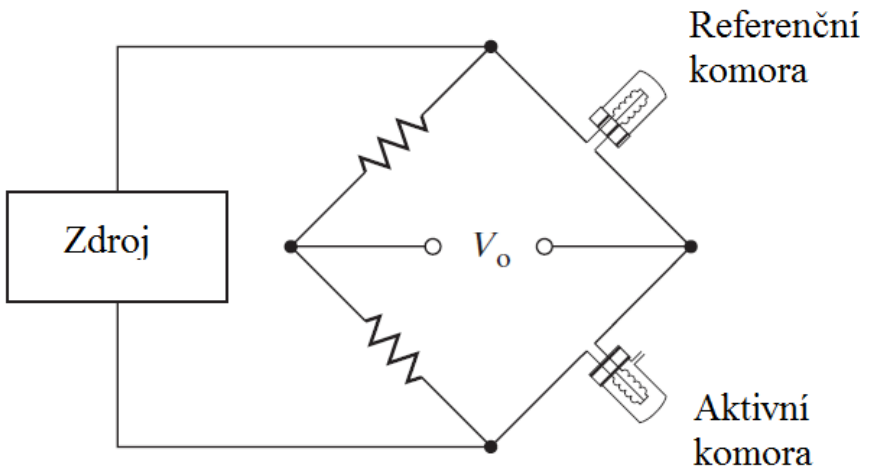


- T_{vl} je udržovaná teplota vlákna a T_{st} je teplota stěny komory
- C je konstanta závislá na geometrii komory, typu plynu, atd.

Bolometrický vakuometr - Princip



(a) Měřicí komora



(b) Elektrické zapojení

Ionizační vakuometr

- Má **elektrický výstup**
- Měřicí rozsah 10^{-1} až 10^{-11} Pa (**ultra vysoké vakuum**)
- Princip založen **na ionizaci molekul plynu**
- **Počet je vzniklých iontů je úměrný hustotě plynu a tudíž i jeho tlaku**
- Katodou je zahřívané vlákno, tj. tzv. „horká“ katoda (existuje také „studená“)
- Čím více je molekul plynu v komoře, tím více vzniká pozitivních iontů a elektronů
- Měří se samostatně proud iontů a elektronů



Ionizační vakuometr – Princip, ukázky

- **Pro vyšší absolutní tlaky je nepoužitelný** (citlivé vlákno)

$$p_{vac} = \frac{I_+}{C I_-}$$

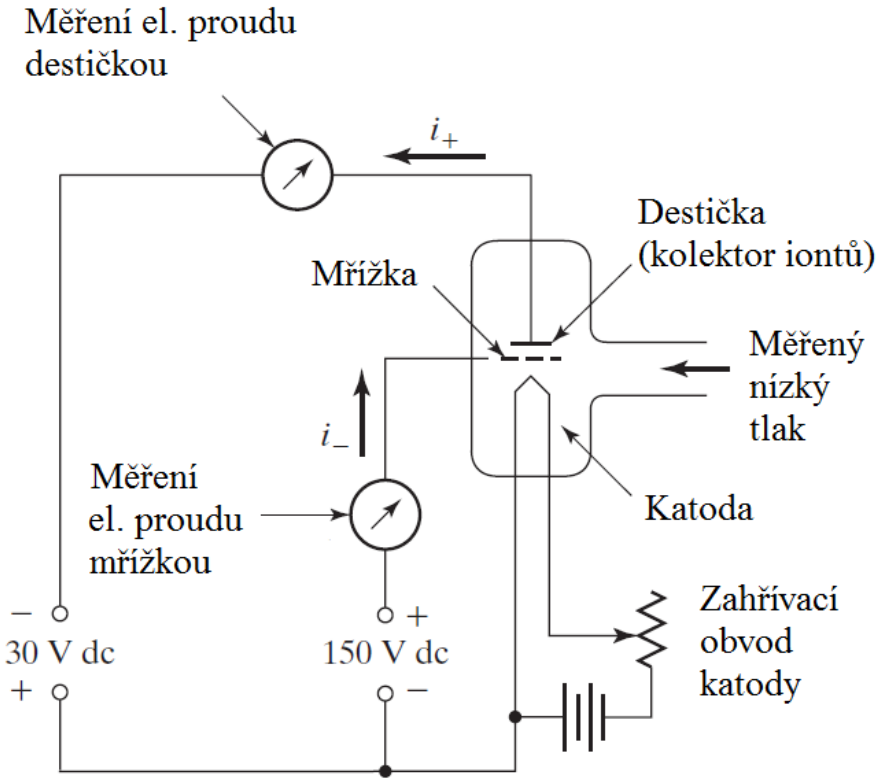


- I_+ je proud pozitivních iontů a I_- je proud elektronů
- C je konstanta elektrického obvodu





Ionizační vakuometr - Princip



Měření rychlosti proudění

- **Metody měření rychlosti:**

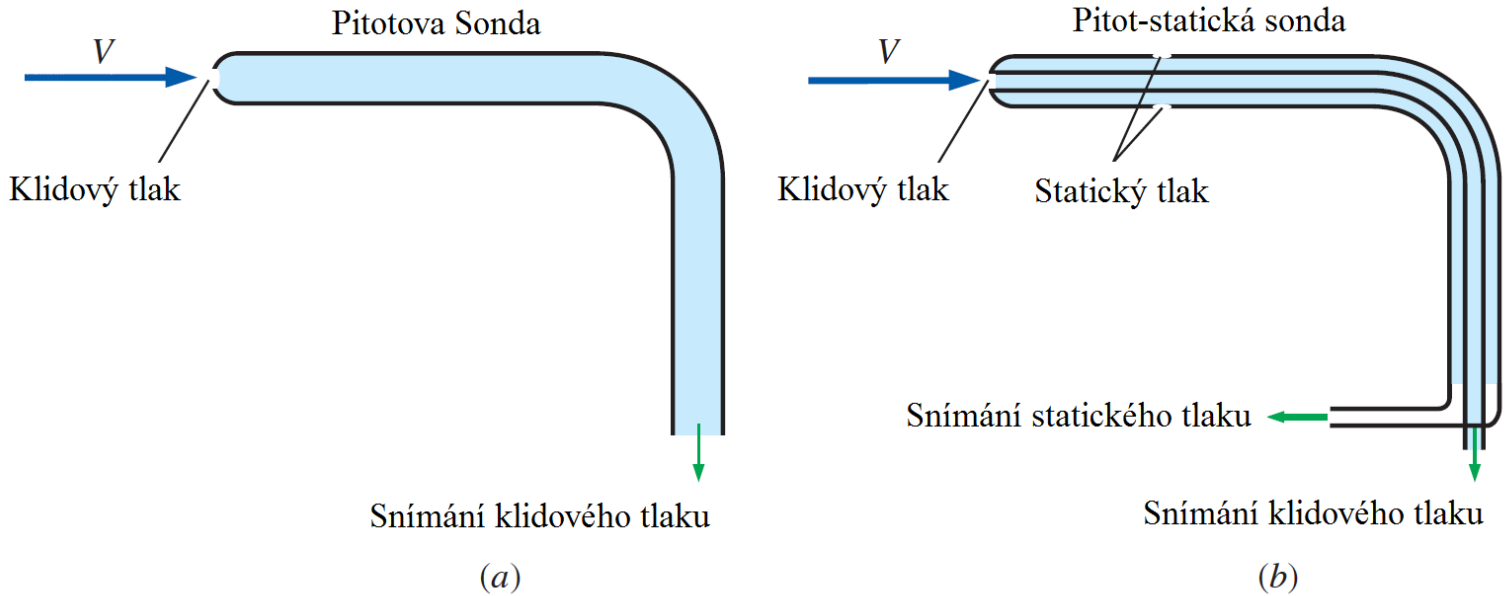
1) *Pitotova a Pitotova-statická sonda*

2) *Termoanemometrická sonda (CTA/CCA)*

3) *Plošná neinvazivní metoda měření rychlosti (PIV)*

Měření rychlosti proudění Pitotovou sondou

- **Pitotova a Pitotova-Statická (Prandtlova) sonda**

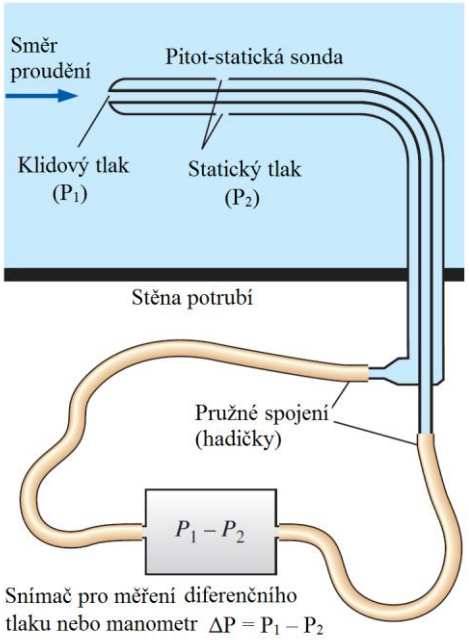


Pitotova a Pitotova-statická sonda

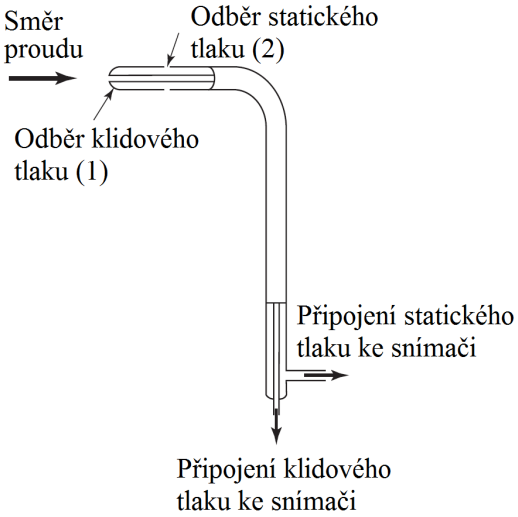
- **Pitotova** a **Pitotova-Statická** sonda jsou používány často pro měření rychlosti kapalin i plynů
- Obě sondy musí být rovnoběžné se směrem proudění (±5°), jinak vzniká při měření chyba
- Při dodržení správných podmínek při měření je přesnost do ±5 %
- Obě sondy často používány v letectví
- Pitotova sonda vyžaduje samostatné měření statického tlaku (např. na stěně potrubí)
- Jedná se o **invazivní (kontaktní) bodovou metodu**

Pitotova-statická sonda

- **Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)**







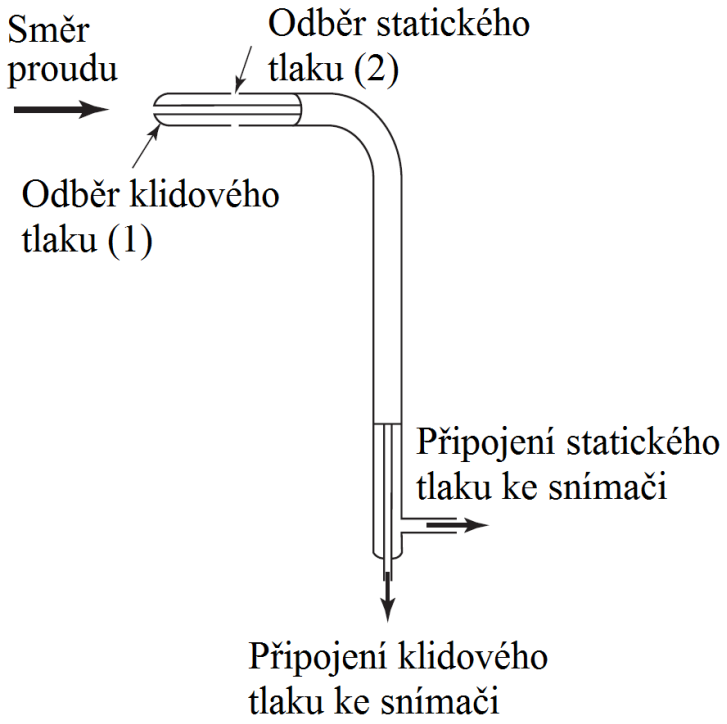
Pitotova-statická sonda (2)

- **Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)**

$$v_2 = C\sqrt{\frac{2[(p_1+\rho g z_1)-(p_2+\rho g z_2)]}{\rho}}$$

- Pro plyny často platí, že z_1, $z_2 = 0$, a tak platí vztah

$$v_2 = C\sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho}} = C\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Pitotova-statická sonda (3)

- Pro odběr klidového tlaku platí $v_1 \approx 0\ m/s$
- Pro odběr statického tlaku platí $v_2 \approx$ *rychlost proudu*
- Konstanta *C* je korekcí na skutečnou rychlost vlivem přítomnosti sondy
- *C* se určuje z kalibrace nebo uvádí výrobce sondy

$$v_2 = C\sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Příklad využití Pitotových sond



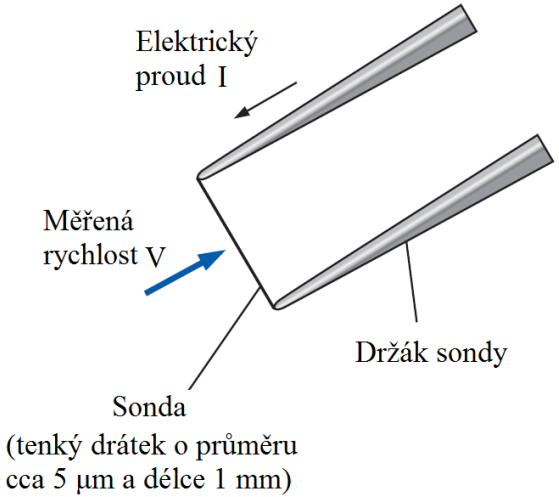


Metoda žhaveného drátku

- **Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku)** – 2 možné režimy měření (CTA/CCA)

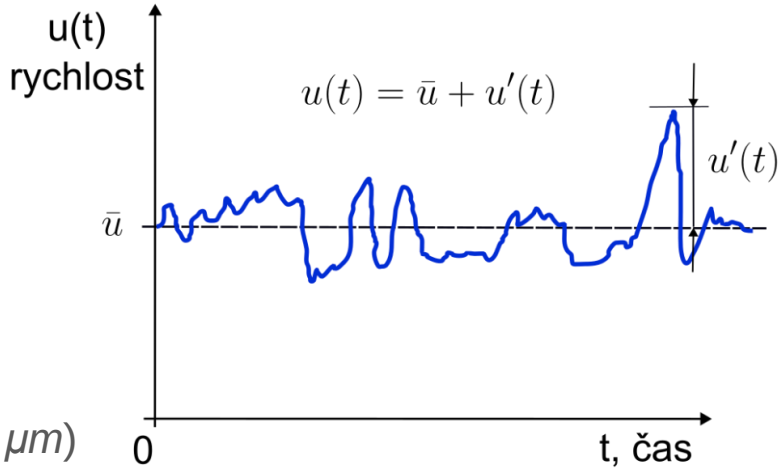
1) **CTA** (Constant Temperature Anemometry) **pro měření rychlosti a jejich fluktuací**

2) **CCA** (Constant Current Anemometry) **pro měření teploty a jejich fluktuací**



Metoda žhaveného drátku (2)

- **CTA** režim využíván častěji
- Pro **měření rychlosti** (a jejich fluktuací)
- Jedná se o **invazivní bodovou metodu**
- **Sondy** jsou většinou **velmi malé** (*l = 1 mm, Ød = 5 μm*)



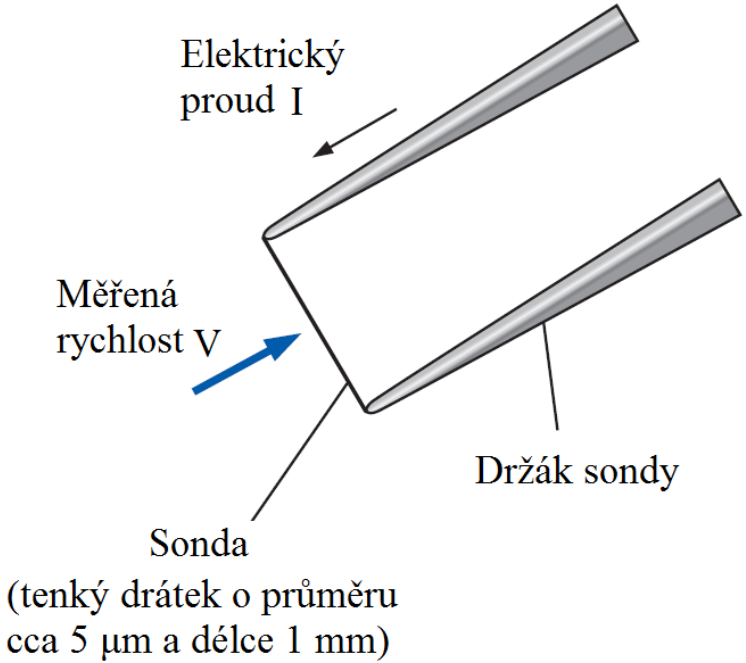
- Poměrně sofistikovaná měřicí metoda, avšak osvědčená v praxi
- **Míra ochlazování žhaveného drátku je úměrná rychlosti proudící tekutiny**

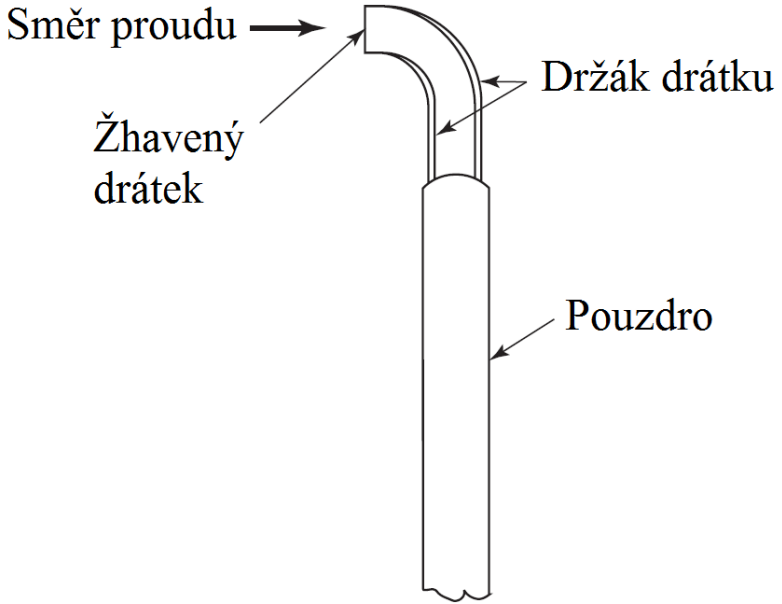
Metoda žhaveného drátku (3)

- Relativně snadná aplikace
- Velký rozsah měřených hodnot (dle typu sondy)
- Lze měřit rychlost v bodě ve všech směrech (x, y, z) – speciální sondy
- Vysoká citlivost
- Poskytuje poměrně přesné výsledky (v případě řádné kalibrace sondy)
- Sondy jsou obvykle **náchylné na poškození** (manipulace, nečistoty v tekutině apod.)

Metoda žhaveného drátku - Princip

- **Při režimu CTA** je drátek (Pt) obvykle ohříván na teplotu **200–500 °C**





Metoda žhaveného drátku – základní vztahy

- 3 základní zákony: **Jouleův** zákon**, Newtonův** ochlazovací zákon**, Kingův** zákon

- **Předpokládá odvod tepla pouze prouděním (konvekcí)**, radiace, vedení a akumulace nejsou uvažovány

$$\dot{Q} = \frac{U^2}{R} = A\alpha\Delta T = (A_0 + B_0 Re^{0.5})\Delta T = (a_0 + b_0 v^{0.5})\Delta T$$

$$\Delta T = (T_{sonda} - T_{tek})$$

$$U^2 = A_1 + B_1 v^{0.5}$$

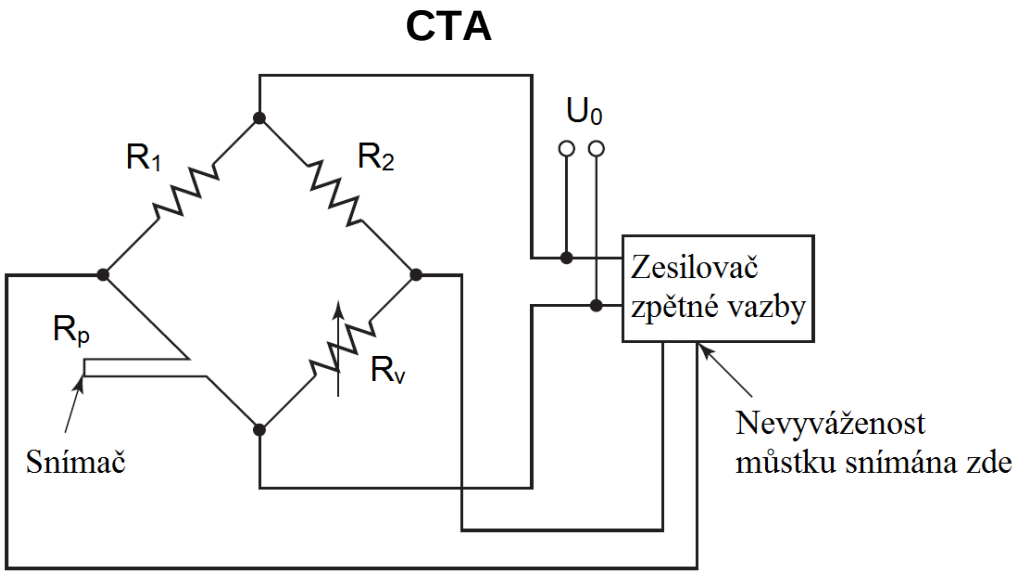
Kingův zákon

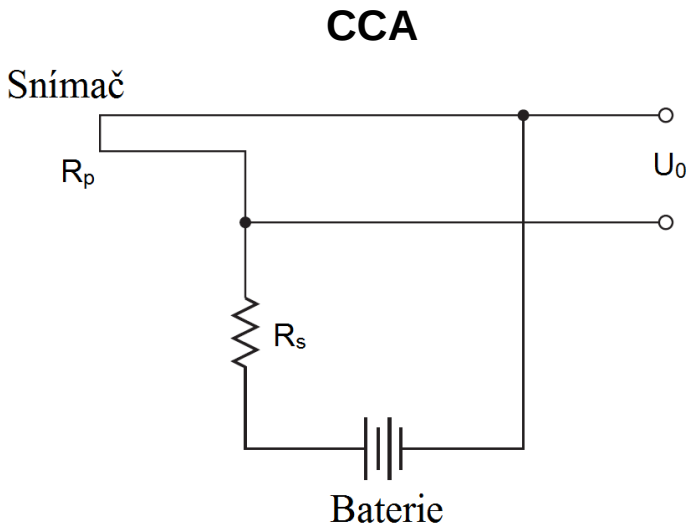
- *U je elektrické napětí, R elektrický odpor, A plocha drátku, v rychlost proudění,* A_0, B_0, A_1, B_1, a_0, b_0 jsou konstanty

- $Re = \rho \frac{vD}{\mu}$ je Reynoldsovo číslo

Elektrické obvody režimů

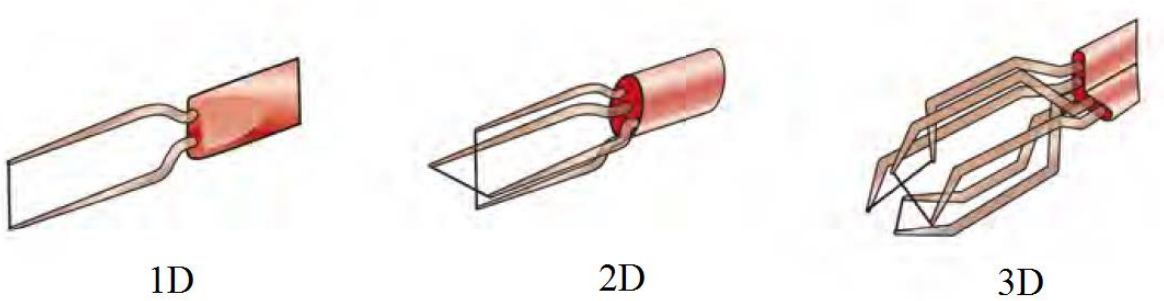
- Režimy CTA/CCA – elektrické zapojení (Ohmův zákon *U = RI*)



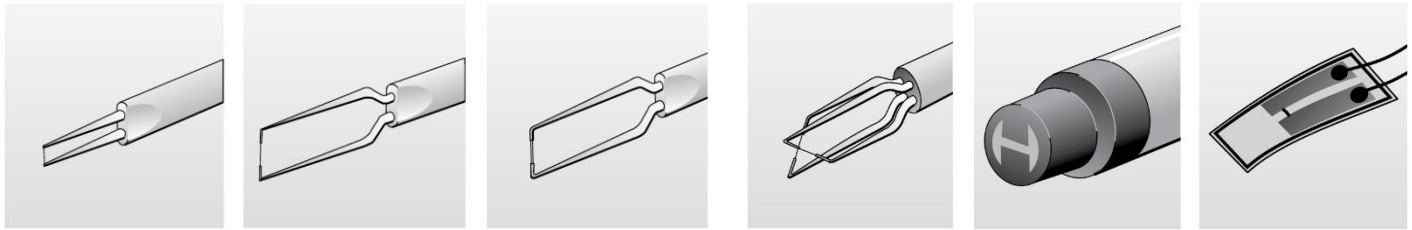


Typy anemometrických sond

- Měření více složek rychlosti



- Různé typy sond

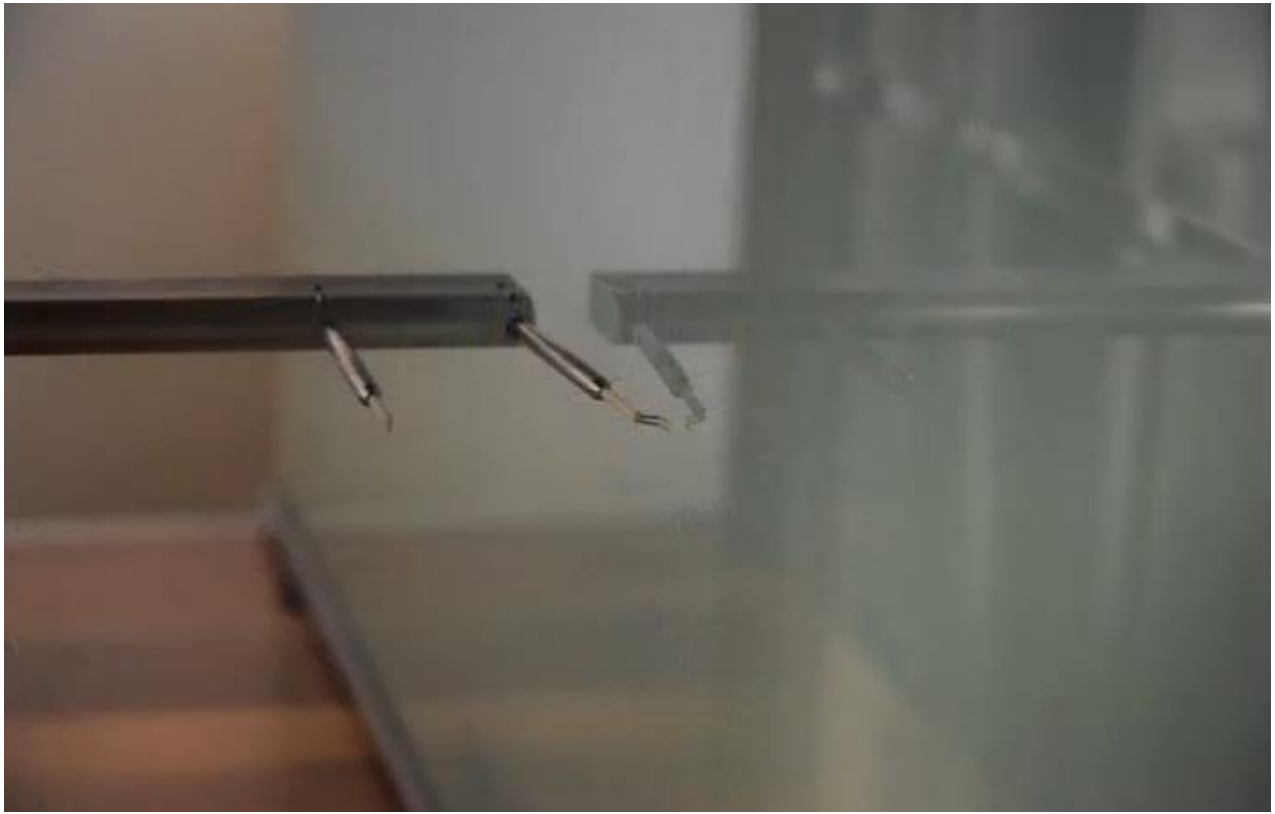


Příklady využití anemometrických sond





Příklady využití anemometrických sond (2)



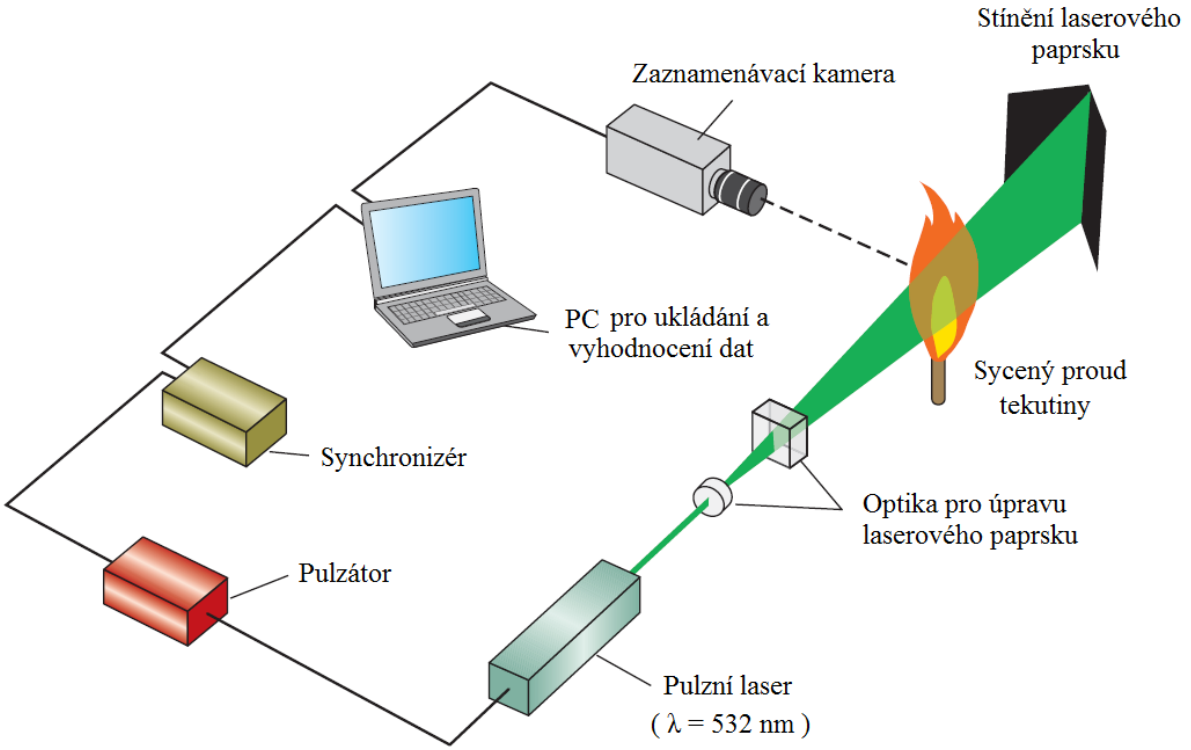
Metoda Particle Image Velocimetry (PIV)

- Poměrně sofistikovaná metoda co se týče získávání a zpracování dat
- Jednoduchý princip metody $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$
- Lze měřit rychlost ve více bodech nejčastěji 2D pole, ale existuje i 3D (2.5D)
- Osvícení měřicího prostoru pulsními lasery (520–564 nm, 635–660 nm)
- Neinvazivní metoda, ale nutné sytit proud vhodnými částicemi
- Částice by měly mít velmi nízké Stokesovo číslo, tj. měly by dokonale sledovat proud
- Nutnost průhledných stěn v měřicím prostoru (pozor na odrazy!)

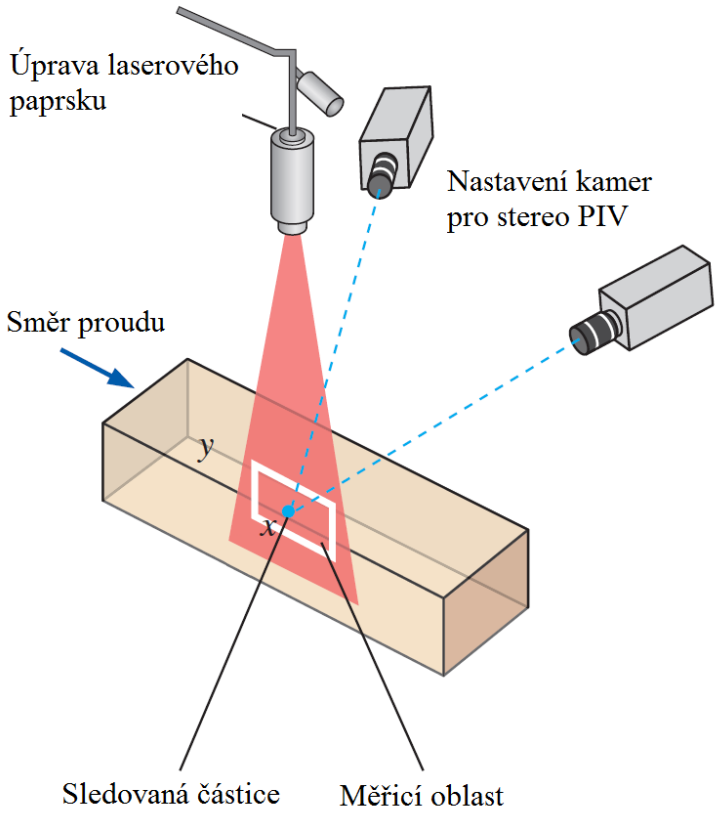
Metoda Particle Image Velocimetry (PIV) (2)

- Kameramy pak sledujeme rozptyl laserového světla způsobený pohybujícími se částicemi
- Nutná přesná synchronizace laseru s kamerou
- Výsledkem 2 expozic jsou polohy částic v místě A a v místě B, respektive Δx a Δy za časový úsek Δt (většinou v řádech mikrosekund)
- Poměrně mladá metoda, vznik v roce 1984

Metoda Particle Image Velocimetry – Schéma



Metoda Particle Image Velocimetry – Pseudo 3D



Měření průtoku tekutin

- **Vybrané přístroje pro měření průtoku tekutin:**

1) *Průtokoměry využívající tlakové diference (ISO 5167)*

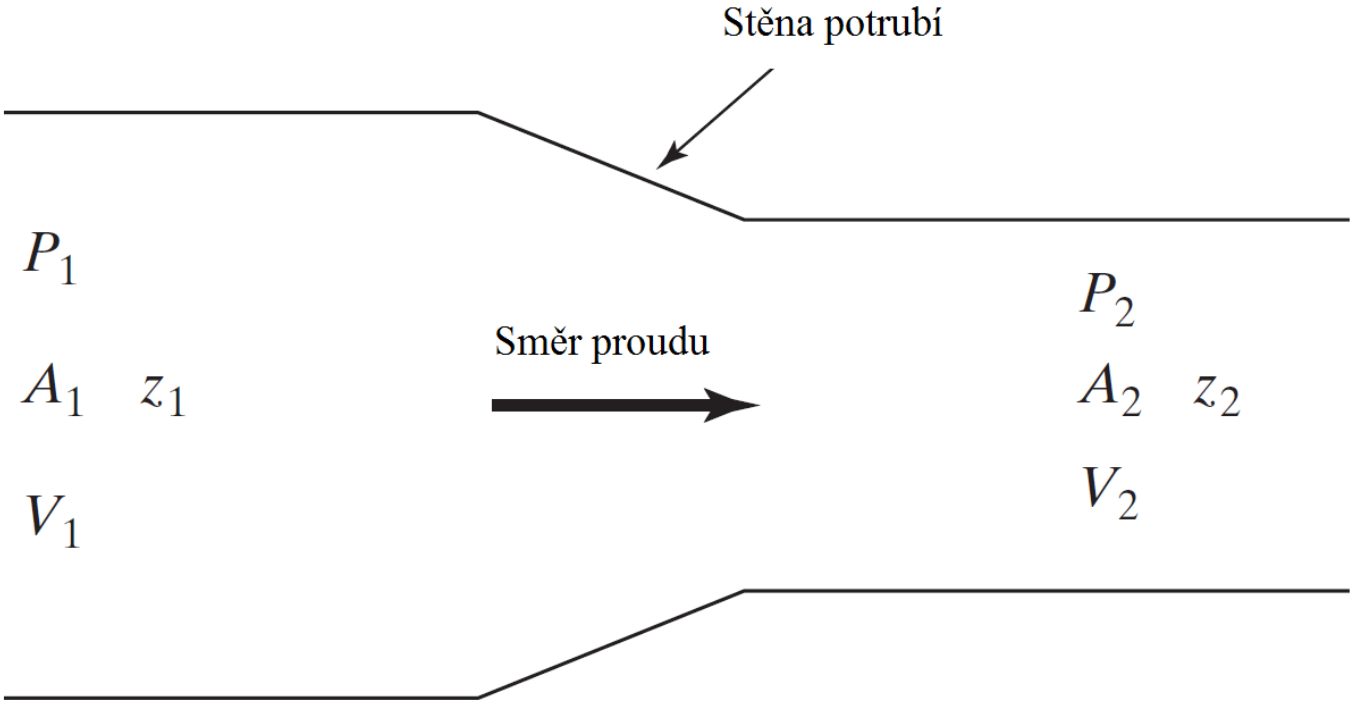
2) *Objemové a plováčkové průtokoměry*

3) *Turbínkové průtokoměry*

4) *Ultrazvukové průtokoměry*

Měření průtoku tekutin

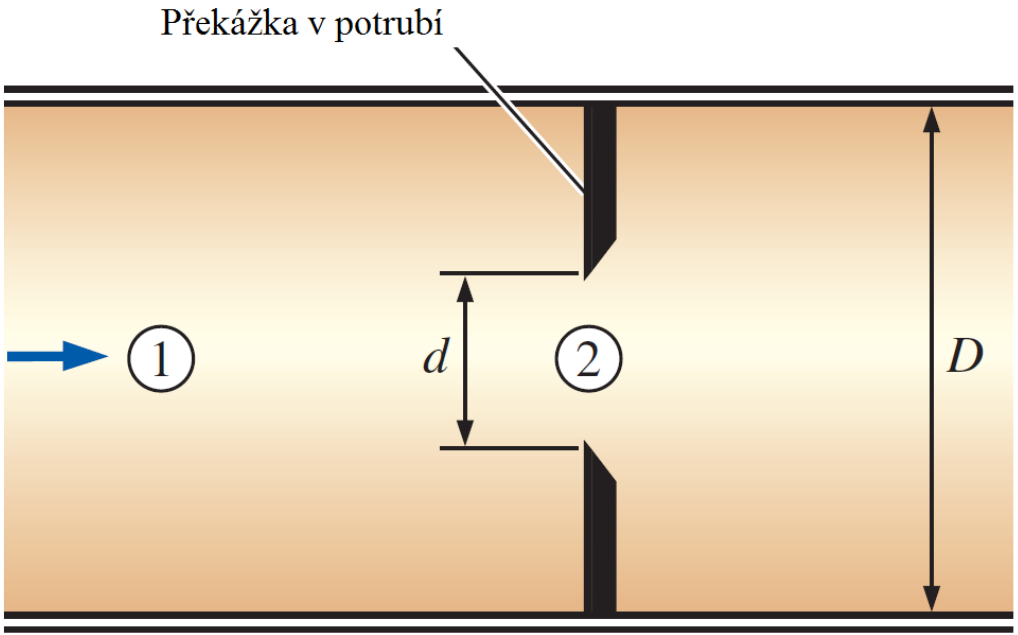
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167)



Měření průtoku tekutin

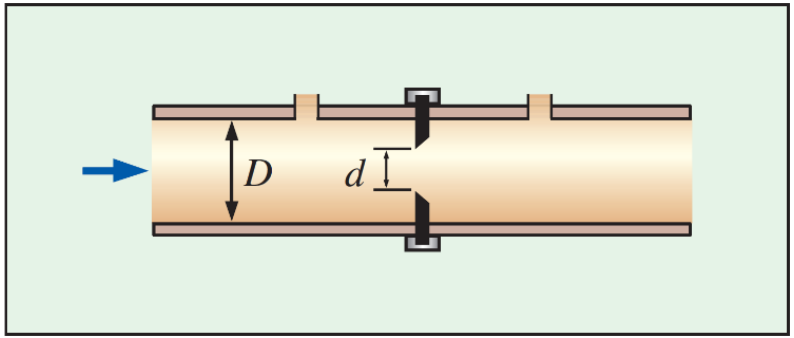
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167)

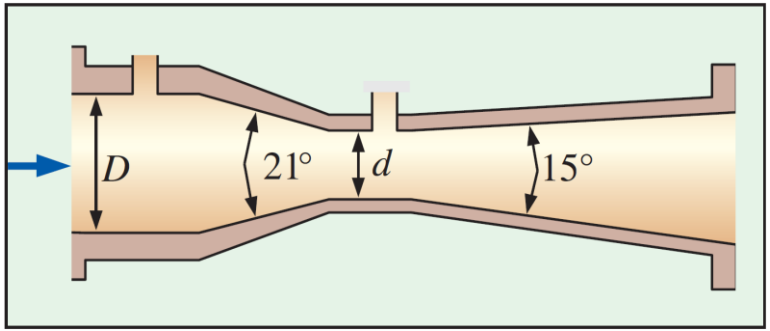
Nutné provést korekci ideálního průtoku na reálný, případně také korekci stlačitelnosti.

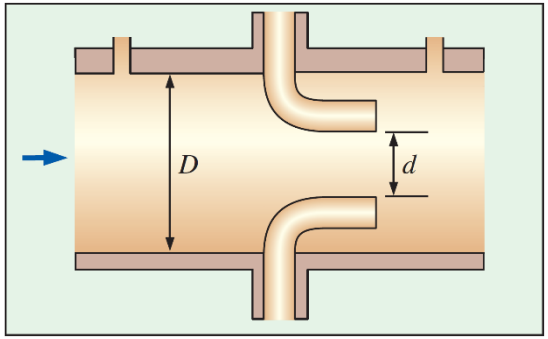


Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167) – clona, dýza, Venturiho trubice

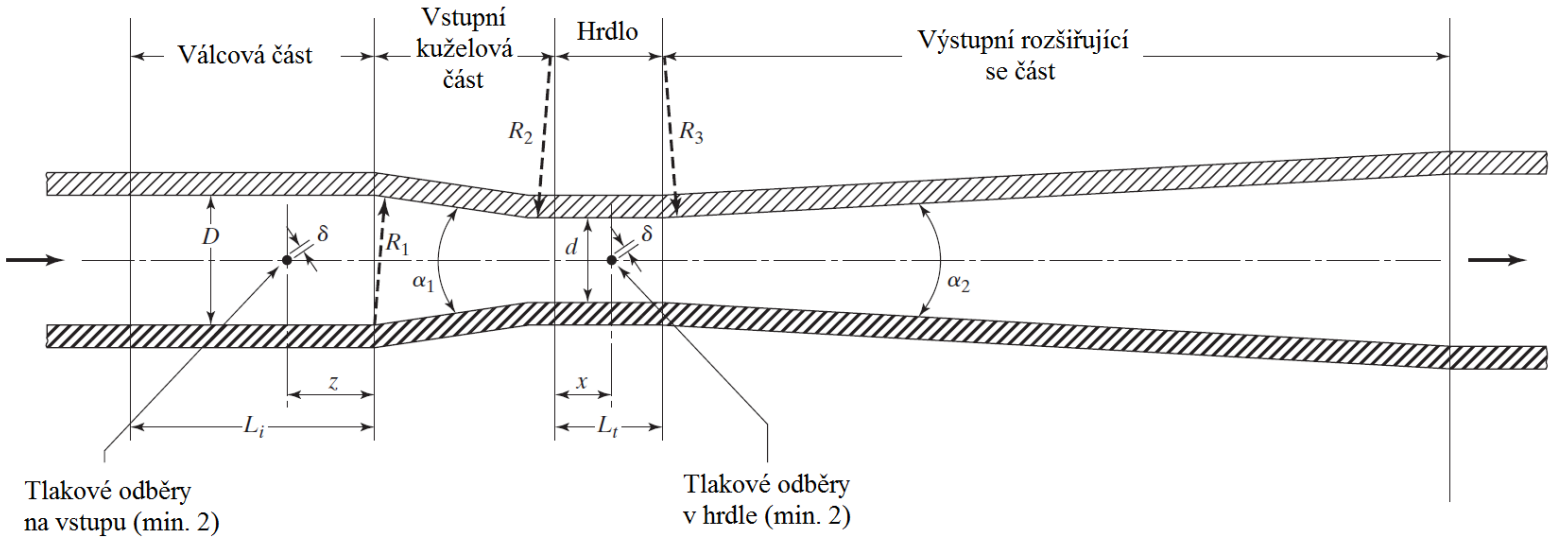






Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice



$L_i > D$ or $L_i > (D/4 + 250\ \text{mm})$
$z = D/2\ (+0.0\ D, -\ D/4)$, minimálně 2 odběry
$L_t \geq d/3$
$x = 0.5\ d \pm 0.02\ d$, minimálně 2 odběry
$4\ \text{mm} \leq \delta \leq 10\ \text{mm}$ a $\delta < 0.1D$ nebo $0.13\ d$

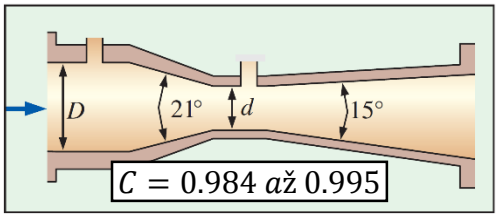
$R_1 = 1.375\ D \pm 20\%$
$R_2 = 3.625\ d \pm 0.125\ d$
$5d \leq R_3 \leq 15\ d$
$\alpha_1 = 21° \pm 1°$
$7° \leq \alpha_2 \leq 15°$

Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

Doporučené hodnoty součinitele průtoku pro Venturiho trubice	
Litá a svařovaná vstupní kuželová část	Opracovaná vstupní kuželová část
$C = 0.984 \pm 1.0\%$	$C = 0.995 \pm 1.0\%$
$10.16\ \text{cm} \leq D \leq 121.92\ \text{cm}$	$5.08\ \text{cm} \leq D \leq 25.4\ \text{cm}$
$0.3 \leq \beta \leq 0.75$	$0.3 \leq \beta \leq 0.75$
$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$	$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$

Zdroj : ASME (1989).



Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

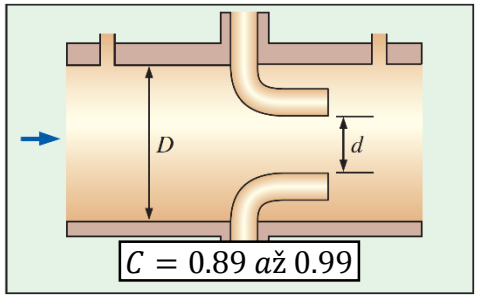




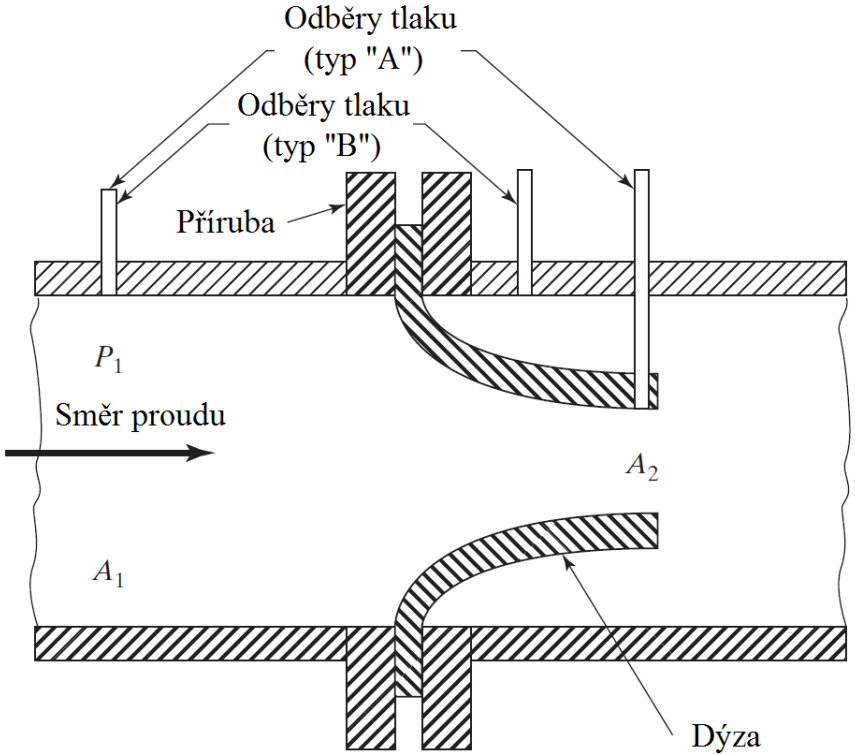


Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – Dýza (různá provedení)



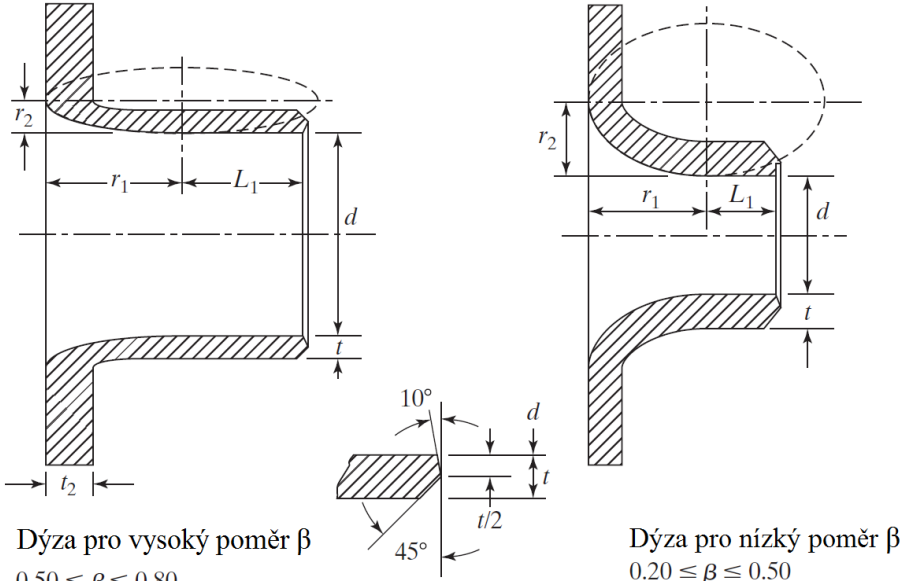
$$C = 0.9975 - 0.00653\sqrt{\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)}$$



Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – např. dýza s dlouhým poloměrem





Dýza pro vysoký poměr β

$0.50 \le \beta \le 0.80$
$r_1 = D/2$
$r_2 = (D - d)/2$
$L_1 \le 0.6\,d$ or $\le D/3$
$2t \le D - (d + 6\text{ mm})$
$3\text{ mm} \le t_2 \le 0.15\,D$

Detail výstupu dýzy

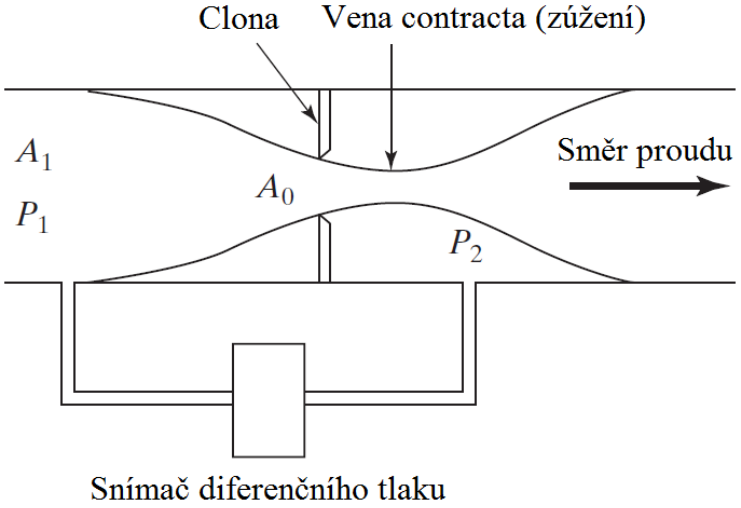
Dýza pro nízký poměr β

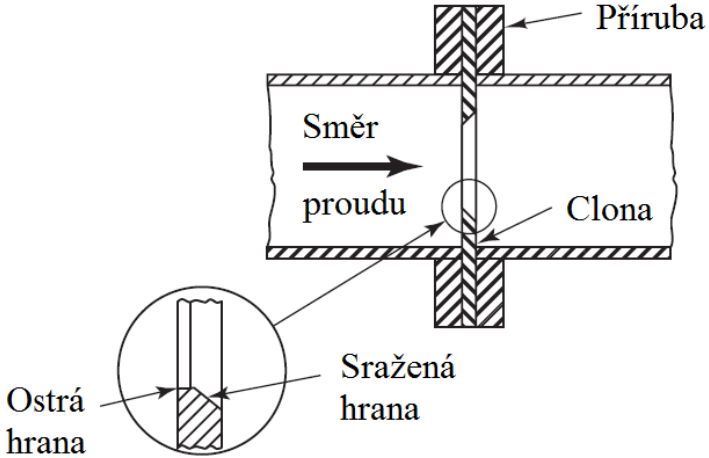
$0.20 \le \beta \le 0.50$
$r_1 = d$
$0.63\,d \le r_2 \le 0.67\,d$
$0.6\,d \le L_1 \le 0.75\,d$
$3\text{ mm} \le t \le 12\text{ mm}$
$3\text{ mm} \le t_2 \le 0.15\,D$

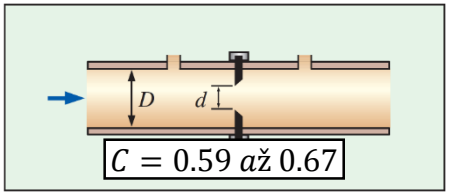
D = Vnitřní průměr potrubí PŘED dýzou

Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona (různá provedení)



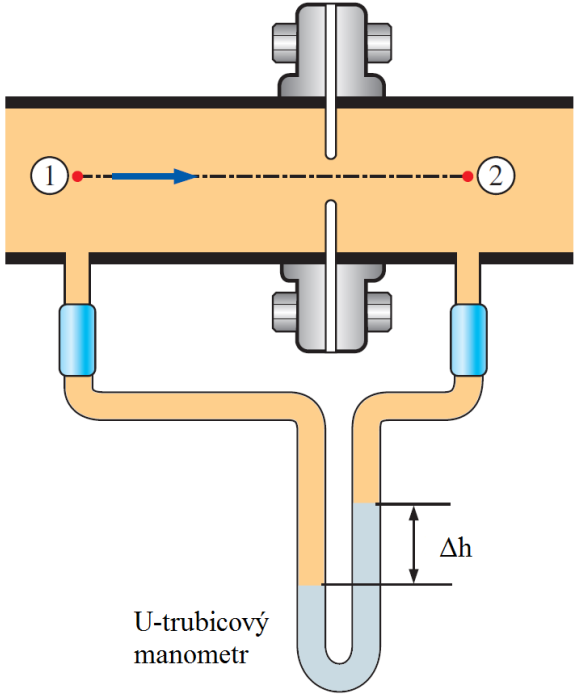




$$C = 0.5959 - 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^{8} + \frac{97.71\beta^{2.5}}{Re_D{}^{0.75}}$$

Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona (různá provedení)

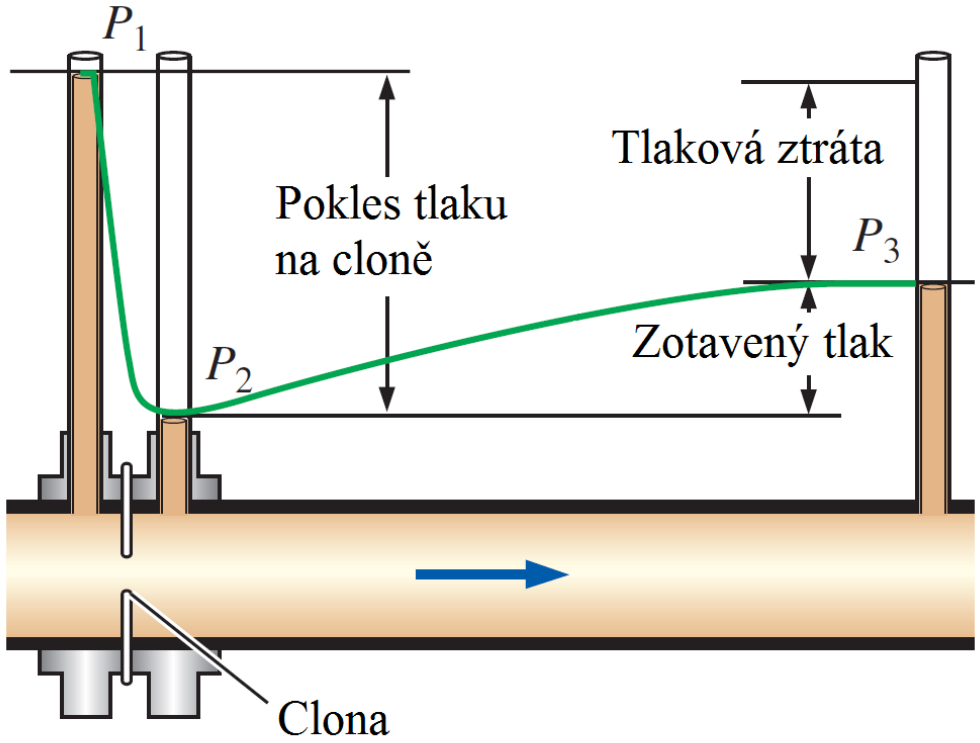






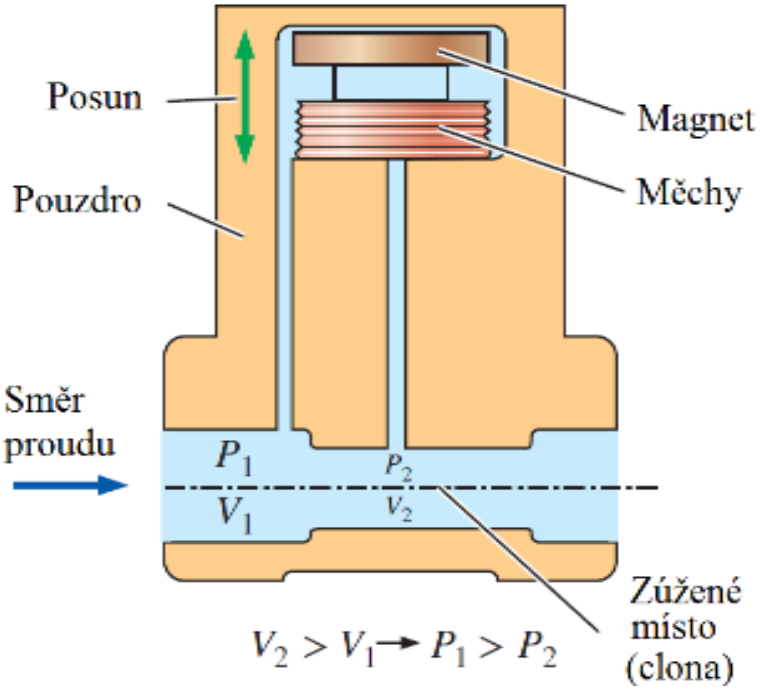
Měření průtoku tekutin

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – Pokles tlaku na cloně a tl. ztráta



Měření průtoku tekutin

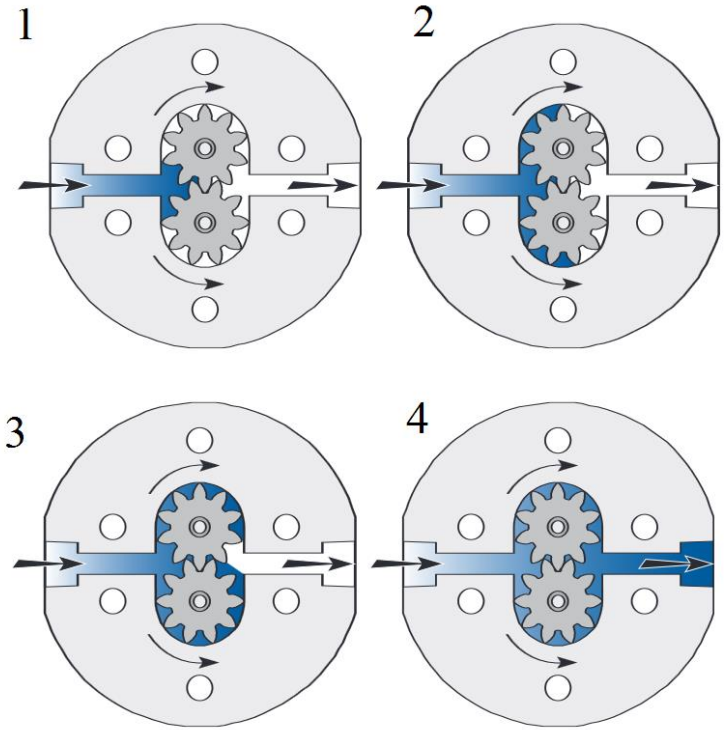
Měření průtoku pomocí tlakové diference – Obecná překážka (kalibrace)





Měření průtoku tekutin

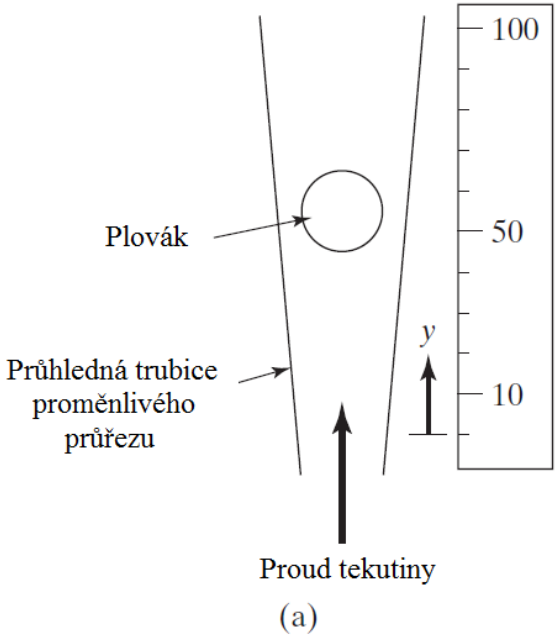
Objemový průtokoměr

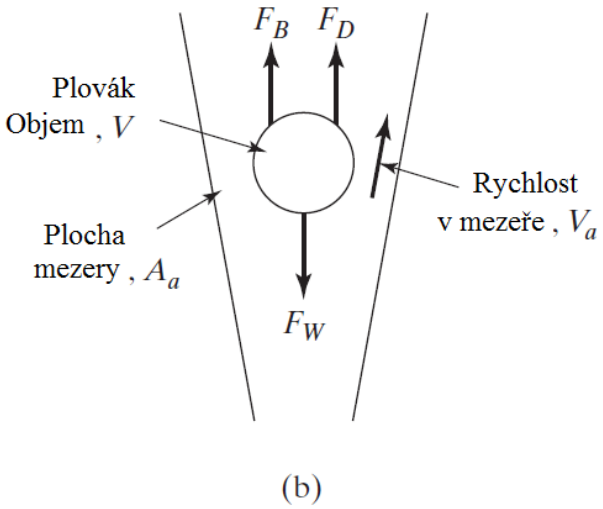




Měření průtoku tekutin

Plováčkový průtokoměr (rotametr)







Měření průtoku tekutin

Turbínkové (vrtulkové) průtokoměry

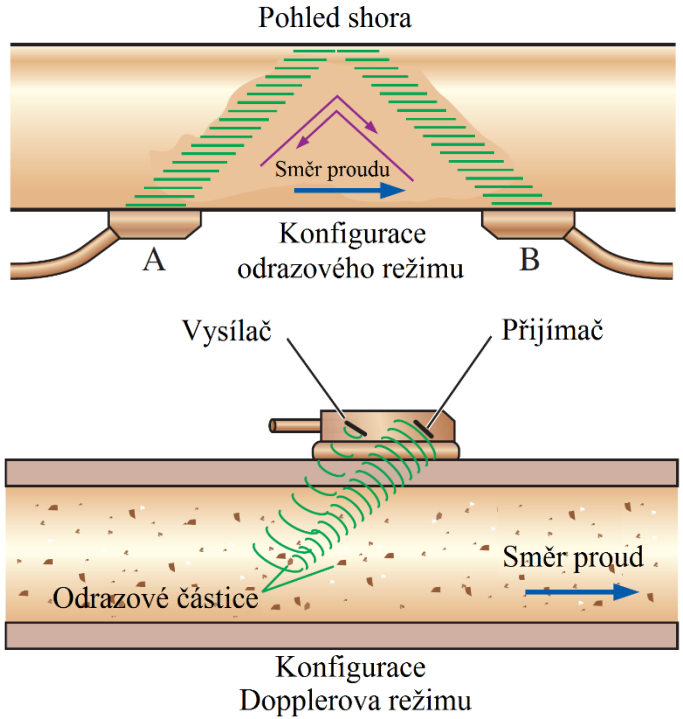


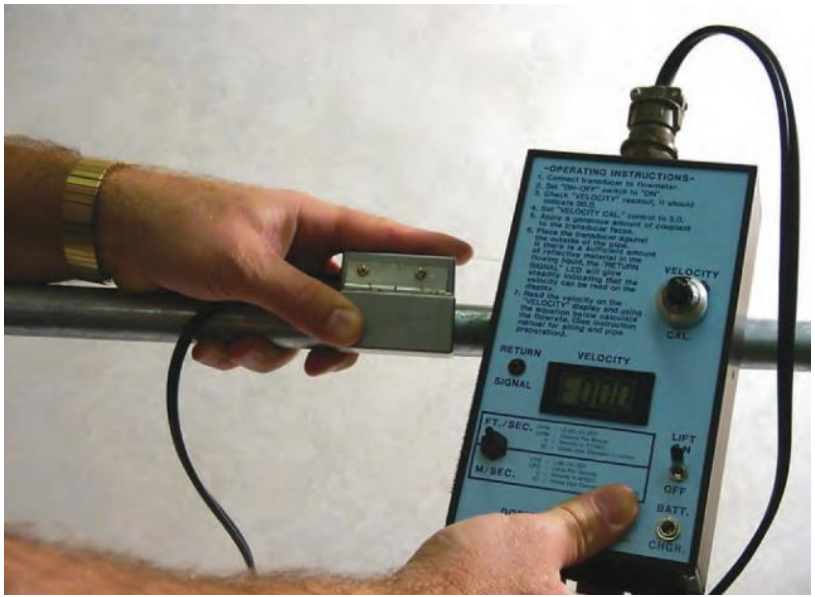




Měření průtoku tekutin

Ultrazvukový průtokoměr







Děkuji za pozornost

Jan Kracík (jan.kracik@tul.cz)