MĚŘENÍ PRŮTOKU A PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ

Výsledek měření průtoku může být udáván buď jako **hmotnostní** nebo jako **objemový** průtok:

$$Q_m = \frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \quad [\mathrm{kg.s^{-1}}] \qquad\qquad Q_V = \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \quad [\mathrm{m^3.s^{-1}}]$$

Měřidla průtoku vybavená integračním zařízením udávají proteklé množství:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m \mathrm{d}t \quad [\mathrm{kg}] \qquad\qquad V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V \mathrm{d}t \quad [\mathrm{m^3}]$$

Průtok je možno vyhodnotit i na základě měření místní či střední rychlosti média proudícího známým průřezem:

$$Q_V = \int_S v.\mathrm{d}S = \bar{v}.S \quad [\mathrm{m^3.s^{-1}}]$$

v, $\bar{v}$ - místní, resp. střední rychlost [$\mathrm{m^3.s^{-1}}$]
S - průřez potrubí [$\mathrm{m^2}$]

1

Význam měření průtoku

- informace o toku materiálu
- **podklad pro bilance** během technologického procesu
- bilance při příjmu a expedici produktů
- **informace pro řízení** procesu
- bilanční měření znečišťujících látek v oblasti ochrany životního prostředí

Snímače průtoku

- využívá se celé řady funkčních principů
- existují značné rozdíly v chemických a fyzikálních vlastnostech tekutin, jejichž průtok je nutno měřit
- většinou je měřen průtok či proteklé množství při provozních podmínkách
- modernější přístroje provádí automatickou korekci a přepočítávají údaj na vztažné podmínky
- současný trend je zaměřen na přímé měření hmotnostního průtoku (měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě média)

2

Přehled průtokoměrů

- **Objemová měřidla**
  - membránový plynoměr
  - bubnový plynoměr
  - pístová měřidla
- **Průtokoměry s měřením tlakové diference**
  - rychlostní sondy
  - průřezová měřidla
  - kapilární průtokoměr
- **Rotametry**
- **Průtokoměry turbinkové a lopatkové**
- **Ultrazvukové průtokoměry**
- **Průtokoměry vírové**
- **Průtokoměry hmotnostní**
  - Coriolisův průtokoměr
  - tepelné průtokoměry

3

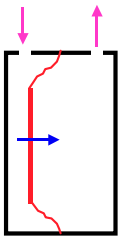
Objemová měřidla proteklého množství

- odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorách
- cyklické plnění a vyprazdňování odměrných prostor
- měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů

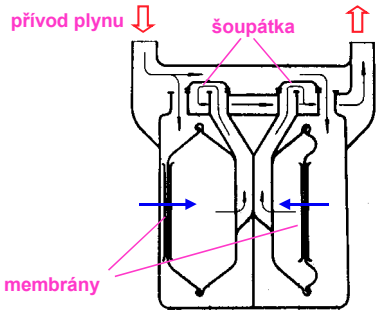
Membránový plynoměr

Princip:

- komora rozdělená pohyblivou membránou
- přívod a odvod je ovládán šoupátkovým rozvodem
- počet cyklů je měřen počítadlem



Provedení se dvěma komorami:



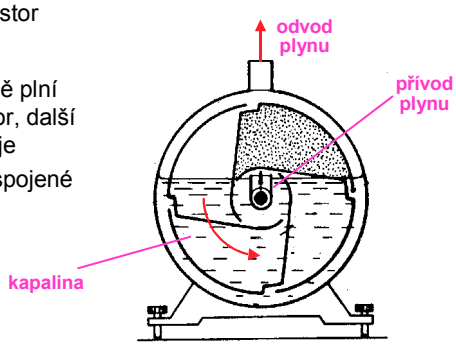
- **bilanční měřidlo pro obchodní a odběratelskou síť**

4

Bubnový plynoměr

- **otočný buben** rozdělený radiálními přepážkami na čtyři odměrné prostory opatřené štěrbinami pro přívod a odvod plynu
- buben je umístěn v nádobě vyplněné zčásti kapalinou, která tvoří uzávěr odměrných prostor

- zatímco plyn postupně plní jeden odměrný prostor, další prostor se vyprazdňuje
- s hřídelem bubnu je spojené počítadlo proteklého množství



- **měřidlo pro přesná laboratorní a ověřovací měření**

5

Pístová měřidla

- měřenou kapalinou se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory vymezené pístem a tělesem měřidla
- užívá se dvou a více odměrných prostorů pro zajištění plynulé funkce

Pohyb pístu:

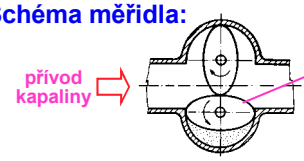
- **přímočarý vratný pohyb**
  - pístní tyč ovládá šoupátkový rozvod a počítadlo
- **točivý nebo krouživý pohyb**
  - pohyb pístu ovládá počítadlo nebo je převeden na elektrické impulsy (např. elektromagnetický indukční snímač)

6

Oválové měřidlo

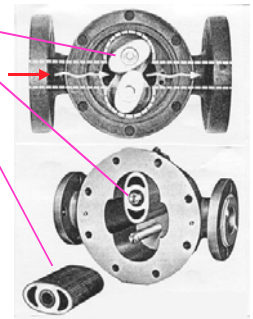
- v měřicí komoře se odvalují dvě **oválová tělesa**
- hnací síla je dána rozdílem tlaků na přední a zadní stěně těles

Schéma měřidla:

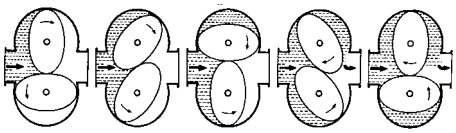


oválová tělesa

Provedení měřidla:



Fáze pracovního cyklu:



Pro bilanční měření různých druhů kapalin:
- organické kapaliny (lihoměry, měřidla pohonných hmot, olejů apod.)
- potravinářský průmysl (mléko)

7

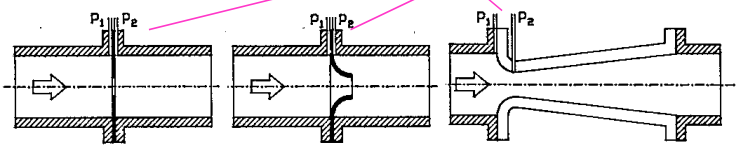
Průtokoměry s měřením tlakové diference

- v potrubí dochází ke **zúžení průtočného průřezu**
- **rozdíl statických tlaků** snímaný diferenčním tlakoměrem před a za zúžením je **závislý na velikosti průtoku**

Průřezová měřidla

Škrticí orgány:

snímání tlakové diference



clona **dýza** **Venturiho dýza**

- dříve velmi rozšířená metoda měření průtoku plynů i kapalin
- v současné době je nahrazována modernějšími snímači s přímým elektrickým výstupem

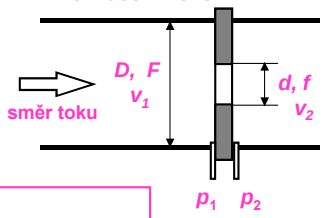
8

Teoretické vztahy pro průřezová měřidla

- základní vztahy pro odvození:
  - **rovnice kontinuity toku**
  - **rovnice Bernoulliho**
- definujeme poměr zúžení ***m***:

$$m = \frac{f}{F} = \frac{d^2}{D^2}$$

označení veličin:



d, D - průměr [m]	p_1 , p_2 - tlak [Pa]
f, F - průřez [m²]	v_1 , v_2 - rychlost proudění [m.s⁻¹]

- aplikací základních vztahů dostaneme vztah pro objemový průtok:

$$Q_V = f.v_2 = f\frac{1}{\sqrt{1-m^2}}\sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho}}$$

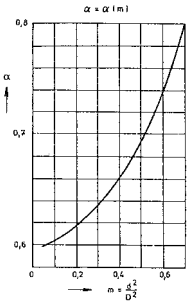
- za clonou se proudnice ještě zužují, rychlost ještě vzrůstá, což je respektováno dalšími opravnými koeficienty, které jsou zahrnuty do tzv. **průtokového součinitele** α

9

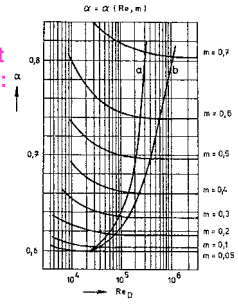
Průtokový součinitel α

- hodnoty průtokového součinitele byly stanoveny na základě modelových pokusů pro tzv. **normovaná měřidla** (zachování geometrické a hydrodynamické podobnosti)
- hodnoty α se zjišťují **z tabulek nebo grafů**
- průtokový součinitel závisí na poměru zúžení a na Reynoldsově čísle

Závislost α na *m*:



Závislost α na Re:



- průřezová měřidla jsou vhodná pro měření průtoků v oblasti **vyšší turbulence**, kde α **nezávisí na Re**

10

Expansní součinitel ε

- při průtoku plynů a par škrticím orgánem nastává při poklesu tlaku expanse a dochází ke změně hustoty média
- zavádí se proto expansní součinitel ε
- hodnoty ε se zjišťují **z nomogramů**

Výsledný vzorec pro objemový průtok:

$$Q_V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

- údaj o průtoku **spočítáme na základě naměřené diference tlaku**
- hodnoty součinitelů α a ε jsou uvedeny v normách pro výpočet průřezových měřidel
- výhodou normovaných průřezových měřidel je, že **není nutné provádět kalibraci** a údaj o průtoku vypočítáme s deklarovanou přesností podle normovaného postupu

11

Měřicí zařízení s průřezovým měřidlem

Měřicí zařízení tvoří:

- **škrticí orgán**
  - clona, dýza, Venturiho dýza
- **diferenční tlakoměr**
  - snímání diference tlaku na škrticím elementu
- **ventilová souprava**
  - umožňuje připojení diferenčního tlakoměru
  - proplachování a odkalování signálního potrubí
  - odvzdušnění signálního potrubí

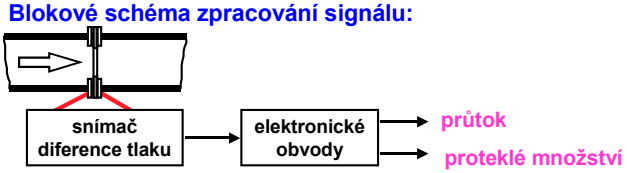
Tlaková ztráta měřidla

- vzniká třením a vířením před a za měřidlem
- je vždy menší než měřená diference tlaku na škrticím orgánu
- největší tlakovou ztrátu vykazuje clona, nejmenší Venturiho dýza

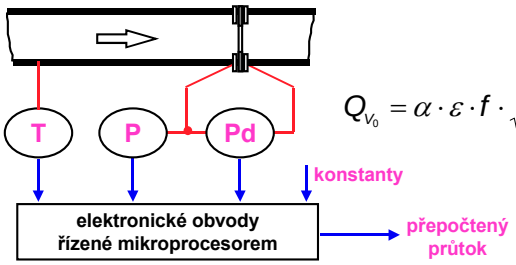
12

Zpracování signálu z průřezového měřidla

Blokové schéma zpracování signálu:



Měření průtoku s automatickou korekcí vlivu teploty a tlaku:



$$Q_{V_0} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2 p_1 T_0 (p_1 - p_2)}{\rho . p_0 T}}$$

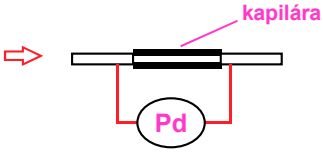
13

Kapilární průtokoměr

- škrticím elementem je kapilára
- pro laminární tok kapilárou platí Hagen-Poiseuilova rovnice:

$$Q_V = \frac{\pi . d^4}{128 . \eta . l} \cdot (p_1 - p_2)$$

Q_V - objemový průtok [m^3.s^{-1}]
p_1 , p_2 - tlak [Pa]
d, l - průměr a délka kapiláry [m]
η - dyn. viskozita [Pa s]



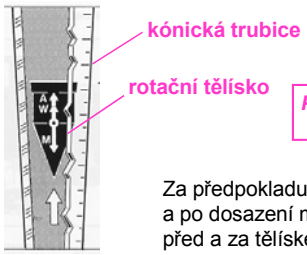
- místo jedné kapiláry je možno zařadit soustavu kapilár či lamel nebo keramickou či kovovou fritu

- průtokoměr vhodný pro laboratorní aplikace pro měření malých průtoků
- podmínkou je čistota měřeného média
- pro měření diference tlaku se používá běžně kapalinových manometrů
- je možno využít citlivých snímačů s polovodičovými tenzometry

14

Rotametry

- rotametry patří mezi průřezová měřidla, u kterých se s měnicím průtokem mění průtočná plocha při stálém tlakovém rozdílu před zúžením a za ním
- hlavní funkční části rotametru:
  - svislá měřicí **trubice** mírně **kuželovitého tvaru**, nahoru se rozšiřující (úhel kužele je menší než 2 stupně)
  - uvnitř trubice se vznáší **rotující tělísko** (nevhodně označované jako plováček)
- výstupním signálem je vertikální **poloha tělíska**



Síly působící v těžišti tělíska:

$$F_G = F_V + F_P + F_T$$

F_G, F_V, F_P, F_T - síla gravitační, vztlaková, tlaková, třecí

Za předpokladu turbulentního obtékání lze F_T zanedbat a po dosazení můžeme vyjádřit vztah pro tlakový spád před a za tělískem, který je konstantní.

15

Provedení rotametrů

- rotametry umožňují měřit průtoky homogenních tekutin s nejrůznějšími fyzikálními vlastnostmi
- měřicí rozsahy od 0,1 l/h až do 25 m³/h
- měřicí trubice bývá nejčastěji skleněná
- polohu tělíska lze snímat vizuálně, magneticky, fotoelektricky, indukčním snímačem a pod.

Laboratorní průtokoměry:

Provozní rotametry:

16

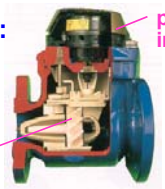
Průtokoměry turbinkové a lopatkové

- turbinka, lopatkové nebo šroubové kolo uváděné do otáčivého pohybu silovým účinkem proudící tekutiny
- rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění
- závislost frekvence otáčení popisuje rovnice:

$$f = k.Q_V - s$$

f -frekvence otáčení [s^{-1}]
Q_V - objemový průtok [$m^3.s^{-1}$]
k - konstanta [m^{-3}]
s - skluz měřidla [s^{-1}]

Axiální průtokoměr:



- osa rotace leží ve směru toku média
- impulsní snímání otáček bezdotykově - indukčně, fotoelektricky, elektromagneticky

- **frekvence otáčení** je úměrná okamžitému průtoku
- **celkový počet otáček** závisí na proteklém množství

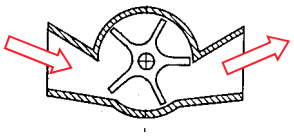
17

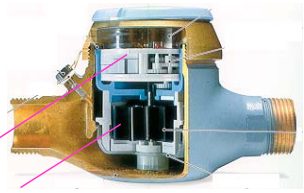
Lopatkový radiální průtokoměr

- osa rotace je kolmá k ose toku média

Princip:
- jednovtokový lopatkový průtokoměr

Provedení:
- vícevtokový lopatkový průtokoměr



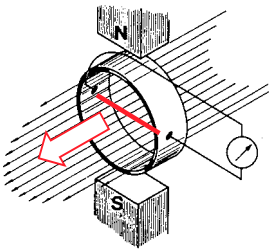


- **výhody:** - výstupní signál ve formě frekvence
- **nevýhody:** - poměrně velká chyba v počátku stupnice
  - průtokoměr neměří od nuly, rotor měřidla se začíná otáčet až od $Q_{min.}$
  - průtokoměr vykazuje tlakovou ztrátu

18

Indukční průtokoměry

- využívají Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v magnetickém poli



- pohybující vodič je představován elektricky vodivou kapalinou mezi elektrodami
- permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole
- úsek potrubí musí být z neferomagnetického a nevodivého materiálu
- elektrody pro snímání indukovaného napětí jsou na vnitřní stěně trubky kolmo na směr magnetických siločar

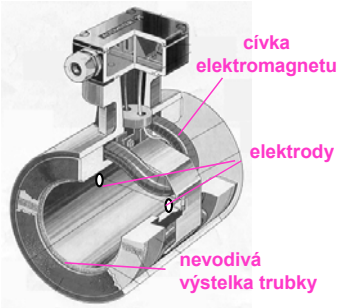
- pro indukované elektromagnetické napětí platí: $E = B \cdot d \cdot v$

E - indukované napětí [V]	***B*** - magnetická indukce [T]
d - vzdálenost elektrod [m]	***v*** - rychlost kapaliny [ms^{-1}]

- za určitých podmínek platí, že indukované napětí je úměrné střední rychlosti proudící kapaliny.

19

Provedení indukčního průtokoměru



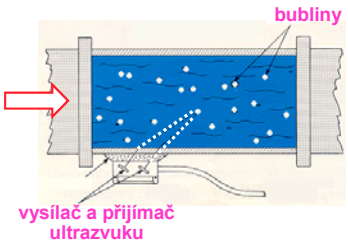
- indukční průtokoměry se vyrábějí s průměrem od 2 mm až do 2 m
- jen pro vodivé kapaliny (vodivost větší než 1 μS)
- vhodné pro měření viskózních kapalin, kalů, kapalin s vysokým obsahem sedimentujících částic
- průtokoměr nevykazuje tlakovou ztrátu
- může být zabudován do potrubí v libovolné poloze

20

Ultrazvukové průtokoměry

Průtokoměry využívající Dopplerova jevu

- použitelný pro proudící média, obsahující částice odrážející zvuk (pevné částice nebo bubliny plynu v kapalině)
- průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku, které jsou připevněny na jedné straně potrubí



- vysílač vysílá UZ-signál o známé frekvenci (okolo 0,5 MHz)
- UZ-signál odražený od pohybující se částice je zachycen přijímačem
- změna frekvence přijatého signálu závisí na rychlosti pohybu částice
- vzdaluje-li se částice od detektoru, pak platí vztah:

$$f' = \frac{c}{c+v} \cdot f$$

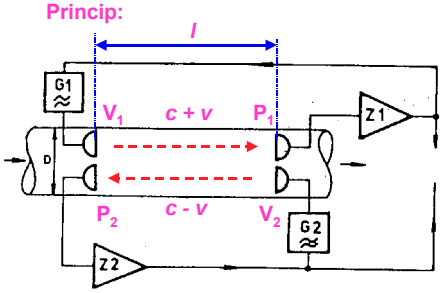
f, f' -frekvence vysílaná a přijímaná
c, v - rychlost ultrazvuku a rychlost média

21

Průtokoměry s vyhodnocením doby šíření UZ-signálu

- pracují v diferenčním zapojení
- UZ-signál ve formě impulsu se vysílá ve směru a proti směru proudění
- vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření

Princip:



$$t_1 = \frac{l}{c+v} \qquad f_1 = \frac{c+v}{l}$$

$$t_2 = \frac{l}{c-v} \qquad f_2 = \frac{c-v}{l}$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v}{l}$$

- výsledný údaj nezávisí na rychlosti UZ v médiu (nezávisí na složení média, na teplotě a na tlaku)

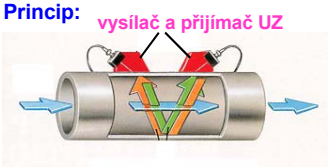
22

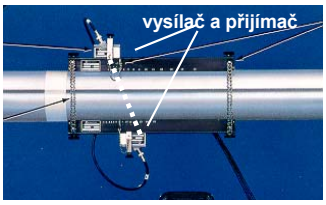
Provedení UZ-průtokoměru

- UZ-signál se vysílá napříč potrubím pod úhlem α
- někdy se využívá odrazu od protější stěny potrubí

$\Delta f = k \,.\, v \,.\, \cos \alpha$

Princip:



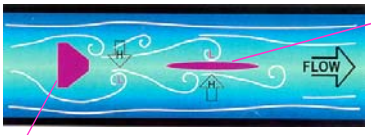


- přístroje nevykazují žádnou tlakovou ztrátu
- bezdotykové měření

23

Vírové průtokoměry

- využívá se tvorby tzv. Karmánových vírů při obtékání tělesa neproudnicového tvaru
- víry vznikají střídavě z jedné a druhé strany přepážky, která je vložena do potrubí
- frekvence tvorby vírů je funkcí rychlosti proudění

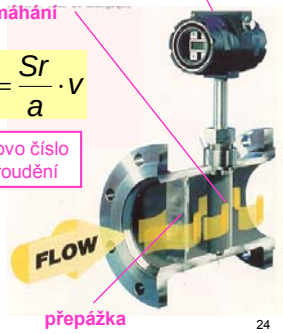


přepážka

snímání silového namáhání

$$f = \frac{Sr}{a} \cdot v$$

f - frekvence vírů
a - šířka přepážky
Sr - Strouhalovo číslo
v - rychlost proudění



Snímání frekvence vírů:

- tenzometrické snímače
- piezoelektrické snímače
- ochlazování vyhřívaného termistoru
- ultrazvukové snímače

24

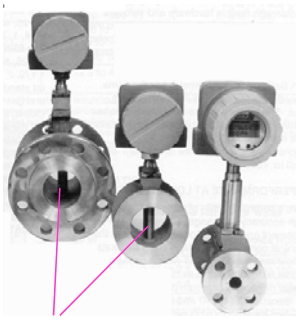
Přednosti vírových průtokoměrů

- neobsahují pohyblivé součásti
- poskytují lineární signál v širokém rozmezí (2 až 100) %
- výstupní veličinou je frekvence (výhodné pro číslicové zpracování signálu)
- slouží jako náhrada klasických průřezových měřidel
- vyrábí se pro jmenovité světlosti od 15 mm až do 300 a více mm
- pro vyhodnocení signálu se užívá obvodů řízených μP

Nevýhody:

- vykazují tlakovou ztrátu
- nehodí se pro měření malých průtoků, jsou vhodné jen pro turbulentní proudění
- při měření nesmí docházet k vibracím potrubí (čerpadla)

Provedení vírových průtokoměrů:



přepážka

25

Průtokoměry hmotnostní

- většina průtokoměrů je vyráběna jako měřidla objemová
- údaj objemových průtokoměrů je ovlivňován změnami teploty, tlaku a hustoty

Pro stanovení **hmotnostního průtoku** se využívá:

- **aplikace mikroprocesorové techniky** ve spojení s konvenčními průtokoměry
  - hmotnostní průtok zjišťuje výpočtem
- **Coriolisových průtokoměrů**
- **tepelných průtokoměrů**

26

Coriolisův průtokoměr

- princip využívá Coriolisovy síly
- v otočné soustavě se pohybuje těleso o hmotnosti m rychlostí $\vec{v}$
- soustava se otáčí úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$
- na těleso působí Coriolisovo zrychlení $\vec{a}_c$ $\quad \vec{a}_c = 2(\vec{v} \times \vec{\omega})$
- Coriolisovu sílu, která působí ve směru kolmém na rovinu vektorů $\vec{v}$ a $\vec{\omega}$ na element o hmotnosti Δm pak můžeme vyjádřit vztahem:

$$\Delta \vec{F}_C = 2\Delta m(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

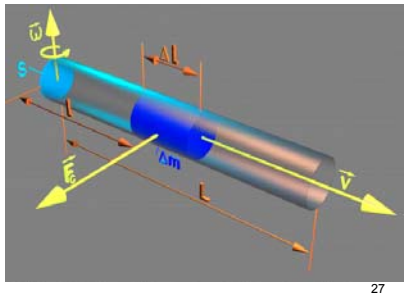
vektory $\vec{v}$ a $\vec{\omega}$ jsou navzájem kolmé

- vyjádříme rychlost $\vec{v}$: $\vec{v} = \dfrac{\Delta l}{\Delta t}$
- vyjádříme Coriolisovu sílu:

$$\Delta F_C = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot 2\omega \cdot \Delta l$$

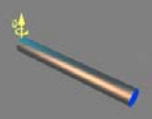
$$\Delta F_C = 2 \cdot \omega \cdot Q_m \cdot \Delta l$$

Coriolisova síla působící na element tekutiny je úměrná hmotnostnímu průtoku Q_m

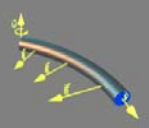


27

Animace deformace potrubí



pro nulový průtok



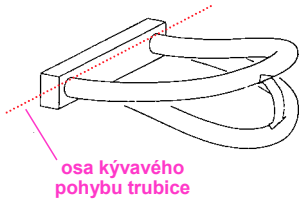
pro nenulový průtok

28

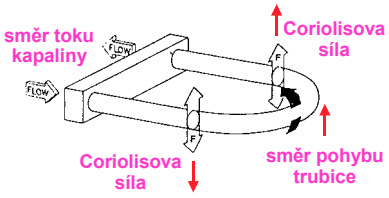
Konstrukce senzorů využívající Coriolisovy síly

- základem senzoru je **měřicí trubice ve tvaru písmene U**
- otáčivý pohyb je nahrazen **kmitáním** kolem osy $\vec{\omega}$
- trubice je rozkmitávána elektromagnetickou silou a vykonává **periodický kývavý pohyb** s harmonickým průběhem o kmitočtu ω
- při protékající tekutině budou Coriolisovy síly působící na úseky trubice ve směru toku **opačné ve vtokové a výtokové části**

Vibrující měřicí trubice:

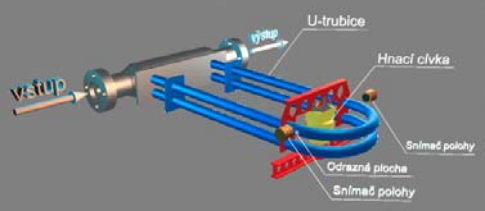


Silové působení na vibrující trubici:



29

Schéma průmyslově vyráběného průtokoměru

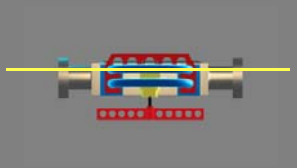


- Vyhodnocení maxima periodicky proměnného kroutícího momentu se provádí prostřednictvím dvou polohových senzorů.
- Signál z polohových senzorů, který je lineárně úměrný hmotnostnímu průtoku je dále zpracován v elektronických obvodech.

30

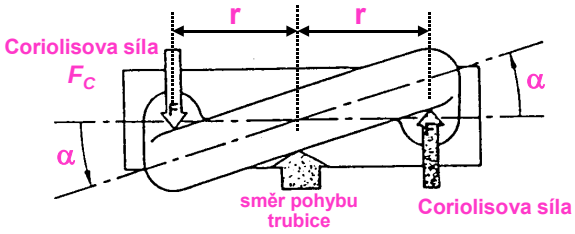
Animace kinematiky U-trubice

- Na axonometrickém pohledu je dobře patrné rozkmitávání trubice elektromagnetem.
- Na pohledu zpředu je vidět deformace trubice



31

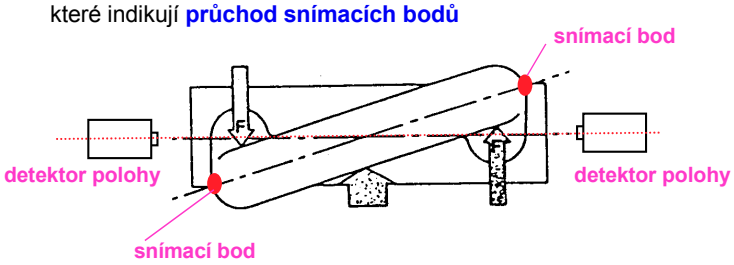
- přímé snímání ΔF_C by bylo obtížné, vyhodnocuje se účinek **momentu síly**: $\Delta M = 2 \cdot F_C \cdot r$



- důsledkem působení silové dvojice vzniká celkový moment M, který způsobí **zkroucení trubice**
- při kývavém pohybu trubice se úhlová rychlost mění a dosahuje maxima při průchodu středu trubice klidovou polohou
- také Coriolisova síla a moment síly mají harmonický průběh
- působící moment je v rovnováze s direktivním momentem trubice, který závisí na tuhosti trubice
- **úhel zkroucení trubice je měronosnou veličinou měřeného průtoku**

32

- celková deformace ramen se zjišťuje pomocí **detektorů polohy**, které indikují **průchod snímacích bodů**

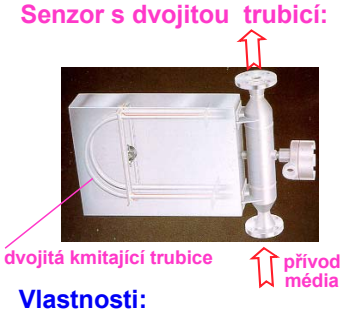


- při pohybu trubice směrem nahoru indikuje průchod snímacího bodu nejprve pravý detektor a za interval Δt levý detektor
- velikost Δt je úměrná hmotnostnímu průtoku a snímá se jednou za periodu kmitů trubice

33

Provedení Coriolisova průtokoměru

Senzor s dvojitou trubicí:



Provozní aplikace:

Vlastnosti:

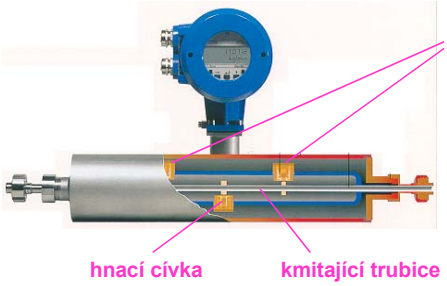
- údaj nezávisí na změnách hustoty, teploty,tlaku, viskozity
- měřicí rozsahy od 20 g/min až do několika tisíc kg/min
- může pracovat při teplotách od -240 °C do +200 °C

Aplikace:

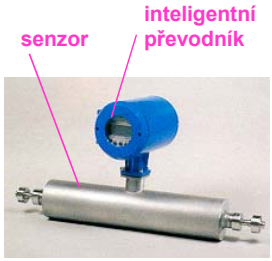
- široké uplatnění od měření kapalného dusíku až po měření silně viskózních a pastovitých hmot
- nevadí přítomnost pěny, bublin či suspendovaných částic

34

Coriolisův průtokoměr s přímou trubkou



- z nesymetrie výstupních signálů senzorů polohy lze určit velikost průtoku



Vlastnosti a aplikace:

- prakticky nulová tlaková ztráta
- snadné čistění
- vhodný pro aplikace v potravinářském průmyslu (nápojový průmysl, kašovité a pastovité hmoty)

35

Tepelné průtokoměry

- princip spočívá ve vyhodnocování energetické rovnováhy při sdílení tepla z elektricky vyhřívaného topného elementu do proudící tekutiny
- dvě varianty senzorů:
  - měří se **ochlazování topného tělesa**
  - měří se **oteplení proudící tekutiny**

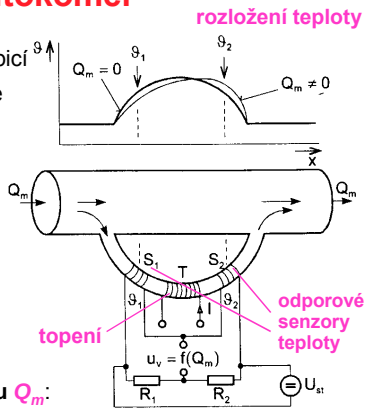
Termoanenomometrický senzor

- teplo odvedené ze žhaveného drátku či vyhřívaného termistoru do tekutiny je závislé na rychlosti proudicí tekutiny
- vyhodnocuje se změna teploty odporového senzoru
- používá se k proměřování rychlostních profilů

36

Diferenční tepelný průtokoměr

- tekutina je vedena tenkostěnnou tepelně dobře vodivou kovovou trubicí
- na středu trubice je umístěno topné vinutí
- po obou stranách jsou symetricky navinuty odporové senzory teploty
- při nulovém průtoku je rozložení teploty v trubici symetrické
- při průtoku tekutiny se symetrické rozložení poruší
- naměřený teplotní rozdíl závisí v omezeném rozsahu průtoků **lineárně na hmotnostním průtoku** Q_m:



$$\upsilon_2 - \upsilon_1 = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m$$

A - konstanta [$s^2 .K^2.J^{-2}$]
c_p - měrné teplo [$J .kg^{-1}.K^{-1}$]
P - tepelný příkon [$J.s^{-1}$]

Provedení tepelného průtokoměru

Aplikační možnosti

- měření a regulace průtoku čistých tekutin
- pro měření malých průtoků zejména v laboratorních podmínkách
- měřicí rozsahy od 3 ml/min až do desítek l/min

Volba vhodného typu průtokoměru

Při výběru vhodného průtokoměru je zapotřebí zvažovat řadu kritérií:

- **charakteristika měřeného média** (chemické a fyzikální vlastnosti)
- **podmínky měření** (teplota, tlak)
- **účel měření** (bilanční měření, čidlo regulátoru)
- **měřicí rozsah**
- **linearita** statické charakteristiky
- **přesnost, opakovatelnost**
- **zpracování signálu** (analogový, číslicový výstup, komunikace s počítačem)
- **tlaková ztráta**
- **montáž měřidla**, servis a údržba přístroje
- potřeba dalších **pomocných zařízení**
- **finanční náklady**