

MĚŘENÍ PRŮTOKU A PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ

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

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Q_v = \frac{dV}{dt} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Měřidla průtoku vybavená integračním zařízením udávají **proteklé množství**:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad [\text{kg}]$$

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_v dt \quad [\text{m}^3]$$

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

$$Q_v = \int_S v \cdot dS = \bar{v} \cdot S \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

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

1

Význam měření průtoku

- informace o toku materiálu
- podklad pro bilanci** 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 difference**
 - rychlostní sondy
 - průřezová měřidla
 - kapilární průtokoměr
- Rotometry**
- Průtokoměry turbínkové a lopatkové**
- Indukční průtokoměry**
- Ultrazvukové průtokoměry**
- Průtokoměry vírové**
- Průtokoměry hmotnostní**
 - Coriolisův průtokoměr
 - tepelné průtokoměry

3

Objemová měřidla proteklého množství

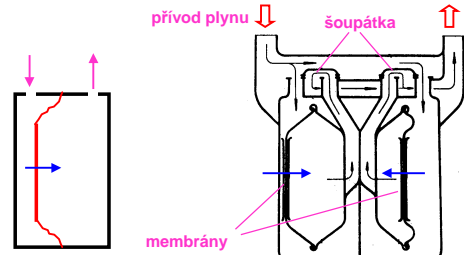
- odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorách
- cyklické plnění a vyprazdňování odměrných prostor
- měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů

Membránový plynoměr

Princip:

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

Provedení se dvěma komorami:



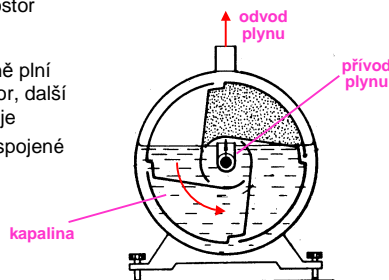
- bilanční měřidlo pro obchodní a odběratelskou síť**

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 spojeno 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:

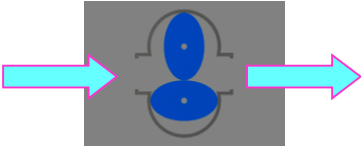
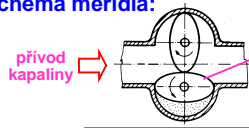
- přímočarý vratný pohyb**
 - pístní tyč ovládá šoupátkový rozvod a počítadlo
- točivý nebo krouživý pohyb**
 - pohyb pístu ovládá počítadlo nebo je převeden na elektrické impulsy (např. elektromagnetický indukční snímač)

6

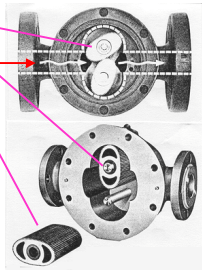
Oválné měřidlo

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

Schéma měřidla:



Provedení měřidla:



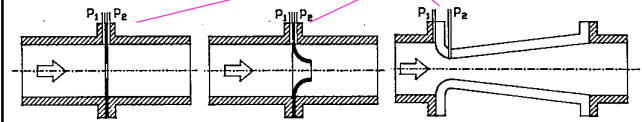
Pro bilanční měření různých druhů kapalin:
 – organické kapaliny (lihoměry, měřidla pohonných hmot, olejů apod.)
 – potravinářský průmysl (mléko)

Průtokoměry s měřením tlakové difference

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

Průřezová měřidla

Škrticí orgány:



clona

dýza

Venturiho dýza

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

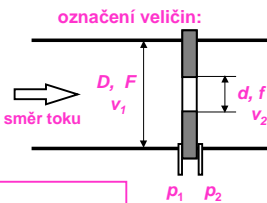
11

Teoretické vztahy pro průřezová měřidla

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

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

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:

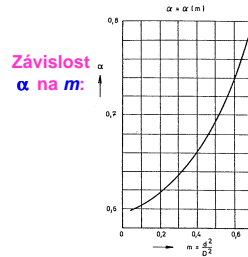
$$Q_v = f \cdot v_2 = f \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

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

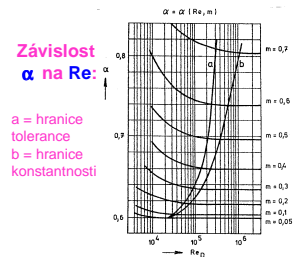
12

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 :

a = hranice tolerance
 b = hranice konstantnosti

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

13

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:

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

- údaj o průtoku **spočítáme na základě naměřené difference 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

14

Měřicí zařízení s průřezovým měřidlem

Měřicí zařízení tvoří:

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

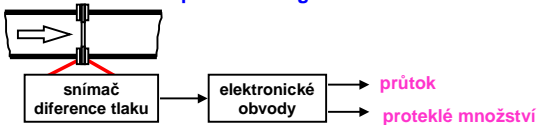
Tlaková ztráta měřidla

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

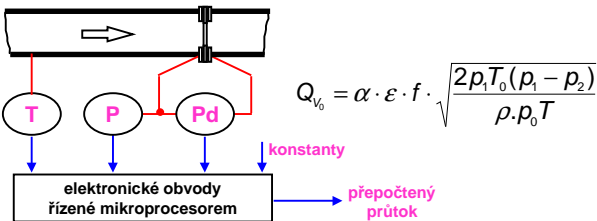
15

Zpracování signálu z průřezového měřidla

Blokové schéma zpracování signálu:



Měření průtoku s automatickou korekcí vlivu teploty a tlaku:



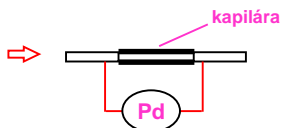
16

Kapilární průtokoměr

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

$$Q_v = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot (\rho_1 - \rho_2)$$

Q_v - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ_1, ρ_2 - tlak [Pa]
 d, l - průměr a délka kapiláry [m]
 η - dyn. viskozita [Pa s]



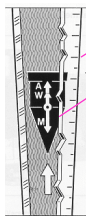
- místo jedné kapiláry je možno zařadit soustavu kapilár či lamel nebo keramickou či kovovou fritu

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

17

Rotametry

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



kónická trubice
rotační tělísko

Sily působící v těžišti tělíska:

$$F_G = F_V + F_P + F_T$$

F_G, F_V, F_P, F_T - síla gravitační, vztlačková, 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.

18

Provedení rotametru

- 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:



rotační tělísko

19

Průtokoměry turbínkové a lopatkové

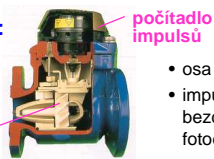
- turbinka, lopatkové nebo šroubové kolo uváděné do otáčivého pohybu silovým účinkem proudící tekutiny
- rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění
- závislost frekvence otáčení popisuje rovnice:

$$f = k \cdot Q_v - s$$

f - frekvence otáčení [s^{-1}]
 Q_v - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 k - konstanta [m^{-3}]
 s - skluz měřidla [s^{-1}]

Axiální průtokoměr:

směr toku
šroubové kolo



- 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



20

Lopatkový radiální průtokoměr

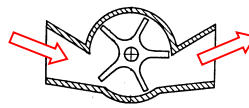
- osa rotace je kolmá k ose toku média

Princip:

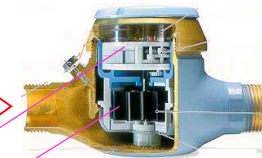
- jednovtokový lopatkový průtokoměr

Provedení:

- vícetvokový lopatkový průtokoměr



mechanické počítadlo nebo vysíláč impulsů



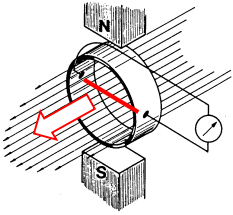
lopatkové kolo

- 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

21

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 elektrické napětí platí: $E = B \cdot d \cdot v$

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

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

22

Provedení indukčního průtokoměru



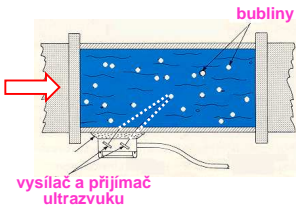
- indukční průtokoměry se vyrábějí s průměrem od 2 mm až do 2 m
- jen pro vodivé kapaliny (vodivost větší než 1 μS)
- vhodné pro měření viskózních kapalin, kalů, kapalin s vysokým obsahem sedimentujících částic
- průtokoměr nevykazuje tlakovou ztrátu
- může být zabudován do potrubí v libovolné poloze

23

Ultrazvukové průtokoměry

Průtokoměr 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:

$$f, f' - \text{frekvence vysílaná a přijímaná} \\ c, v - \text{rychlost ultrazvuku a rychlost média}$$

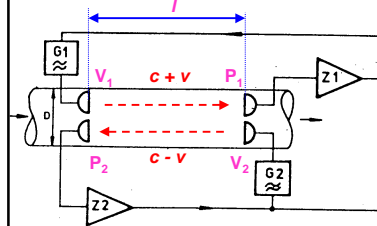
$$f' = \frac{c}{c + v} \cdot f$$

24

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:



$$t_1 = \frac{L}{c + v} \quad f_1 = \frac{c + v}{L} \\ t_2 = \frac{L}{c - v} \quad f_2 = \frac{c - v}{L} \\ \Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v}{L}$$

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

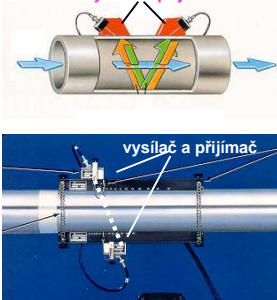
25

Provedení UZ-průtokoměru

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

$$\Delta f = k \cdot v \cdot \cos \alpha$$

Princip: vysílač a přijímač UZ

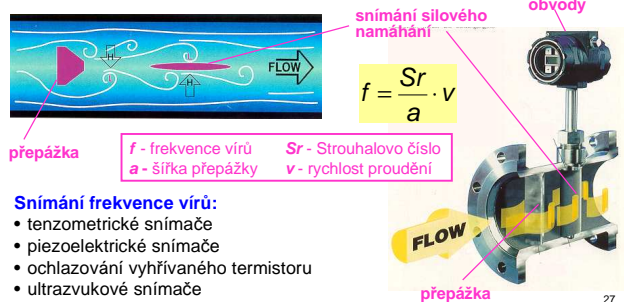


- přístroje nevykazují žádnou tlakovou ztrátu
- bezdotykové měření

26

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

$$f - \text{frekvence vírů} \quad Sr - \text{Strouhalovo číslo} \\ a - \text{šířka přepážky} \quad v - \text{rychlost proudění}$$

Snímání frekvence vírů:

- tenzometrické snímače
- piezoelektrické snímače
- ochlazování vyhřívávaného termistoru
- ultrazvukové snímače

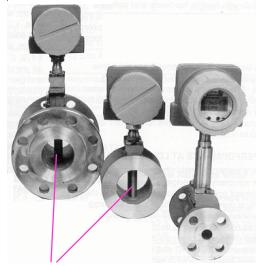
přepážka

27

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

Provedení vírových průtokoměrů:



přepážka

Nevýhody:

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

28

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

29

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 $\vec{a}_c = 2(\vec{v} \times \vec{\omega})$
- 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

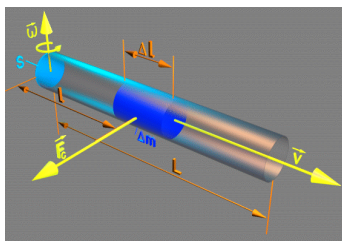
- vyjádříme rychlost \vec{v} : $\vec{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$

- vyjádříme Coriolisovu sílu:

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

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

Coriolisova síla působící na element tekutiny je úměrná hmotnostnímu průtoku Q_m



30

Animace deformace potrubí



pro nulový průtok

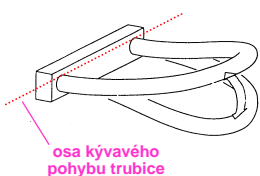
pro nenulový průtok

31

Konstrukce senzorů využívající Coriolisovy síly

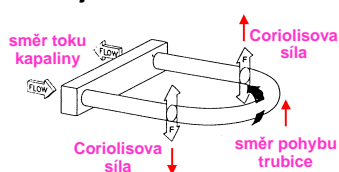
- základem senzoru je měřící trubice ve tvaru písmene U
- otáčivý pohyb je nahrazen kmitáním kolem osy $\vec{\omega}$
- trubice je rozkmitávána elektromagnetickou silou a vykonává periodický kývavý pohyb s harmonickým průběhem o kmitočtu $\vec{\omega}$
- při protékající tekutině budou Coriolisovy síly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

Vibrující měřící trubice:



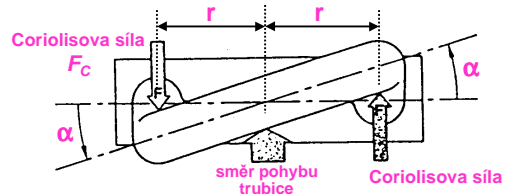
osa kývavého pohybu trubice

Silové působení na vibrující trubici:



32

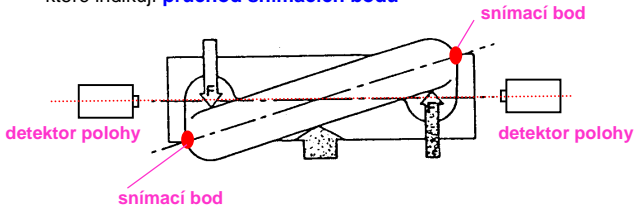
- přímé snímání ΔF_c by bylo obtížné, vyhodnocuje se účinek momentu síly: $\Delta M = 2 \cdot F_c \cdot r$



- 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 středů 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 měřenosnou veličinou měřeného průtoku**

33

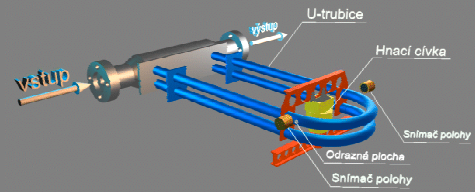
- celková deformace ramen se zjišťuje pomocí **detektorů polohy**, které indikují **průchod snímacích bodů**



- 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

34

Schéma průmyslové vyráběného průtokoměru

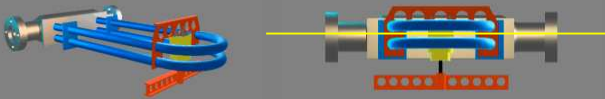


- Vyhodnocení maxima periodicky proměnného kroutícího momentu se provádí prostřednictvím dvou polohových senzorů.
- Signál z polohových senzorů, který je lineárně úměrný hmotnostnímu průtoku je dále zpracován v elektronických obvodech.

35

Animace kinematiky U-trubice

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



36

Provedení Coriolisova průtokoměru

Senzor s dvojitou trubicí:

Provozní aplikace:



Vlastnosti:

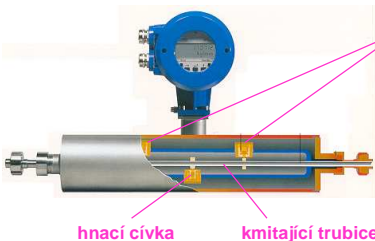
- údaj nezávisí na změnách hustoty, teploty, tlaku, viskozity
- měřicí rozsahy od 20 g/min až do několika tisíc kg/min
- může pracovat při teplotách od -240 °C do +200 °C

Aplikace:

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

37

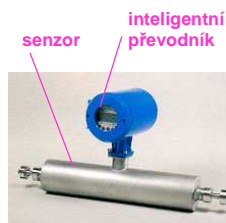
Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí



- z nesymetrie výstupních signálů senzorů polohy lze určit velikost průtoku

Vlastnosti a aplikace:

- prakticky nulová tlaková ztráta
- snadné čištění
- vhodný pro aplikace v potravinářském průmyslu (nápojový průmysl, kašovitě a pastovitě hmoty)



38

Tepelné průtokoměry

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

Termoanemometrický senzor

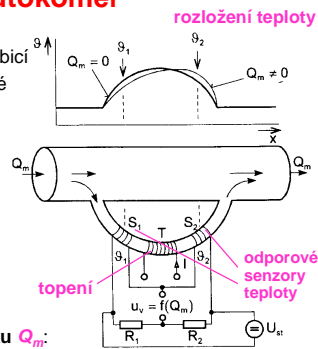
- teplo odvedené ze žhaveného drátku či vyhřívaného termistoru do tekutiny je závislé na rychlosti proudící tekutiny
- vyhodnocuje se změna teploty odporového senzoru
- používá se k proměňování rychlostních profilů



39

Diferenční tepelný průtokoměr

- tekutina je vedena tenkostěnnou tepelně dobře vodivou kovovou trubici
- 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** :



$$v_2 - v_1 = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m$$

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

40

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

41

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**

42