



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Výukové texty

pro předmět

*Měřicí technika*

(KKS/MT)

na téma

## Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění

Autor: Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění

### 1) Popis rychlosti proudění

Proudění média je vlastně pohyb, při kterém se částice látky pohybují svým pohybem vlastním pohybem a zároveň se pohybují ve směru proudění. Platí též, že medium (tj. plynné nebo kapalné) vždy proudí z místa vyššího tlaku (vyšší tlakové potenciální energie) do místa nižšího tlaku (nižší tlakové potenciální energie).

Při ustáleném proudění ideální kapaliny nebo plynu v uzavřené ideálně hladké trubici mají všechny částice v celém průřezu v daném místě trubice stejný objemový průtok a stejnou rychlost. Pro takové proudění platí rovnice kontinuity a to, že zmenšením obsahu průřezu trubice se rychlost proudění zvětší. Protože tlak v kapalině nebo plynu během proudění závisí na rychlosti proudění, tak platí, že čím je rychlost menší, tím je tlak média větší. Tato zvláštnost se nazývá hydrodynamický paradox. Závislost tlaku během proudění ideální kapaliny popisuje Bernoulliho rovnice.

Při proudění skutečné kapaliny nebo plynu v reálném potrubí (nerovnosti, spojení atd.) je proto rychlost částic v průřezu v daném místě trubice různá a závisí na podmínkách tj. nejvíce na tření částic mezi sebou a též mezi stěnou trubice.

Rychlost proudění v kapalině:

$$w = \sqrt{2 \frac{P_d}{\rho}} = \sqrt{2 \frac{q \cdot s}{\rho}}$$

Kde:

$$P_d = q \cdot s$$

dynamický tlak; s ... stlačitelnost (kapaliny s=1)

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot w^2$$

kinetický tlak

w - rychlost proudění tekutiny [m.s-1]

$\Delta p$  -diferenční tlak [Pa]

$\rho$  -hustota tekutiny [kg.m-3]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pojem průtok se často používá jak pro označení rychlosti proudění, tak i jako označení hmotnostního nebo objemového průtoku.

Mezi základní metody měření průtoku tekutiny patří:

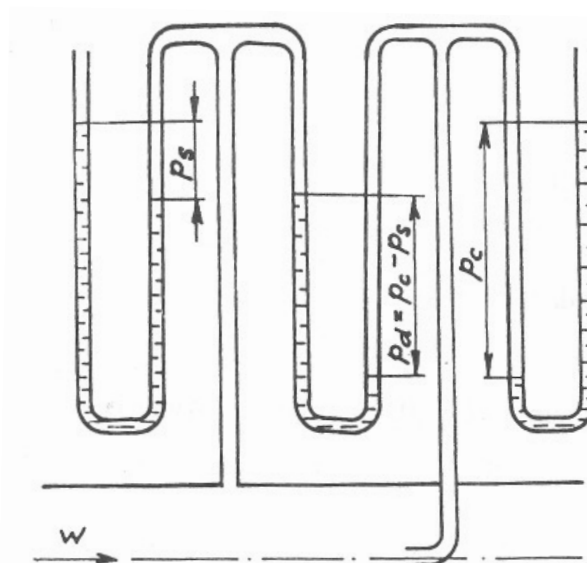
- Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvem průtokoměru
- Měření rychlosti proudění tekutiny
- Měření objemového průtoku
- Měření hmotnostního průtoku

## 2) Měření rychlosti proudění

### Pitotova trubice

Princip měření a konstrukce Pitotovy trubice patří k nejstarším a nejjednodušším rychlostním měřidlům. Primárními prvky Pitotovy trubice jsou tenké trubičky vložené proudě měřené látky s otočeným ústím proti směru proudění. Tyto trubičky jsou dále vedeny do tzv. tlakoměrů ve tvaru písmene „U“ kde dochází k poměrovému zjištění jednotlivých tlaků. Pitotovy trubice se používají především pro měření průtoku plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu možného zanesení otvorů trubice, kterými se tlak snímá. Využívá platnosti vztahu pro dynamický tlak proudící tekutiny v uzavřeném kanále:

$$P_d = P_c - P_s$$

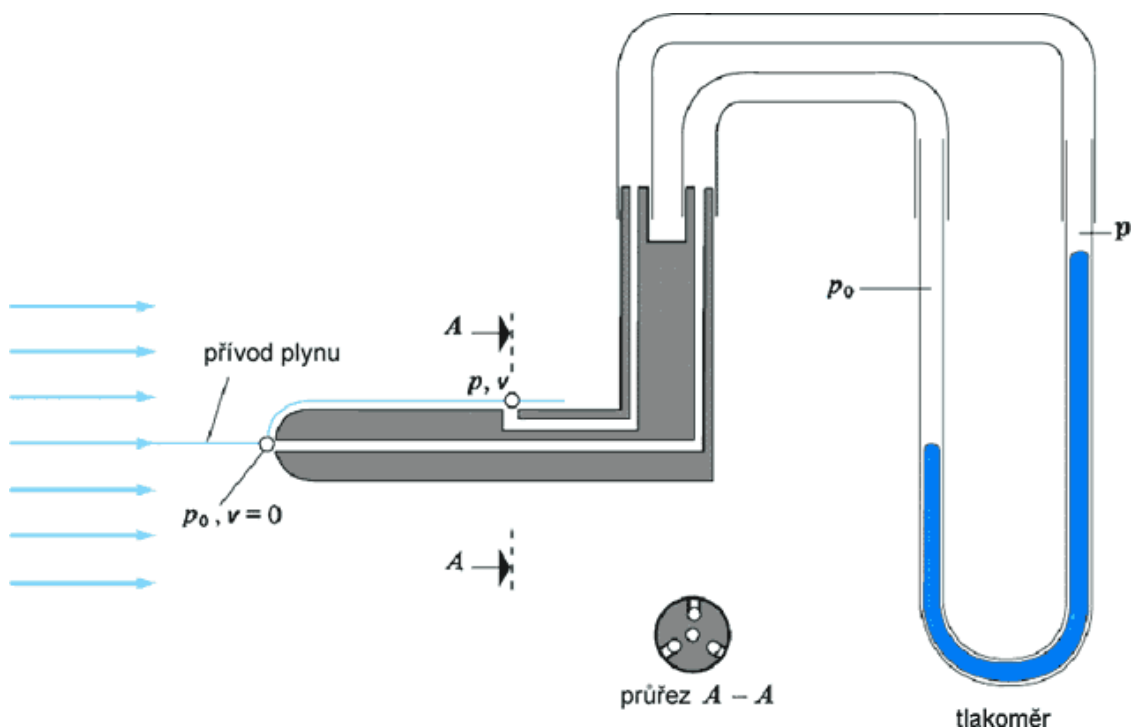


Obr. 1 Základní blokové schéma principu Pitotovy trubice [1]

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Prandtlůva trubice

Jde opět o rychlostní sondu na principu měření tlaků, kde jsou tyto tlaky měřeny v jednom bodě. Princip Prandtlůvy trubice vychází z předpokladu dvou proudění - rovnoběžného proudění a proudění ze zdroje. Celkový tlak se snímá otvorem v čele sondy a statický tlak je zjišťován štěrbinami ve válcovité části sondy.



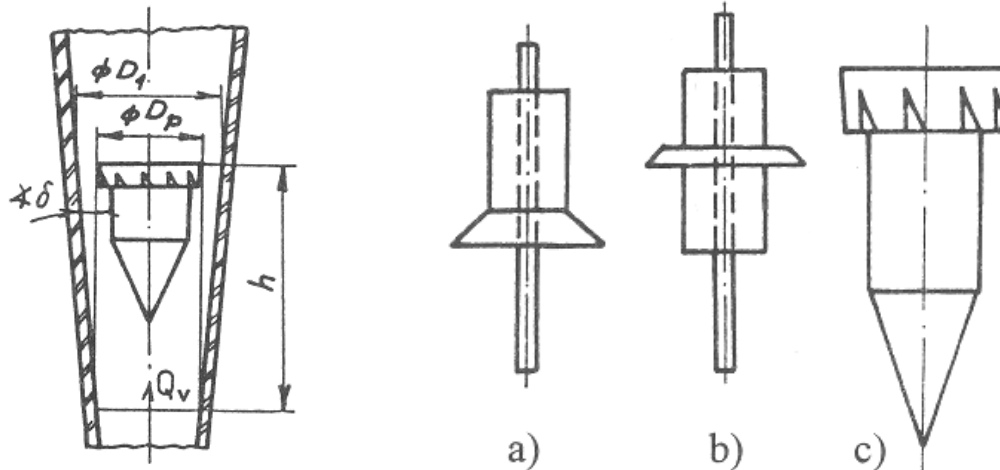
Obr. 1.1 Základní blokové schéma principu Prandtlůvy trubice [7]

### Plováčkové průtokoměry

Základem plováčkového průtokoměru je svislá tzv. kónická (rozšiřující se směrem nahoru) měřicí trubice, v které se volně pohybuje plováček z materiálu s hustotou větší než je hustota měřeného média. Sledovaný průtok média udržuje plováček ve výšce  $h$ , která je nelineárně závislá na velikosti průtoku  $Q_v$ .

Tvary plováčků se řídí účelem použití. Poloha plováčku se odečítá buď přímo na stupnici umístěné na stěně trubice průtokoměru, nebo se snímán pomocí elektrického signálu. K nesporným výhodám tohoto principu měření rychlosti a průtoku je měřicí rozsah (10:1), malá tlaková ztráta, snadná instalace, relativně nízká cena a schopnost měřit i malé průtoky v kontinuálním procesu.

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obr. 1.2 Základní blokové schéma principu plováčkového průtokoměru a různé tvary plováčků (a i b jsou tzv. vedené, c tzv. rotující) [1]

### Průtokoměry se škrcením

Do cesty měřenému průtoku kapaliny (plynů) je vložen tzv. škrtící orgán a měří se tlakové ztráty, které v průtoku před sebou a za sebou tento „škrtící orgán“ vyvolá. Většina průmyslových průtokoměrů je právě založena na měření těchto rozdílů tlaků.

Druhy škrtících orgánů:

- Normalizované
  - Venturiho dýza
  - clona
  - čtvrtkruhová dýza
- Nenormalizované
  - segmentová clona
  - dvojitá clona
  - válcová dýza

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Průtok tekutiny se určí z rovnice:

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Kde:

$\alpha$  [1] - průtokový součinitel škrťacího orgánu, závisí na Reynoldsově čísle. Vždy se hledá pro daný typ škrťacího orgánu a poměrné zúžení ( $\beta = d_2/D_2$ ) v tabulkách či nomogramech.

$\varepsilon$  [1] - expanzní součinitel (kapaliny 1, pro plyny z nomogramů).

$d$  [m] - průměr otvoru škrťacího orgánu

$D$  [m] - průměr potrubí

$\Delta p$  [Pa] - tlakový rozdíl měřený na škrťacím orgánu

$\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] - hustota měřené kapaliny

Legenda:

$v$  - rychlost proudění

$d$  - průměr otvoru škrťacího orgánu  
(na obrázku je uvedena normalizovaná clona)

$D$  - průměr potrubí

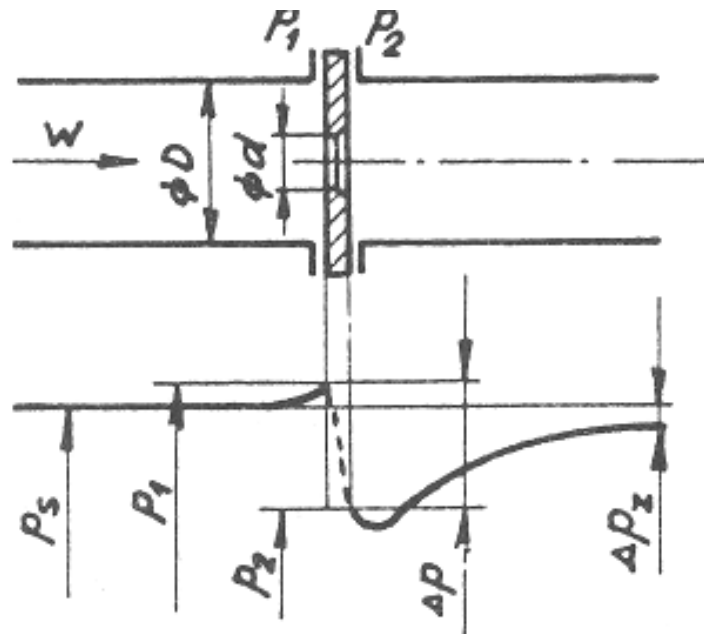
$p_s$  - vstupní statický tlak

$p_1$  - snímaný tlak před škrťacím orgánem

$p_2$  - snímaný tlak za škrťacím orgánem

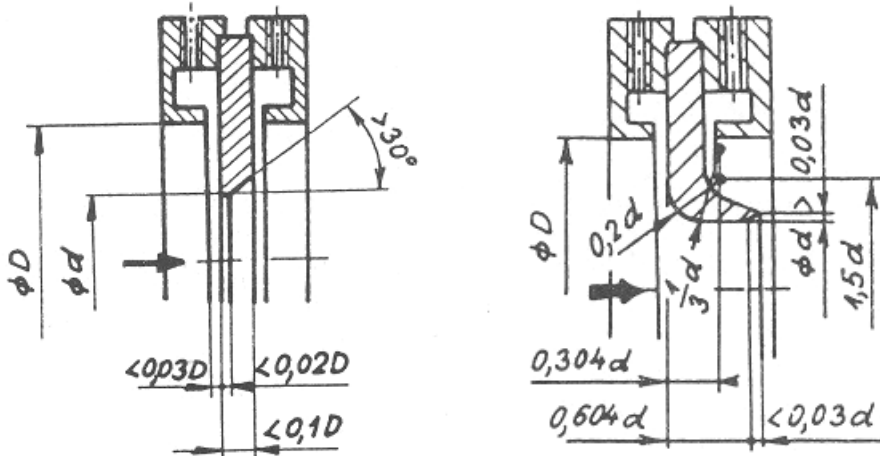
$\Delta p$  - diferenční tlak ( $p_1 - p_2$ )

$\Delta p_z$  - trvalá tlaková ztráta

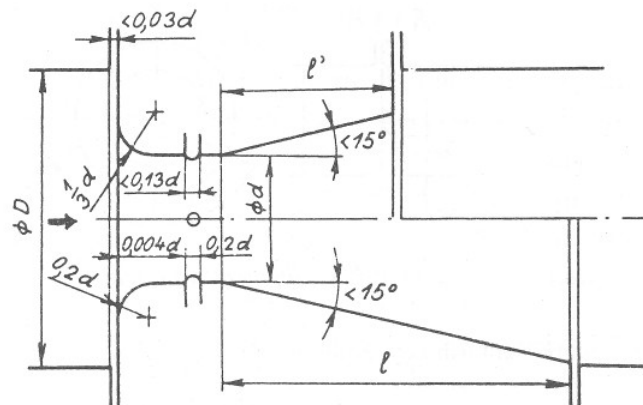


Obr. 1.3 Základní blokové schéma principu tlakových poměrů u průtokoměru se „škrćením“ [1]

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

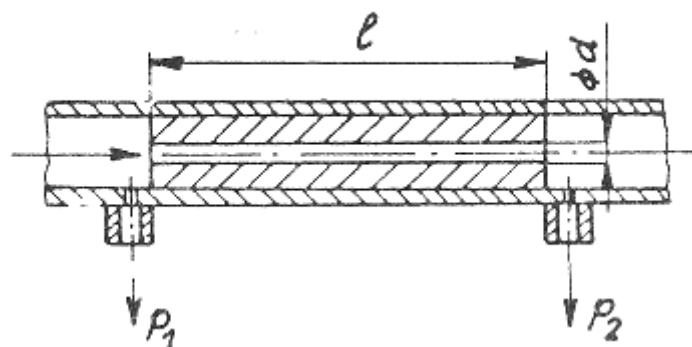


Obr. 1.4 Základní schéma normalizované clonky a dýzy u průtokoměru se „škrcením“ [1]



Obr. 8.38 Normalizovaná Venturiho dýza

Obr. 1.5 Základní schéma normalizované Venturiho dýzy u průtokoměru se „škrcením“ [1]



Obr. 1.6 Základní schéma měřící kapiláry u průtokoměru se „škrcením“ [1]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

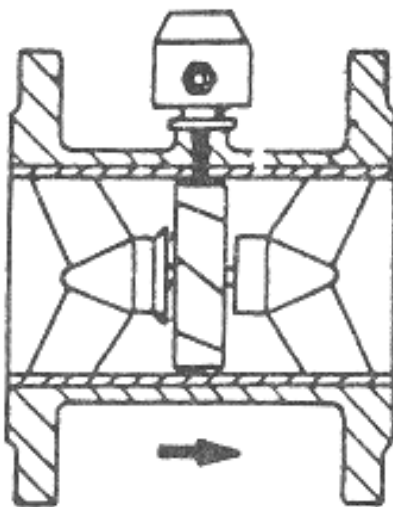
### Turbínové průtokoměry

Základem je volně otočný rotor s lopatkami ve tvaru turbíny buď z plastu (rychlost se snímá opticky) a nebo kovový (otáčky rotoru jsou snímány indukčně).

Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí a jeho otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají snímány bezdotykovým snímačem (viz výše), kdy výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále zpracovávají a vyhodnocují.

Výhodou turbínových průtokoměrů je, že jsou konstruovány pro jmenovité průtoky  $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  až po  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Používají se pro měření kapalina za vysokých teplot a tlaků.

Nevýhodou je, že se nedají použít u tekutin, které při proudění v potrubí víří a nebo nejsou doporučovány ani pro tekutiny s velkou viskozitou. Vzhledem k principu, tzn. turbínkové průtokoměry obsahují pohyblivé části, jsou náchylné na opotřebování a na usazování nečistot.



Obr. 1.7 Základní schéma turbínového průtokoměru [1]

### Anemometrická měřidla (Anemometry)

Termín anemometrie vychází z řeckého slova „anemos“, které znamená „vítr“, přeloženo a napsáno v českém jazyce jde o „větroměr“, tedy přístroj pro měření rychlosti proudění. Pokud se využije tzv. „korouhve“ lze potom tímto kombinovaným přístrojem měřit jak rychlost, tak i směr proudění.





evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Mechanické anemometry

Energie větru se přenáší na mechanickou část (vrtulka apod.), kterou vítr otáčí, rotuje či vychyluje z ustálené polohy. Mezi mechanické anemometry patří miskové anemometry (Robinsonův kříž), lopatkové anemometry, anemometry s výkyvnou deskou (Wildova korouhev, Dalozův kyvadlový anemometr).

#### *Anemometry – miskové*

Miskové anemometry patří mezi radiální provozní měřidla průtoku vzduchu, nejčastěji v meteorologii. Měření nezávisí na směru proudění, pouze musí být dodržena podmínka kolmosti vektoru rychlosti proudění k ose rotoru.



Obr. 1.8 Ukázka miskového anemometru (korouhev složí pro určení směru proudění) [10]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### *Anemometry – lopatkové*

Lopatkové anemometry jsou měřidla axiální a též musí být dodržena podmínka kolmosti vektoru rychlosti proudění k ose rotoru, protože jsou citlivé na správný směr proudění přes měřicí hlavu.



Obr. 1.9 Ukázka lopatkového anemometru [9]

### Elektrické (zchlazovací) anemometry

Měří rychlost proudění plynů na principu ochlazování (zchlazování) žhaveného drátku. Odvod tepla je funkcí rychlosti proudění.

Měření ovlivňují:

- geometrické rozměry drátku
- materiál drátku
- teplota žhavení
- druh měřeného plynu

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pro anemometry pracující s konstantním proudem nebo teplotou se nejčastěji používají Pt drátky průměru 0,01 až 0,1 mm, které se žhaví na teplotu v rozsahu 200 až 500 °C.

Anemometry, které měří na principu konstantního výkonu je na pracovní teplotu 350 °C žhaven NiCr drátek průměru 0,05 až 0,1 mm. Ten je spojen s termočlánkem NiCr-konstantan.

Druhy „žhavených“ anemometrů:

- Teplota drátku je konstantní – rychlost je funkcí topného proudu, používá se pro rychlosti 1 až 300 m.s<sup>-1</sup>
- Topný proud je konstantní – rychlost je funkcí teploty drátku, která je vyjádřena odporem drátku, použitelné pro rychlosti 1 až 300 m.s<sup>-1</sup>.
- Topný příkon je konstantní – rychlost je funkcí teploty drátku, ale je měřena termočlánkovým teploměrem, používá se pro malé rychlosti proudění do 1 m.s<sup>-1</sup>.



Obr. 1.10 Ukázka drátkového anemometru

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

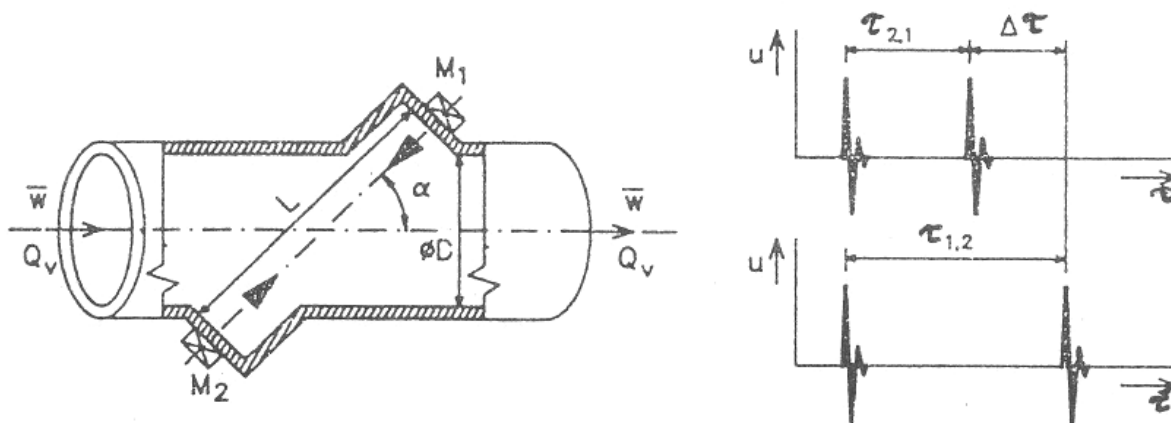
### Ultrazvukové průtokoměry (průchodová metoda)

Měří se přírůstek (úbytek) rychlosti šíření ultrazvukových vln v měřené kapalině pokud se vlna šíří po směru (proti směru) proudění kapaliny. Tyto průtokoměry se skládají ze dvou vysílacích/přijímacích jednotek, které jsou umístěné za sebou ve směru proudění. Rozdíl mezi dobou průchodu obou signálů k druhé jednotce je úměrný rychlosti proudění tekutiny čistých tekutin.

Oba elektroakustické měniče ( $M_1$  a  $M_2$ ) vyšlou ve stejný čas impuls.

$\tau_{1,2}$  ... čas za jaký dorazí impuls od  $M_1$  k  $M_2$

$\tau_{2,1}$  ... čas za jaký dorazí impuls od  $M_1$  k  $M_2$



Obr. 1.11 Základní blokové schéma principu ultrazvukového průtokoměru (tj. „Leasing-edge-detection“) [1]

### Ultrazvukové průtokoměry (Dopplerovo princip)

Rychlost proudění se měří Dopplerovo principem, kdy nastává změna frekvence vysílaného ultrazvukového paprsku. Změna frekvence je funkcí rychlosti proudění. Měřidla vhodná pro znečištěné kapaliny, taveniny apod.

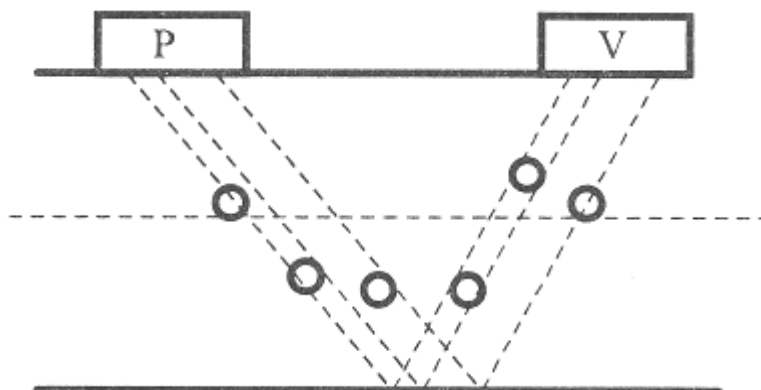
Výhody:

- nevyvolávají tlakové ztráty v měřené tekutině
- jsou schopny měřit ve velkém rozsahu (2 až 400 tis.  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
- pracují při teplotách  $-200$  až  $250$  °C

Použití:

- petrochemický a chemický průmysl,
- rozvody vody ve velkých světlostech,
- aj.

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obr. 1.12 Základní blokové schéma principu ultrazukového průtokoměru (na tzv. Dopplerovo principu) [1]

### Indukční průtokoměry

Tyto průtokoměry využívají principu tzv. Faradayova zákona elektromagnetické indukce, a to tak, že proudící kapalina, která má vodivost větší než  $1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , tvoří paralelní vodivá vlákna procházející rychlostí  $w$  v magnetickém poli s indukcí  $B$  a magnetickým tokem  $\Phi$ . Magnetický tok je kolmý na vektor rychlosti  $w$ . Měří se napětí naindukované na elektrodách. Průtok kapaliny je potom:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot B} \cdot U$$

Kde:

$U$  - indukované napětí [V]

$B$  - indukce magnetického pole [T]

$D$  - průměr potrubí [m]

$Q_v$  - objemový průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE

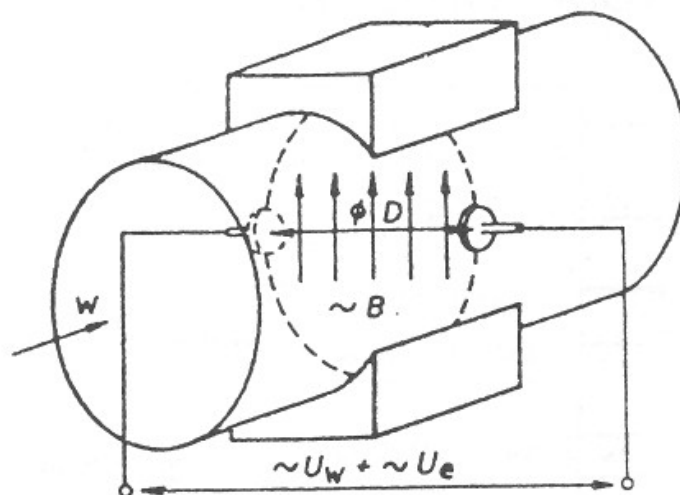


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

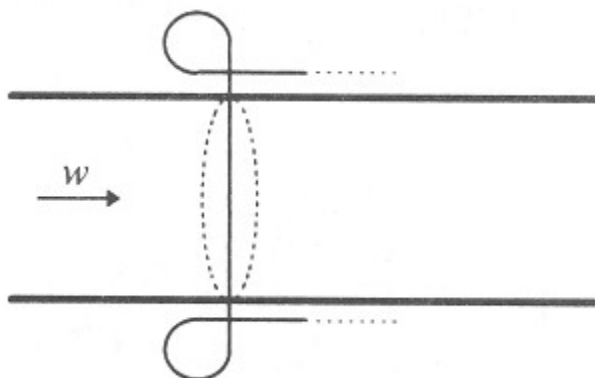


Obr. 1.13 Základní blokové schéma principu indukčního průtokoměru [1]

### Průtokoměr s optickými vlákny

Optické vlákno je ponořeno do kapaliny. Vlivem proudění kapaliny dochází ke kmitání vlákna (vlivem obtékání vlákna), toto kmitání je doprovázeno útlumem záření, které je do vlákna vysíláno. Frekvence kmitání je závislá na velikosti Strouhalova podobnostního čísla a je úměrná změně optického odporu vlákna.

Průtokoměry s optickými vlákny se používají jako velmi přesné laboratorní přístroje. Dosahují přesnosti 0,2% z měřené hodnoty.



Obr. 1.14 Základní blokové schéma principu průtokoměru s optickým vláknem [1]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### Tepelné průtokoměry

Měří průtok na základě rychlosti ochlazení tekutiny ohřáté konstantním tepelným výkonem.

Průtok je definován:

$$Q_m = \frac{P}{c_p \cdot (t_2 - t_1)}$$

Kde

P - konstantní tepelný tok ohřívacího vinutí

$t_2$  - teplota tekutiny za ohřevem

$t_1$  - teplota tekutiny před ohřevem

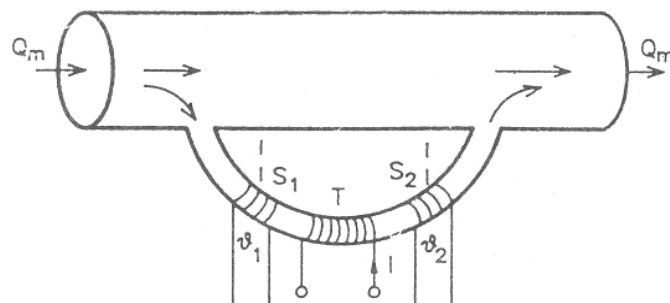
$c_p$  - měrná tepelná kapacita tekutiny

Legenda tepelného průtokoměru:

T ... ohřívací vinutí

$S_1$  ... senzor teploty před ohřevem

$S_2$  ... senzor teploty za ohřevem



Obr. 1.15 Základní blokové schéma principu tepelného průtokoměru [1]



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Poděkování

Investice do rozvoje vzdělávání.

Tento výukový text je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu č. CZ.1.07/2.2.00/28.0206 „Inovace výuky podpořená praxí“.

## Literatura

- [1] JENČÍK, J., Volf, J. a kol.: *Technická měření*. ČVUT v Praze, Praha 2000, ISBN 80-01-02138-6
- [2] Häberle, H.: *Průmyslová elektronika a informační technologie*, Europa-Sobotáles, Praha, 2003, ISBN 80-86706-04-4
- [3] Kreidl, M., Šmíd, R.: *Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu*, BEN, Praha, 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [4] Martinek: *Senzory v průmyslové praxi*, BEN, Praha, 2004, ISBN 80-7300-114-4
- [5] Kreidl, M., Šmíd, R.: *Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu*, BEN, Praha, 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [6] Martinek: *Senzory v průmyslové praxi*, BEN, Praha, 2004, ISBN 80-7300-114-4
- [7] Měření průtoku, <http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlovy-trubice/>
- [8] Průtok, <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [9] Anemometr, [http://www.ilabo.cz/www/components/com\\_virtuemart/shop\\_image](http://www.ilabo.cz/www/components/com_virtuemart/shop_image)
- [10] Anemometr, [http://www.osel.cz/\\_popisky/123/\\_s\\_1231087112.jpg](http://www.osel.cz/_popisky/123/_s_1231087112.jpg)