

# **Obecné principy měření průtoků**

## **General principles of a flow measurement**

Roman Šarata

---

Bakalářská práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav aplikované informatiky  
akademický rok: 2007/2008

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Roman ŠARATA**  
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Obecné principy měření průtoků**

Zásady pro vypracování:

- 1. Na základě literatury nastudujte základní principy měření průtoků.**
- 2. Vypracujte přehled používaných metod měření průtoků.**
- 3. Provedte dělení metod podle použitelného měřicího rozsahu a měřeného media.**
- 4. Vyberte metody vhodné pro konstrukci malých senzorů průtoků.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **BEJČEK, Ludvík. ĎADO, Stanislav. PLATIL, Antonín. Měření průtoku a výšky hladiny. BEN. 2006. 448 s. ISBN 80-7300-156-X.**
2. **HARDY, Jim. E. Flow Measurement Methods and Applications. Wiley-Interscience. NeW York. 1999. 254 s.**
3. **HRUŠKA, F. Technické prostředky automatizace IV. UTB ve Zlíně. 2001. 108 s.**
4. **WEBSTER, J. The measurement, instrumentation, and sensor handbook. CRC Press. Boca Raton. 1999.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lubomír Macků, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**20. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**5. května 2008**

Ve Zlíně dne 20. února 2008



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

V teoretické části se práce zabývá nastudováním základních principů měření průtoku na základě literatury. A poté následnému vypracování teoretického přehledu používaných metod měření průtoku, jejich princip a použití.

V praktické části se práce zabývá dělením metod měření průtoku dle použitelného měřicího rozsahu a měřeného media. A následnému vybrání vhodných metod pro konstrukci malých senzorů průtoku na základě teoretických poznatků.

Klíčová slova: měření průtoku

měřicí rozsah

použití

měřicí metody

## **ABSTRACT**

In the theoretical part, the work deals with a study of the general principles of flow measuring based on the studied literature. Then it deals with elaborating of a theoretical summary of used methods of flow measurement, it´s principles and application.

In the practical part, the work deals with dividing of the methods of flow measurement according the measuring range and the measured medium. Then it deals with choosing appropriate methods for the construction of little flow sensors, it´s based on theoretical findings.

Keywords: flow measurement

range of measurement

using

method of measurement

**Poděkování:**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Lubomíru Macků, Ph.D za odbornou pomoc a velmi cenné rady a připomínky v průběhu zpracování mé práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE</b> .....	<b>11</b>
1.1    DEFINICE A VZTAHY POUŽÍVANÉ PŘI MĚŘENÍ PRŮTOKU .....	11
1.1.1    Reynoldsovo číslo .....	12
1.1.2    Bernoulliho rovnice.....	13
<b>2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ PRŮTOKU</b> .....	<b>14</b>
2.1    PRŮŘEZOVÉ PRŮTOKOMĚRY .....	15
2.1.1    Průtokoměry na principu tlakového rozdílu .....	15
2.1.2    Průtokoměry se škrťacími orgány.....	15
2.1.3    Clony .....	16
2.1.4    Venturiho trubice.....	16
2.1.5    Dallova trubice .....	17
2.1.6    Dýzy .....	18
2.1.7    Kolenové průtokoměry.....	18
2.2    RYCHLOSTNÍ PRŮTOKOMĚRY.....	19
2.2.1    Pitotova trubice .....	19
2.2.2    Prandtlova trubice .....	20
2.3    PRŮTOKOMĚRY S PROMĚNNÝM PRŮŘEZEM.....	21
2.3.1    Princip činnosti plováčkového průtokoměru.....	22
2.3.2    Konstrukce plováčkových průtokoměrů .....	23
2.4    TURBÍNOVÉ A LOPATKOVÉ SENZORY PRŮTOKU .....	24
2.4.1    Princip činnosti turbínových a lopatkových průtokoměrů .....	24
2.4.2    Lopatkové radiální průtokoměry .....	25
2.4.3    Vrtulové (šroubové) průtokoměry.....	25
2.5    OBJEMOVÉ PRŮTOKOMĚRY .....	26
2.5.1    Oválné průtokoměry.....	26
2.5.2    Průtokoměry s kyvným diskem .....	27
2.5.3    Bubnový průtokoměr.....	27
2.5.4    Průtokoměr s rotujícími lopatkami.....	28
2.5.5    Šroubové průtokoměry .....	29
2.5.6    Průtokoměr s krouživým pístem .....	29
2.6    ULTRAZVUKOVÉ SENZORY PRŮTOKU.....	30
2.6.1    Princip činnosti ultrazvukového průtokoměru .....	30
2.6.2    Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů .....	31
2.7    INDUKČNÍ SENZORY PRŮTOKU .....	33
2.8    HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚRY .....	34
2.8.1    Coriolisův průtokoměr .....	35
2.9    FLUIDIKOVÉ PRŮTOKOMĚRY .....	37
2.9.1    Vírové průtokoměry .....	37
2.9.2    Vířivé průtokoměry .....	38

2.9.3	Oscilační průtokoměry .....	38
2.10	TEPELNÉ PRŮTOKOMĚRY .....	39
2.10.1	Termoanemometry .....	39
2.10.2	Kalorimetrický snímač průtoku.....	40
2.11	PRŮTOKOMĚRY SE ZNAČENÍM TEKUTINY .....	42
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>DĚLENÍ METOD PODLE POUŽITELNÉHO MĚŘÍCIHO ROZSAHU A MĚŘENÉHO MEDIA .....</b>	<b>44</b>
3.1	POROVNÁNÍ RŮZNÝCH PRINCIPŮ MĚŘENÍ PRŮTOKŮ KAPALIN.....	44
<b>4</b>	<b>VÝBĚR METOD VHDNÝCH PRO KONSTRUKCI MALÝCH SENZORŮ PRŮTOKU.....</b>	<b>48</b>
4.1	VÝBĚR METOD.....	48
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>56</b>



## ÚVOD

I když se dá měření průtoku považovat za poměrně dobře zvládnutou disciplínu (tato otázka je známá již z dob starého Egypta při řešení zavlažovacích systémů) dochází i v tomto odvětví k rozvoji a různým zlepšením. S tím ale souvisejí i problémy, z nichž např. chyby, nejistoty a poruchy měřícího zařízení bezprostředně ovlivňují ekonomické parametry technologického procesu. Chyby měření vyvolávají přímo vyčíslitelné finanční ztráty. Dá se ale říci, že u měření průtoků se obecně vychází ze stále stejných fyzikálních principů. Dochází spíše ke zpřesňování metod, miniaturizaci měřících zařízení a jen ojediněle se vyskytne nějaký „průlomový“ vynález. Jak již bylo řečeno, všechny měřící zařízení vycházejí ze stále stejných fyzikálních principů, jejich znalost je tedy nezbytná k porozumění činnosti těchto zařízení. Tato práce se snaží poskytnout přehled základních principů využívaných při měření průtoků a po seznámení se s metodami měření průtoku vybrat vhodné metody pro konstrukci malých senzorů průtoku. Výběr a provoz průtokoměrů vyžaduje důkladné pochopení nejen jejich fyzikálních principů, ale také zákonů proudění tekutin a termodynamiky.

V současnosti je měření průtoku velmi často měřenou veličinou, kdy se například používá pro dávkování surovin v průmyslových podnicích, měření průtoku krve ve zdravotnictví, měření rychlosti proudění řek nebo mořských proudů atd. Moderní průtokoměry mají velmi široké pracovní podmínky, a to jak z hlediska složení a vlastností měřených látek (od čistých tekutin až po agresivní směsi), rozsahu teplot proudícího média (od kryogenních teplot do teplot tekutých kovů), tak i rozsahu tlaků proudící tekutiny (od vakua do několik tisíců barů). V současné době je hlavní důraz kladen na rozvoj číslicového zpracování signálů průtokoměrů a mikropočítačové techniky, který podstatně zasahuje do vyhodnocení výstupních signálů průtokoměrů. Z toho vyplývá, že v poslední době se projevuje silný odklon od průtokoměrů a metod založených na mechanických principech k metodám s elektronickou výstupní veličinou (indukční, ultrazvukové). Tím se dále rozšiřuje objem znalostí nutných pro výběr typu a provoz průtokoměrů.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Prostředky používané k měření průtoku a proteklého množství tekutin lze třídit podle různých hledisek. Základní je členění podle použité metody měření. Třídit lze také jinak: podle použitého fyzikálního principu a konstrukce měřidla, druhu měřené tekutiny atd. Třídění podle měřicí metody je však možné z hlediska pochopení funkce a správného výběru měřidla měření pokládat za základní.

### 1.1 Definice a vztahy používané při měření průtoku

Tekutina je látka bez specifického tvaru vyznačující se tendencí při pohybu (toku) sledovat obrysy nádoby. Jako tekutiny se chovají kapaliny, plyny a páry.

Rychlost pohybující se částice tekutiny  $v$  je vektor, jehož směr je totožný se směrem tečny k dráze částice a jehož velikost je dána poměrem elementu dráhy  $\Delta l$  k času  $\Delta t$  potřebnému k jeho proběhnutí,

$$\vec{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1)$$

nebo střední hodnota rychlosti pohybu molekul (částic) plynu.

Střední průřezová rychlost tekutiny  $U$  je poměr objemového průtoku  $q_v$  k ploše průtočného průřezu.

Nebo objem tekutiny  $\Delta V$ , který proteče určitou plochou (průtočným průřezem) za časový interval  $\Delta t$

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

Při změně objemového průtoku s časem platí pro okamžitou hodnotu (okamžitý objemový průtok) vztah, který přesněji popisuje situaci

$$q_v = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Objem, proteklý za časový interval  $\Delta t$ , je určen integrálem

$$V = \int_0^{\Delta t} q_v dt \quad (4)$$

Hmotnostní průtok (tok)  $Q_m$  je průtok, u něhož je množství tekutiny vyjádřeno hmotností nebo hmotnost tekutiny  $\Delta m$  proteklé průtočným místem za časový interval  $\Delta t$

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5)$$

Při změně hmotnostního průtoku s časem platí pro okamžitý hmotnostní průtok.

$$q_m = \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

Pro proteklé hmotnostní množství platí :

$$m = \int_0^{\Delta t} q_m dt \quad (7)$$

Hmotnostní průtok lze určit z objemového požitím vztahu :

$$q_m = \rho q_v \quad (8)$$

kde  $\rho$  je hustota měřené tekutiny.

Ze známé plochy průtočného průřezu  $S$  a střední rychlosti proudění  $v$  lze určit objemový průtok ze vztahu.

$$q_v = Sv \quad (9)$$

### 1.1.1 Reynoldsovo číslo

Důležitým kritériem používaným pro posouzení druhu proudění je Reynoldsovo číslo  $Re$ , udávající poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině.

Pro kruhové potrubí o světlosti  $D$  je Reynoldsovo číslo  $Re_D$  definováno vztahem :

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (10)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

$\nu$  je kinetická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

Index  $D$  vyjadřuje, že Reynoldsovo číslo je vztaženo k průměru potrubí  $D$ .

### 1.1.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je vztah užívaný v mechanice tekutin, který vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny v uzavřené trubici. (Energie je v rovnici přepočtena na objemovou jednotku kapaliny.)

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = konst \quad (11)$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny

$v$  je rychlost proudění

$p$  je tlak v kapalině

První člen ( $\frac{1}{2}\rho v^2$ ) v Bernoulliho rovnici představuje kinetickou energii, druhý člen ( $p$ ) představuje tlakovou potenciální energii objemové jednotky kapaliny. Součet kinetické energie a potenciální energie je ve všech místech trubice stejný.

Platí, že pokud na kapalinu v klidu působí tíhová síla, je ve stejné hloubce v každém bodě stejný tlak. Pokud je kapalina v pohybu tak tento vztah neplatí. Základní slovní definice Bernoulliho jevu zní : v místě s větším průřezem má proudící kapalina větší tlak, ale menší rychlost, zatímco v místě s menším obsahem průřezu má menší tlak, ale větší rychlost.

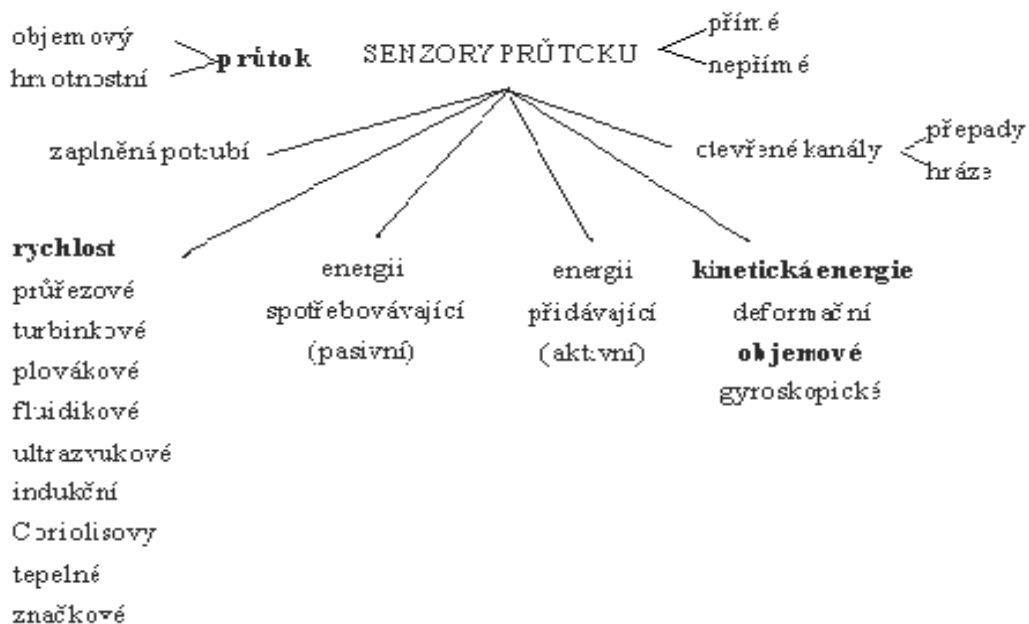
## 2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ PRŮTOKU

V senzorech průtoku dochází k transformaci měřené veličiny – průtoku na jinou fyzikální veličinu jednoznačně funkčně závislou na rychlosti proudění tekutiny nebo na její kinetické energii.

Přímé měření objemového nebo hmotnostního průtoku je možné dávkovacími senzory, rozdělujícími tekutinu na přesně definované díly a transportujícími je ve směru proudění. Základem konstrukce těchto senzorů jsou odměrné nádoby, které se kinetickou energií proudící tekutiny samočinně střídavě plní a vyprazdňují. Dalším typem přímých průtokoměrů jsou průtokoměry založené na vážení jisté části protékající látky. Používají se pro měření proleklého množství pevných látek.

Většina měření je nepřímých a vychází ze závislosti výstupní veličiny průtokoměru na kinetické energii nebo rychlosti proudící tekutiny.

Senzory proudění – průtokoměry lze také klasifikovat podle měřené veličiny (objemový nebo hmotnostní průtok).



## 2.1 Průřezové průtokoměry

Princip měření využívá jevů, ke kterým dochází při zúžení průtočného průřezu. Do potrubí se umístí škrticí orgán zužující průtočnou plochu. Rozdíl statických tlaků, snímáný diferenčním tlakoměrem před a za zúžením, je závislý na velikosti průtoku.

### 2.1.1 Průtokoměry na principu tlakového rozdílu

Využívají princip zachování energie v proudící tekutině formulovaný Bernoulliho rovnicí. Kinetická energie vyvolává vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, celkový tlak zůstává zachován. Rychlost proudění získáme z dynamického tlaku. Dynamický tlak může být určen jako rozdíl statických tlaků před a za překážkou zmenšující průřez potrubí nebo z rozdílu celkového tlaku a statického tlaku. K měření statického tlaku se používá senzorů tlaku. Jako měřené medium může být kapalina, plyn i pára. Průtokoměry nepoužívají žádné mechanické rotační díly. Podmínkou je čistá fáze měřeného média, která se nesmí při změně tlaku měnit. Vodní pára musí být přehřátá nebo na mezi sytosti. Další podmínkou je dodržení rovného průřezu potrubí v dostatečně dané vzdálenosti před a za místem průtokoměru.

### 2.1.2 Průtokoměry se škrticími orgány

Tekutina se při průtoku škrticím orgánem zrychluje a energie pro toto zrychlení se získá poklesem statického tlaku v místě zúžení. Minimum statického tlaku je v místě s maximální rychlostí proudění. Universální a pro všechny aplikace vyhovující geometrie škrticího orgánu neexistuje. Proto byla vyvinuta řada tvarů primárních článků (čidel) průtokoměrů.

Rozdíl tlaků před a za překážkou je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění v míře závislé na tvaru vložené překážky. Ze změřeného rozdílu tlaků lze pro konkrétní rozměry a tvar překážky, průřez potrubí a předpokládané fyzikální vlastnosti tekutiny vypočítat objemový, nebo hmotnostní průtok danou částí potrubí. Objemový průtok  $Q_v$  tekutiny lze vyjádřit vztahem :

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (12)$$

kde  $\alpha$  průtokový součinitel škrticího orgánu.

$\varepsilon$  je expanzní součinitel, u kapalin  $\varepsilon = 1$ , u plynů  $\varepsilon < 1$

$d$  je průměr otvoru škrťacího orgánu

$\Delta p$  je tlakový rozdíl měřený na škrťacím orgánu

$\rho$  je hustota měřené tekutiny

$\alpha$  je závislý na Reynoldsově čísle a poměrném zúžení  $\beta$  definovaném vztahem

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (13)$$

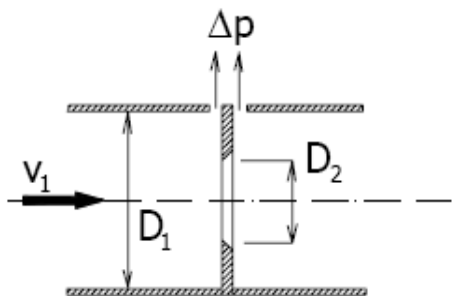
kde  $d$  je průměr otvoru škrťacího orgánu  $d$

$D$  je vnitřní průměr potrubí

Průtokové součinitele jsou určovány experimentálně a jejich průměrné hodnoty publikovány formou tabulek nebo grafů. Nejistoty hodnot se mění v rozmezí pouze od 0,5% do 3%. Proto pro běžné účely postačí korekce naměřených hodnot výpočtem a není nutná kalibrace.

### 2.1.3 Clony

Slouží ke zmenšení průřezu potrubí a mají tvar desky s otvorem vložené do potrubí kolmo na směr proudění. Tlak se měří v jisté vzdálenosti před clonou a za clonou v místě minimálního statického tlaku, kde je maximální rychlost a koncentrace proudnic.



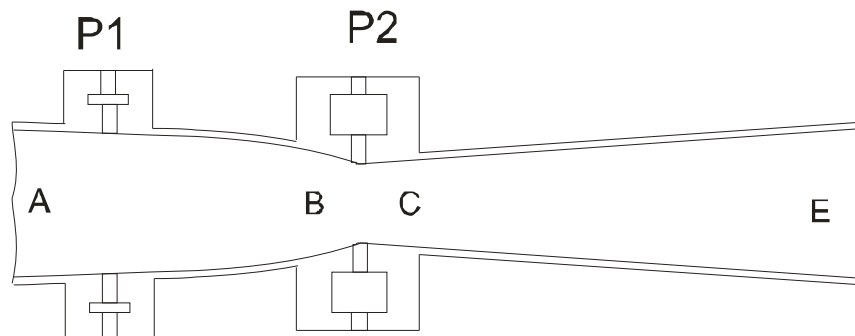
Obr. 1:Clona

### 2.1.4 Venturiho trubice

Venturiho trubice má poměrně dlouhý sbíhavý vstupní (AB) a rozbíhavý výstupní člen (difusor - CE). Jako škrťací orgán působí člen AB, ve výstupním členu CE rychlost



proudění klesá a dochází v souladu s Bernoulliho rovnicí ke zvýšení statického tlaku. Vývody tlaků  $p_1$  a  $p_2$  ústí do prstencových dutin a tak se získává průměrný tlak podél obvodu prstence kompenzující zkreslení rychlostního profilu. Použití prstencových dutin pro měření průměrného tlaku je výhodné, jelikož otvory pro odběr tlaku se mohou snadno při provozu ucpat usazeninami.

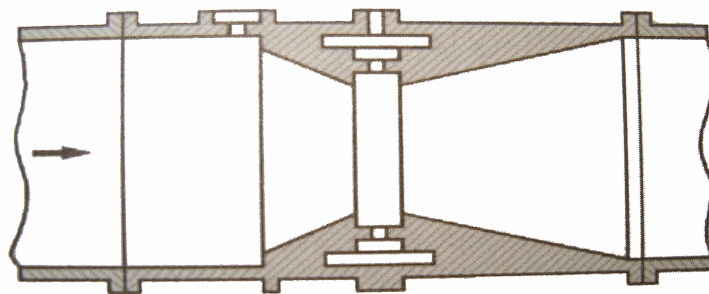


Obr. 2: Klasická Venturiho trubice

Tlaková ztráta zřídka přesáhne hodnotu 10% měřeného rozdílu tlaku, je málo citlivá na rozložení rychlostního profilu. Nejistota součinitele průtoku  $C$  pro  $Re > 200\,000$  je v rozmezí 0,7 až 1,5%.

### 2.1.5 Dallova trubice

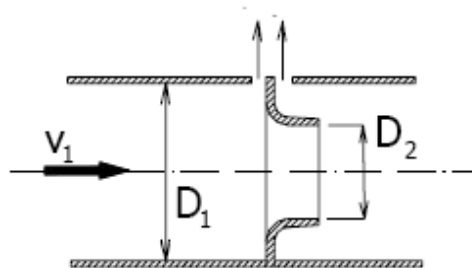
Dallova trubice je tvarově podobná normální Venturiho trubici, je však kratší a neobsahuje zaoblené úseky. Průtokový součinitel  $C$  dosahuje, např. pro  $\beta=0,7$  se v závislosti na  $Re$  mění od 0,68 ( $Re=100\,000$ ) do 0,66 ( $Re=10^6$ ). Dallova trubice dává větší tlakový rozdíl  $\Delta p$  (blízký clonám) a menší tlakovou ztrátu (až o 50% ve srovnání s clonou, avšak přibližně stejnou jako u Venturiho trubice). Je vhodná pro měření větších průtoků, např. pro vodní odpadové kanály, tj. kaly, kde běžně měřící clony selhávají.



Obr. 3: Dallova trubice

### 2.1.6 Dýzy

Dýzy jsou užívány zejména pro vysoké teploty (přehřátá pára) a vysoké rychlosti proudění. Avšak dosáhne-li plyn rychlosti zvuku v hrdle trysky, rychlost dále nestoupá ani při poklesu tlaku v místech po proudu a proudění se „udusí“. Tohoto jevu se využívá pro přesné měření, kalibraci a cejchování průtokoměru plynu. Nejistota měření dýzou je asi 1% z údaje, kalibrací lze dosáhnout nejistoty pouze 0,25%. Nižších hodnot nejistoty lze dosáhnout pro dýzy specializované na průtok plynů. Dýzy se nedoporučují pro měření špinavých kapalin a kalů.



Obr. 4: Dýza

### 2.1.7 Kolenové průtokoměry

Tyto průtokoměry jsou řazeny do skupiny průtokoměrů využívajících tlakové diference, vyvolané odstředivou silou působící při proudění tekutiny na stěnách potrubí kruhového tvaru. Využívají kinetické energie proudící tekutiny. Síla působící na vnitřní stranu kolena je úměrná součinu hustoty kapaliny a čtverci rychlosti proudění. Ve shodě s vlastnostmi odstředivé síly je její hodnota nepřímo úměrná poloměru kolena. Každé koleno s úhlem 90° může být použito jako kapalinový průtokoměr. Kolenový průtokoměr je jednoduché zařízení, avšak tlakový rozdíl  $\Delta p$  je malý a vyžaduje citlivých senzorů tlakové diference.

Ze změřené tlakové diference lze spočítat objemový průtok podle vztahu:

$$Q_v = C_k S \sqrt{\frac{R}{2D}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\rho_1} \Delta p} \quad (14)$$

kde  $S = \pi \frac{D_1^2}{4}$  je průtočná plocha potrubí

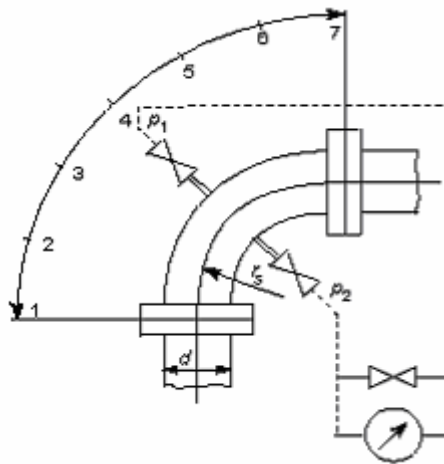
$\Delta p = p_1 - p$  je rozdíl tlaku mezi odběry na vnějším a vnitřním poloměru zakřivení

R je střední poloměr zakřivení kolena

D je průměr potrubí

g je tíhové zrychlení

$C_k$  je průtokový součinitel jehož hodnota závisí na poměru R/D a úhlu zakřivení kolena  $\omega$ .



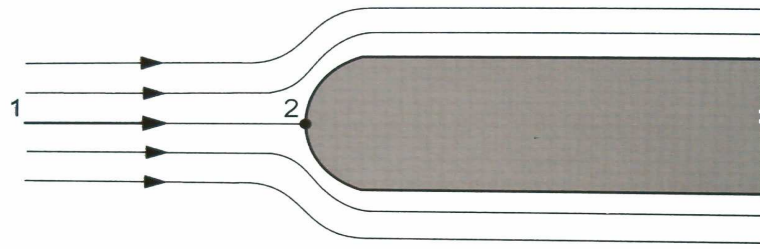
Obr. 5: Kolenový průtokoměr

## 2.2 Rychlostní průtokoměry

Rychlostní průtokoměry využívají závislosti dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění. Do této skupiny průtokoměrů patří pitotova trubice a prandltova trubice.

### 2.2.1 Pitotova trubice

Při nárazu proudící tekutiny na tupé těleso, proudnice mají tvar podobný jako na Obr.6.



Obr. 6: Rozložení proudnic kolem překážky s tupým čelem

Na rozdíl od proudnic obtékajících překážku zleva i zprava, střední proudnice se zastaví a vrcholu překážky (bod 2). Zde je rychlost proudění nulová, místo se označuje jako bod stagnace. Tlak v bodě stagnace lze vypočítat z Bernoulliho rovnice aplikované podél střední proudnice z bodu 1, v němž je tlak  $p_1$  a rychlost  $v_1$ , do bodu stagnace 2 s tlakem  $p_2$  a rychlost  $v_2=0$ . Oba body jsou v horizontální rovině, proto  $h_2=h_1$ .

Na základě Bernoulliho rovnice platí pro  $v_2=0$

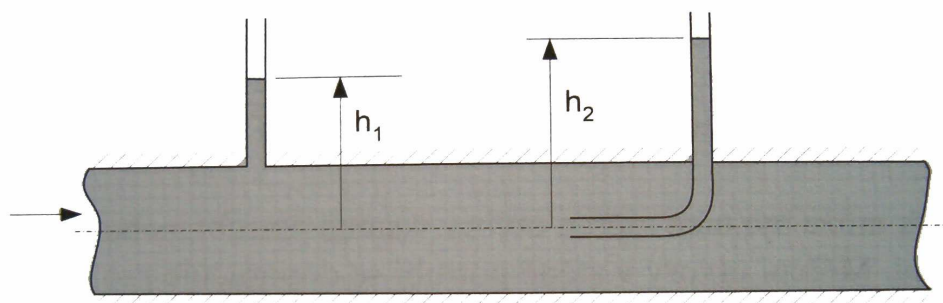
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 \quad (15)$$

Tlak v bodě stagnace  $p_2$  se vůči  $p_1$  zvýšil o hodnotu dynamického tlaku na celkový tlak.

K určení rychlosti proudění  $v$  je tedy nutné znát hodnotu totálního tlaku  $p_2$  a statického tlaku  $p_1$ . Statický tlak měříme kolmo na směr proudění, totální tlak ve směru proudění.

Pro rychlost platí :

$$v = \sqrt{2g(h_2 - h_1)} \quad (16)$$



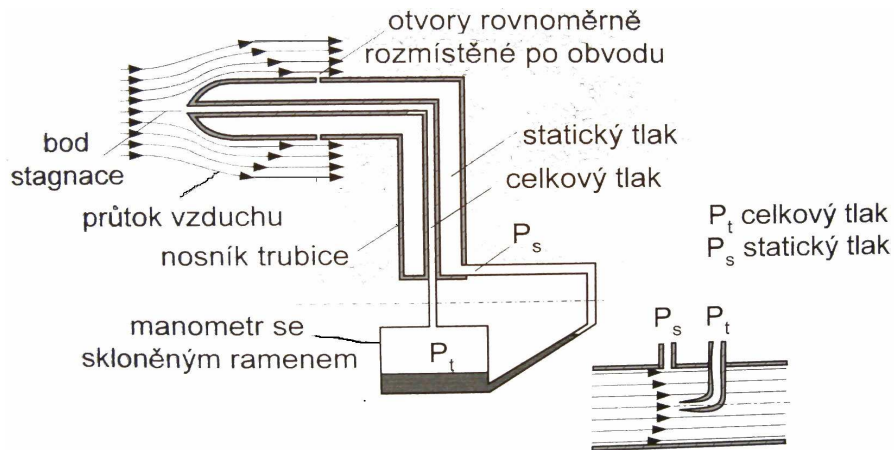
Obr. 7: Princip Pitotovy trubice

### 2.2.2 Prandtlova trubice

Jde o zvláštní uspořádání Pitotovy trubice upravené tak, aby se celkový a statický

tlak měřil přibližně ve stejném místě proudící tekutiny. Místo pro odběr statického tlaku jsou ve vzdálenosti větší než  $3d$  ( $d$  je průměr válcové sondy).

V uspořádání na (Obr. 8) je statický tlak přiváděn do diferenčního senzoru tlaku bočním otvorem orientovaným kolmo na směr proudění. Je vhodné, aby na místě měření statického tlaku byly turbulence minimální. Totální tlak je měřen v místě náporu (stagnace) otvorem s osou rovnoběžnou se směrem proudění.

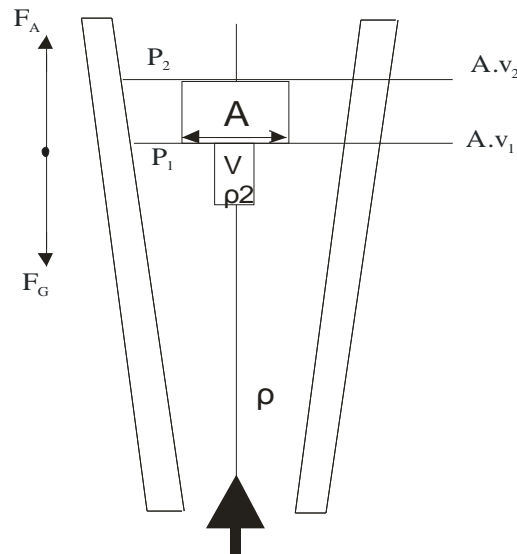


Obr. 8: Prandtlova trubice tvaru L

### 2.3 Průtokoměry s proměnným průřezem

Průtokoměry s proměnným průřezem patří do skupiny průtokoměrů na principu tlakové difference s tím rozdílem, že při jejich činnosti zůstává tlaková difference na průtokoměru konstantní a rychlost proudění vyvolává změnu polohy plováčku.

### 2.3.1 Princip činnosti plováčkového průtokoměru



Obr. 9: K odvození funkce plováčkového průtokoměru

Plováček o ploše  $A$ , hustotě  $\rho_2$ , a objemu  $V$  vznášející se v tekutině o hustotě  $\rho$  proudící v konické trubici se ustálí v poloze odpovídající rovnováze sil působících směrem po proudu ( $F_A$ ) a proti ( $F_G$ ). Konický tvar trubice způsobuje rozdílnost průřezů mezi spodní a vrchní částí plováku a světlostí trubice. Síla  $F_A$  je složena z

1.  $A \cdot p_1$  je síla odpovídající statickému tlaku tekutiny
2.  $V \cdot \rho \cdot g$  je vztlaková síla vyvolaná plovákem
3.  $A \frac{\rho v_1^2}{2}$  je síla vyvolaná dynamickým tlakem při rychlosti proudění  $v_1$  na spodní straně plováku

Podobně síla  $F_G$ , působící dolů proti proudu je složena z

1.  $A \cdot p_2$  je síla odpovídající statickému tlaku  $p_2$
2.  $V \cdot \rho_2 \cdot g$  je váha plováku

Pro rovnici na spodní straně plováčku platí  $F_A = F_G$

$$A \frac{\rho v_1^2}{2} = Vg(\rho_2 - \rho) - A(p_1 - p_2) \quad (17)$$

Určeme rychlost proudění pod plováčkem

$$v_1^2 = \frac{2Vg}{A\rho}(\rho_2 - \rho) - \frac{2}{\rho}(p_1 - p_2) \quad (18)$$

Z Bernoulliho rovnice plyne ( za předpokladu turbulentního proudění)

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \quad (19)$$

Po dosazení za  $v_1^2$  dostáváme  $v_2$

$$v_2^2 = \frac{2Vg}{A\rho}(\rho_2 - \rho) \quad (20)$$

Objemový průtok prstencem o ploše  $A_2$  mezi plovákem a trubicí s uvažováním koeficientu ztrát  $C_d$  je dán rovnicí

$$q_v = C_d \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (21)$$

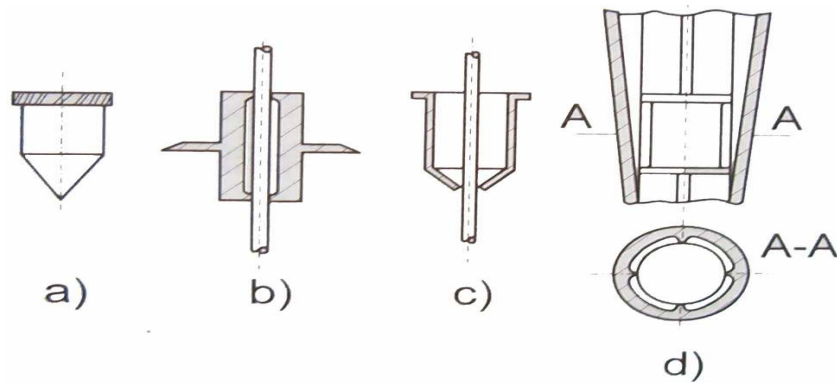
Po dosazení za  $v_2$  je objemový průtok roven

$$q_v = C_d \cdot A_2 \sqrt{\frac{2gV}{A} \left( \frac{\rho_2}{\rho} - 1 \right)} = f(A_2) \quad (22)$$

Pro každou hodnotu průtoku  $q_v$  se plovák ustálí v takové poloze, aby plocha  $A_2$  prstence mezi ním a stěnou trubice odpovídala této rovnici. Poloha plováku je pak čtena na stupnici nanesené na stěně trubice.

### 2.3.2 Konstrukce plovákových průtokoměrů

Kromě popsaného základního provedení – kuželovitá trubice a rotující plováček – jsou možné další varianty plovákových průtokoměrů. Tvary plováčků (Obr. 10) se různí podle aplikace. Společným znakem mnoha plováčků je ostrý okraj sloužící ke čtení polohy. Často se užívá konického plováčku zakončeného po obvodě rýhovaným prstencem. Při proudění se pak plováček otáčí, aby se vyloučilo tření o stěny trubice.



Obr. 10: Nejužívanější tvary plováků:

a) rotující, b) na vodící tyči, c) s bodovým vedením, d) vedený  
žebry přilítými k vnitřní stěně trubice

## 2.4 Turbínové a lopatkové senzory průtoku

Jejich základem je volně otočný rotor s lopatkami. Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí, kdy otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají snímány bezdotykovým indukčním snímačem, kdy výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále zpracovávají a vyhodnocují. Výhodou turbínových průtokoměrů je použití v širokém rozsahu měřených rychlostí, reprodukovatelnost měření i krátkodobá přesnost. Většinou se používají pro měření průtoku vody.

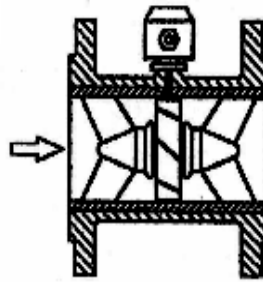
### 2.4.1 Princip činnosti turbínových a lopatkových průtokoměrů

Protékající tekutina uvádí do rotačního pohybu lopatkový rotor s vhodně zakřivenými plochými lopatkami, umístěnými v ose tělesa průtokoměru. Každému průchodu lopatky odpovídá jisté objemové množství a objemový průtok se určuje z počtu průchodů listů turbíny nebo lopatek pod senzorem polohy. Měřený objemový průtok odpovídá proleklému objemovému množství a není přímo závislé na hmotnosti tekutiny. Výstupem turbínových průtokoměrů jsou impulsy, získané zesílením a tvarováním signálu ze senzorů průchodu lopatek. Měronosnou veličinou je frekvence  $f$ , úměrná objemovému průtoku  $q_v$ , takže pro převodní charakteristiku průtokoměru platí i ideálním případě vztah:

$$f = K_t \cdot q_v \text{ [Hz]} \quad (23)$$

kde  $K_t$  je součinitel turbínového senzoru.



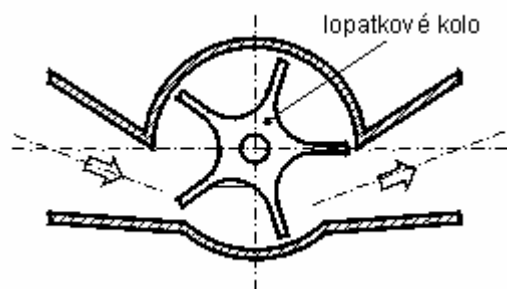


Obr. 11: Řez turbinovým  
průtokoměrem

V typickém provedení turbinového průtokoměru je k urovnání proudění vložen před a za rotorem usměrňovač proudění upravující proudění na přibližně laminární.

#### 2.4.2 Lopatkové radiální průtokoměry

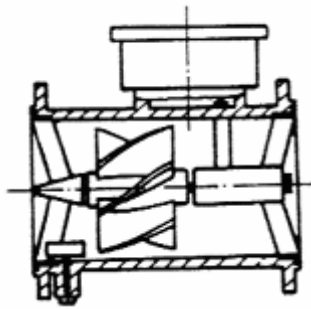
Jako měrný orgán slouží oběžné kolo s radiálními lopatkami (Obr. 12). Osa rotace je kolmá k ose tekutiny. Pro zvýšení citlivosti lze použít i několik vtoků. Používají se pro měření průtoku užitkové vody v rozsahu od 0,8 až 500 l.min<sup>-1</sup>, pro teploty do 40°C a tlaky až 15 barů. Otáčky oběžného kola se snímají Hallovými senzory s prodlouženou životností nebo magneticky ovládaným jazýčkovým relé. Pro malé průtoky do 100 l.min<sup>-1</sup> generují na výstupu elektronické části až 5impulzů/l.



Obr. 12: Lopatkový radiální průtokoměr

#### 2.4.3 Vrtulové (šroubové) průtokoměry

Proudící kapalina otáčí vrtulkou (šroubem) a obdobně jako u turbinových typů se měří otáčky zpravidla mechanickou vazbou na počítadlo. Jde o levné málo přesné přístroje (nejistota asi 2%) užívané např. v zavlažovacích systémech (Obr. 13). Přestávají fungovat při rychlostech pod 0,3m.s<sup>-1</sup>.



Obr. 13: Vrtulové  
průtokoměry

## 2.5 Objemové průtokoměry

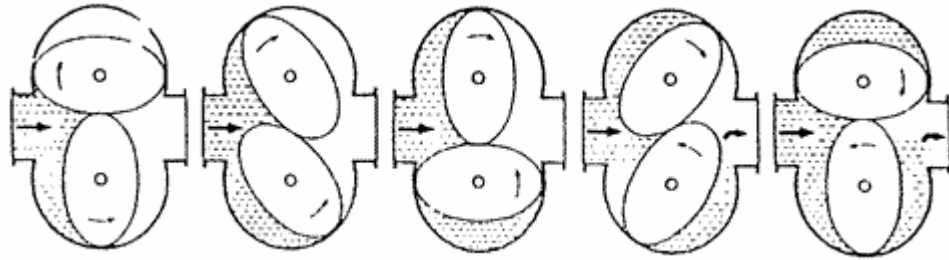
Průtokoměry určené pro měření objemového průtoku měří objem tekutiny přímo rozdělením objemu do samostatných odměrných prostor se známým objemem. Pokud vynásobíme známý objem odměrného prostoru počtem postupně naplněných prostor, získáme hodnotu objemu tekutiny, která protekla potrubím za určitou měřenou dobu. Objemové průtokoměry obvykle na počítadle ukazují celkový proteklý objem, ale mohou mít na výstupu i impulsy odpovídající počtu naplněných prostor. Existuje velký počet těchto dávkovacích průtokoměrů, které se liší velikostí naplňovaných prostor, tvarem prostor, uložením lopatek atd. Patří sem například průtokoměr s krouživým pístem, oválové průtokoměry, bubnové průtokoměry a další.

Vzhledem k tomu, že tyto průtokoměry obsahují velké množství pohyblivých částí, nejsou vhodné pro měření průtoku znečištěných kapalin a kapalin obsahujících pevné částice. Navíc způsobují tlakovou ztrátu. Vzhledem k tomu, že nelze objemové průtokoměry spolehlivě utěsnit, jsou nevhodné pro měření průtoku plynů.

### 2.5.1 Oválové průtokoměry

V průmyslu velmi rozšířený způsob měření průtoku, zejména velmi viskózních tekutin. V precizně vyrobené komoře se pohybují dvě oválná tělesa opatřená ozubením po obvodu každého z nich (Obr.14). Ozubení je vyrobeno velmi přesně s minimální vůlí a tolerance jednotlivých rozměrových řetězců na sebe úzce navazují. Odměrné komory oválného měřidla průtoku se střídavě plní a vyprazdňují a počet otáček oválových těles je úměrný proteklému množství tekutiny, pokud známe přesný objem odměrného prostoru v

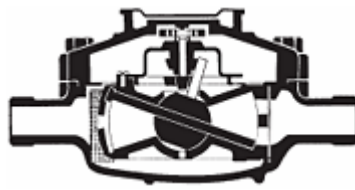
tělese.



Obr. 14: Oválové průtokoměry

Oválová měřidla mají vyšší tlakovou ztrátu, která silně závisí na velikosti tření v ložiskách, dynamické viskozitě a hustotě měřeného média.

### 2.5.2 Průtokoměry s kyvným diskem



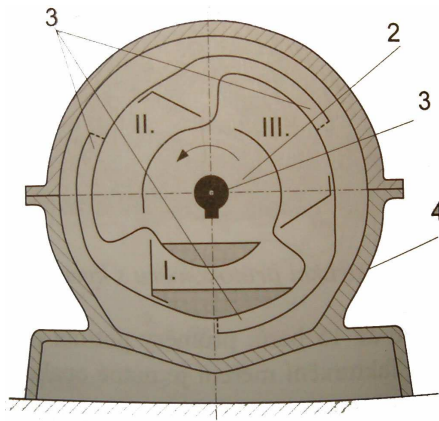
Obr. 15: Průtokoměr  
s kyvným diskem

Průtok vody měřící komůrkou způsobí kývavý pohyb talíře otáčejícího vřetenem. Otáčení vřetene je spojeno s magnetem vázaným na mechanické počítadlo (Obr. 15), nebo generuje elektrické impulsy. Průtokoměr zachytí při každé otáčce vřetene stálý objem tekutiny, úhlová rychlost otáčení vřetene je přímo úměrná objemovému průtoku tekutiny.

Vzhledem k použití magnetické vazby s počítadlem je nutné, aby materiály, z nichž je průtokoměr zhotoven, byly nemagnetické.

### 2.5.3 Bubnový průtokoměr

Měřící systém bubnového průtokoměru (Obr. 16) se skládá ze tří otočných měřících bubnů I, II a III o stejném objemu. Měřená kapalina vtéká trubicí, do prostoru 2 a z něho do nejnižší položené komory.



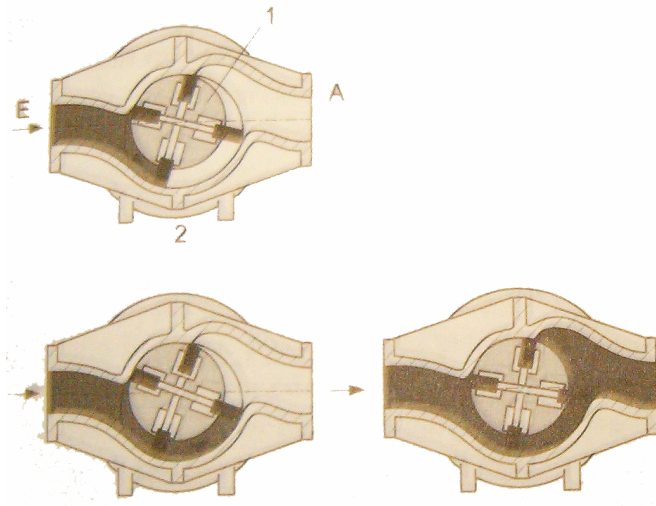
Obr. 16: Princip bubnového  
průtokoměru pro kapaliny

Když se tato komora naplní, kapalina vnikne do ústí 3. Tím se přesune těžiště, poruší rovnováha, buben se pootočí ve směru šipky o  $120^\circ$  a kapalina začne vyplňovat komoru II a celý pochod se opakuje. Po naplnění další komory dojde opět k otáčení bubnu a proces se opakuje. Pohyb bubnu je magnetickou vazbou spojen s mechanickým počítadlem, nebo impulsním senzorem polohy. Elektrické impulsy i indukčního senzoru se pak počítají elektronicky, zpravidla 1 impuls odpovídá objemu 1 litru.

#### 2.5.4 Průtokoměr s rotujícími lopatkami

Jeho podstatou je soustava lopatek pružinami přitlačovaných k pouzdru a zachycujících dávky kapaliny určené objemem prostoru mezi pouzdrem a lopatkami vycházejícího z excentricky umístěného rotoru.

Pohybem lopatek se kapalina posouvá od vtokového k výtokovému otvoru, kde se vyprazdňuje. Pohyb rotoru je magneticky vázán na počítadlo a jedné otáčky rotoru odpovídají čtyři dávky kapaliny. Jsou vhodné pro měření velkých průtoků a mohou měřit i průtok obsahující pevné nečistoty.

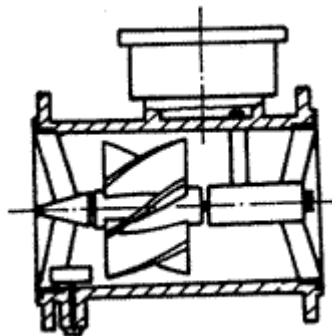


Obr. 17: Princip a fáze činnosti průtokoměru s rotujícími lopatkami:

E, A – vtok a výtok kapaliny, 1- rotor, 2 – kluzné lopatky

### 2.5.5 Šroubové průtokoměry

Jeho konstrukce je naznačena na (Obr. 18). Používá se pro větší průtoky než lopátkové vodoměry, a to v poloze horizontální do průtoku 3000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> a v poloze vertikální do průtoku 150 až 200 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.



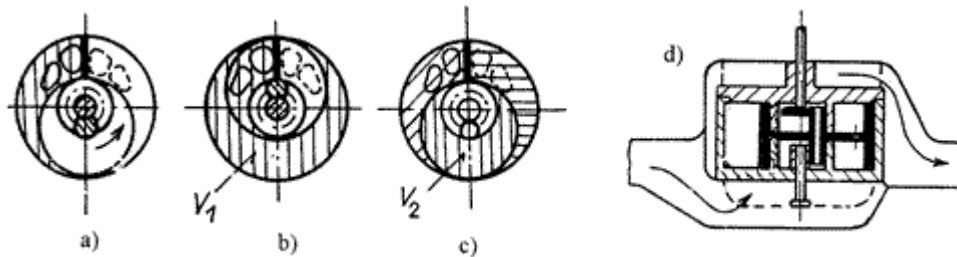
Obr. 18: Šroubový průtokoměr

### 2.5.6 Průtokoměr s krouživým pístem

Základní částí je odměrná komora, která je rozdělena přepážkou na dvě části (obr. 19). V jejím dně jsou vyvrtány vstupní otvory, v horní části výtokové otvory. Prsteneček

pístu, který se pohybuje v odměrné komoře, je přerušen výřezem, do kterého zapadá přepážka komory, umožňující pístu konat smýkavý pohyb. Od pohybu středu pístu je odvozen pohyb počítadla otáček, jehož údaj je úměrný proteklému objemovému množství kapaliny přístrojem.

Tekutina prochází při činnosti přístroje vstupními otvory ve spodní části odměrné komory a její tlak otáčí pístem. Zaplněním vnějšího odměrného prostoru  $V_1$  (Obr. 19) dojde k odměření přesného objemu. Dalším otáčením se odkryjí výtlačné otvory, odměřená kapalina odchází do prostoru vně pístu a zároveň vstupními otvory do odměrného prostoru proudí nová odměřovaná tekutina. celý měřicí cyklus se neustále opakuje. Otáčivý pohyb středu pístu je mechanicky převáděn na převodové ústrojí počítadla, nebo elektricky snímán.



Obr. 19: Vodoměr s krouživým pístem.  
a) odměřovací komora, b) prstencový píst konající krouživý pohyb, c) píst v komoře, d) řez vodoměrem

## 2.6 Ultrazvukové senzory průtoku

Průtokoměry měří bezdotykově, využívají se pro měření vodivých i nevodivých kapalin. Kapaliny mohou být silně znečištěné, agresivní, viskózní a mohou být i výbušné.

### 2.6.1 Princip činnosti ultrazvukového průtokoměru

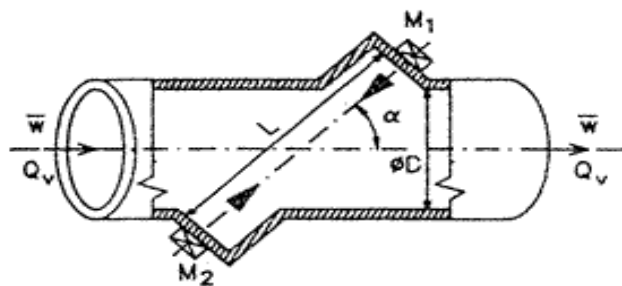
Jsou založeny na změně rychlosti šíření frekvence ultrazvukového vlnění průtokem tekutiny. Ultrazvukové vlnění se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které jsou umístěny na stěnách potrubí, v němž se měřená tekutina pohybuje rychlostí  $v$ . Proudění tekutiny vyvolá změnu rychlosti ultrazvukového vlnění úměrnou průmětu vektoru rychlosti pohybu tekutiny  $\vec{v}$  do vektoru rychlosti ultrazvukového vlnění  $\vec{c}_o$ . Ultrazvukové vlnění je generováno (vysíláno) i přijímáno ultrazvukovým měničem, pracujícím v režimu

*piezostrikčním* (vysílač) nebo *piezoelektrickém* (přijímač). Používá se ultrazvuku o frekvencích nad 20 kHz až do 1000 kHz[3].

## 2.6.2 Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry se podle uspořádání dělí do tří základních skupin:

### Přímé impulsní



Obr. 20: Princip ultrazvukového snímače průtoku

Měří dobu průchodu ultrazvukového signálu od vysílače k přijímači. Ultrazvuková vlna má tvar impulsu o trvání až několik ms, frekvence vlnění závisí na rezonační frekvenci měniče a je zpravidla v rozmezí 500 kHz až 1 MHz. Přímý ultrazvukový průtokoměr s měřením změny rychlosti nebo doby přechodu má generátor a senzor ultrazvuku umístěn na protilehlých stranách. Generátor vysílá ultrazvuk do potrubí v protisměru nebo po směru proudění tekutiny. Impulz je snímán v senzoru. Při tom platí vztah:

$$\Delta t_1 \Delta t_2 = \frac{L}{c - v \cdot \cos \alpha} \quad (24)$$

kde je  $\Delta t_1 \Delta t_2$  doba průchodu signálu

$c$  rychlost ultrazvuku v tekutině

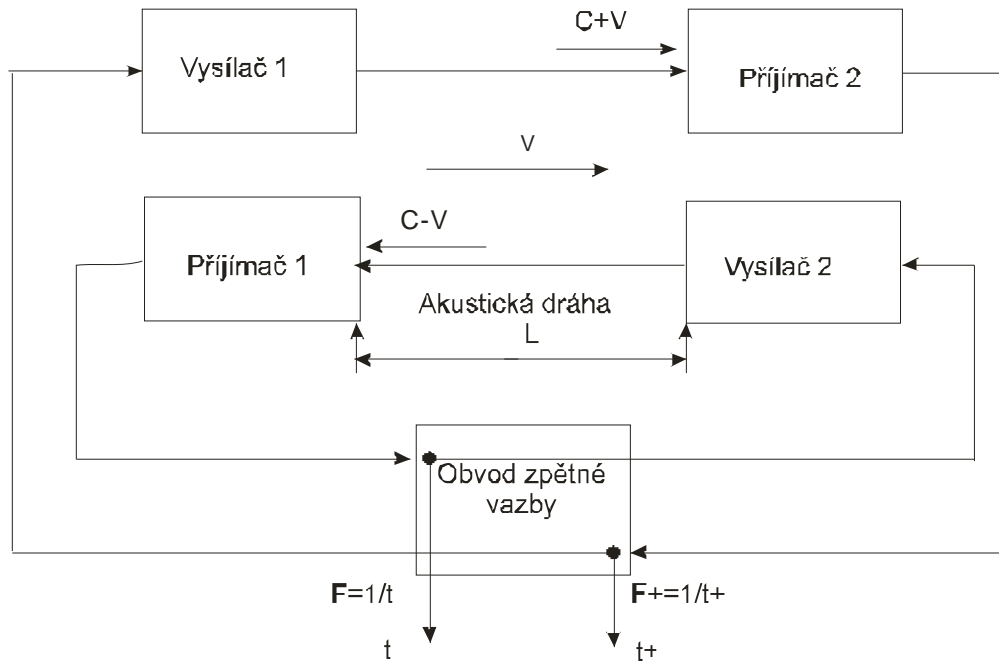
$L$  vzdálenost  $\Delta t_1 \Delta t_2$

$v$  průměrná rychlost tekutiny

$\alpha$  úhel sklonu paprsku

### Zpětnovazební

Základem zpětnovazebních průtokoměrů jsou dvě diferencně uspořádané měřící dráhy tvořené dvojicemi vysílač – přijímač (Obr. 21). V jedné dvojici se rychlosti proudění  $v$  a ultrazvuku  $c$  sčítají a v druhé odečítají.



Obr. 21: Zapojení ultrazvukových měničů průtokoměru do smyčky zpětné vazby

Pro rozdíl časových intervalů platí vztah:

$$\Delta t = t_{-} - t_{+} = \frac{2L \cdot v \cdot \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (25)$$

kde je  $t_{-} - t_{+}$  doba průchodu signálu

- $c$  rychlost ultrazvuku v tekutině
- $L$  vzdálenost generátoru a senzoru
- $v$  průměrná rychlost tekutiny
- $\alpha$  úhel sklonu paprsku

Pro rychlost proudění tekutiny můžeme odvodit vztah [3]:

$$v = \frac{c^2}{2L \cdot \cos \alpha} \cdot \Delta t \quad (26)$$

## Dopplerovy

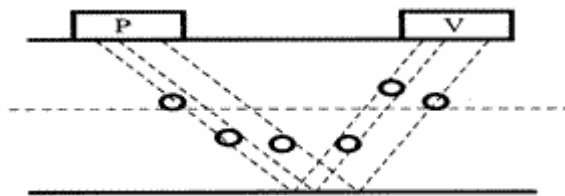
Vyhodnocují změnu frekvence ultrazvukové vlny odražené od nehomogenit



tekutiny, např. pevných částic, vzduchových bublin, které jsou unášeny proudem tekutiny. Dalo by se říci, že průtokoměry na Dopplerově principu měří rychlost pohybu nehomogenit a ne tekutiny. Vysílač a senzor jsou umístěny na stejné straně v těsné blízkosti. Rozdíl frekvence vyslaného a odraženého signálu můžeme popsat rovnicí[3]:

$$\Delta f = \frac{2 \cdot f \cdot v}{c} \quad (27)$$

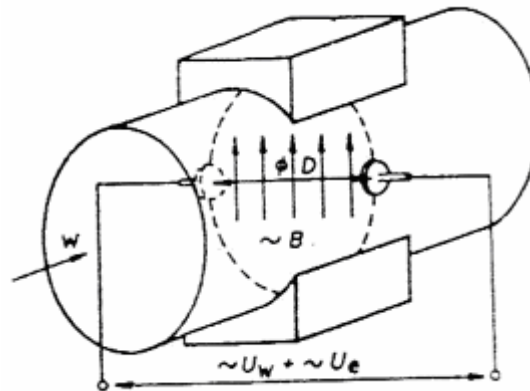
kde je  $f$  frekvence ultrazvuku  
 $c$  rychlost ultrazvuku v tekutině  
 $v$  průměrná rychlost tekutiny



Obr. 22: Princip ultrazvukového snímače průtoku - Dopplerův princip

## 2.7 Indukční senzory průtoku

Indukční průtokoměry jsou založeny na využití Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v magnetickém poli. U indukčního snímače průtoku, který je znázorněn na (Obr. 23), pohybující se vodič je představován elektricky vodivou kapalinou. Permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole, které prochází potrubím i kapalinou. Úsek potrubí mezi póly magnetu musí být z neferomagnetického materiálu. Na vnitřním průměru trubky jsou zabudovány, kolmo na směr magnetických siločar, dvě elektrody pro snímání indukovaného napětí.



Obr. 23: Princip indukčního průtokoměru

Pohybuje-li se kapalina rychlostí  $v$ , indukuje se do ní elektromotorické napětí  $E$  podle vztahu:

$$E = B \cdot d \cdot v \quad (28)$$

kde  $E$  je indukované napětí (V)

$B$  magnetická indukce (T)

$d$  délka vodiče (vzdálenost elektrod) (m)

$v$  rychlost pohybu ( $\text{m s}^{-1}$ )

Indukční průtokoměry, které jsou vyráběny můžeme rozdělit do následujících skupin:

- průtokové
- ponorné
- bodové
- plošné

## 2.8 Hmotnostní průtokoměry

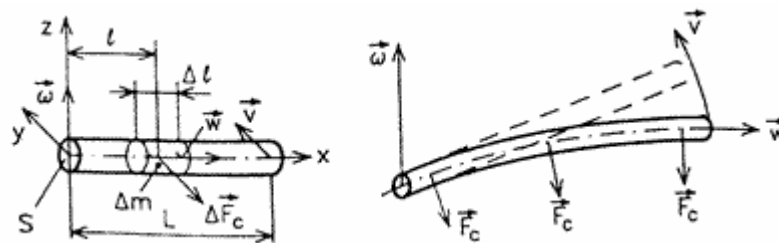
U zvlášť náročných aplikací se často dává přednost přímému měření hmotnostního průtoku. Vedle metod používaných pro stanovení hmotnostního průtoku přepočtem z objemového existuje jen několik málo metod přímého měření hmotnostního průtoku. Dvěma základními přímými metodami je Coriolisův průtokoměr a tepelný hmotnostní průtokoměr.

### 2.8.1 Coriolisův průtokoměr

Měřicí princip Coriolisova průtokoměru spočívá ve využití Coriolisovy síly. Na těleso hmotnosti  $m$  pohybujícího se rychlostí  $w$  v soustavě, která se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega$ , působí Coriolisovo zrychlení  $a_c$ .

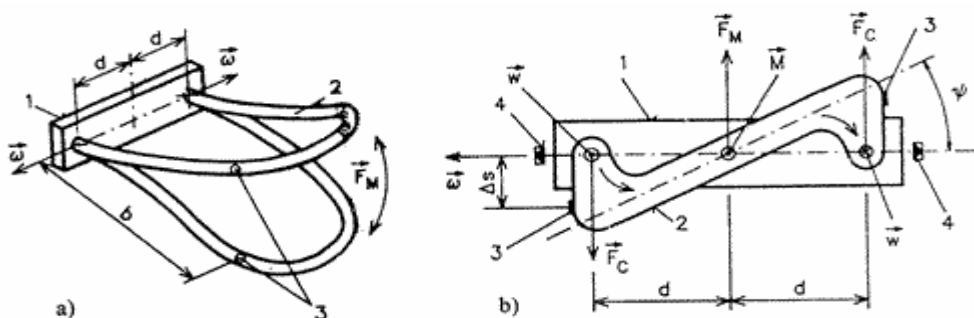
$$\vec{a}_c = 2 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{w}) \quad (29)$$

Na (Obr. 24) je aplikace tohoto jevu na proudící tekutině. Pro praktické využívání Coriolisovy síly pro měření průtoku nahradíme otáčivý pohyb harmonickým kmitáním, tj. vektor úhlové rychlosti  $w$ , a tím i vektor Coriolisovy síly  $F_C$  budou mít periodicky proměnnou orientaci.



Obr. 24: Princip Coriolisova snímače hmotnostního průtoku.

Uspořádání snímače je různé (Obr. 25). Prakticky se jedná o silně redukovanou zakřivenou trubici nebo trubice, do kterých je přiváděna měřená kapalina. Časový posun vzniklých kmitů úměrný hmotnostnímu průtoku kapaliny silně redukovaným elementem průřezu je registrován indukčním snímačem umístěným u trubice.



Obr. 25: Snímač typu "U":

a) bez proudící tekutiny, b) maximální zkroucení při proudící tekutině a pohybu trubice směrem nahoru  
1- základní deska, 2- U trubice, 3- snímací bod, 4- snímač

polohy

Na (Obr. 25) jsou měřící trubice ve tvaru "U". Trubice je vertikálně rozkmitávána silovým působením elektromagnetu. Působíště periodické budící síly je označeno FM. Budícím kmitočtem je obvykle rezonanční kmitočet trubice. V případě, že trubicí protéká tekutina rychlostí  $w$ , budou na obě ramena U trubice působit harmonicky proměnné Coriolisovy síly FC opačné orientace ve vtokové a ve výtokové části trubice. Důsledkem působení páru sil vznikne kroutící moment  $M$ , který způsobí zkroucení U trubice o úhel  $y$ :

$$\overline{M} = 2 \cdot d \cdot \overline{F}_c \quad (30)$$

Maximální úhel zkroucení nastává při maximální velikosti vektoru FC, tedy při maximální hodnotě vektoru úhlové rychlosti  $w$  při průchodu středu trubice nulovou polohou. Na obrázku 20 je znázorněn maximální zkrut při pohybu U trubice směrem nahoru. Vyhodnocení maxima periodicky proměnného kroutícího momentu se provádí měřením časového intervalu  $\Delta t$  mezi následujícími průchody levého a pravého snímacího bodu nulovou polohou (bod 3) prostřednictvím polohových snímačů umístěných ve vzdálenosti  $b$  od základní desky U trubice.

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta s}{v} = \frac{2 \cdot \Delta s}{b \cdot \omega} \quad (31)$$

kde  $\Delta s$  dráha snímaného bodu

$v$  obvodová rychlost

Pro malý úhel  $y$  lze připustit, že  $D_s \approx d \cdot y$  a pak rovnici můžeme přepsat do tvaru:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d \cdot \psi}{b \cdot \omega} \quad (32)$$

Tuhost trubice způsobí direktivní kroutící moment vůči ose symetrie obou půltrubic  $MD = k \cdot y$ , kde  $k$  je tuhost. Při splnění podmínky  $MD = M$  nastane rovnovážný stav, tj.  $k \cdot y = 2 \cdot FC \cdot d$ , kde  $FC = 2 \cdot L \cdot w \cdot Q_m$ , kde  $L$  je účinná délka jednoho ramene U trubice

$$\Delta t = \frac{8 \cdot d^2 \cdot L}{b \cdot k} \cdot Q_m \quad (33)$$

Z uvedeného vyplývá, že  $Q_m$  závisí na úhlové rychlosti  $w$ . Hmotnostní průtok je lineární funkcí Coriolisovy síly, která způsobuje kroutící moment  $M$ .

Coriolisovy průtokoměry měří hmotnostní průtok velmi přesně a jejich údaj je v

podstatě nezávislý na teplotě, tlaku, viskozitě, hustotě, vodivosti, typu proudění a na obsahu pevných částic v tekutině. Navíc umožňují měřit hustotu, koncentraci, poměrný obsah pevných částic v tekutině, a dokonce i její viskozitu (pokud se současně měří rozdíl tlaků tekutiny na vstupu a výstupu přístroje). Jakmile jsou tyto průtokoměry zkalibrovány, lze je bez recalibrace použít v mnoha různých aplikacích.

Coriolisovy průtokoměry pracují s rozsahy průtoků 0,05 až 18000 kg.min<sup>-1</sup>, s přesností 0,4% (0,2%) z měřené hodnoty. Mají vysokou tlakovou ztrátu.

## 2.9 Fluidikové průtokoměry

Fluidiková čidla jsou proudové tekutinové členy založené na aerohydrodynamických principech. K jejich ovládní se využívá vzájemného působení proudů tekutiny, snímače a aerodynamických jevů. Fluidikové průtokoměry se vyznačují výhodnými vlastnostmi, které vyplývají z charakteru tekutiny jako pracovního měřeného média. Jsou vhodné pro těžké pracovní podmínky (vysoké teploty, velké zrychlení, vibrace, silná elektromagnetická pole, ionizující záření, výbušná prostředí apod. ). Vyznačují se vysokou spolehlivostí, dlouhou dobou života a nižšími pořizovacími náklady.

### 2.9.1 Vírové průtokoměry

Vírové průtokoměry jsou založeny na měření frekvence tzv. Karmánových vírů [3], které vznikají za obtékáním tělesem neaerodynamického tvaru v proudovém poli. Pro tento jev platí vztah:

$$f = k_s \cdot \frac{v}{b} \quad (34)$$

kde je  $f$  frekvence vírů

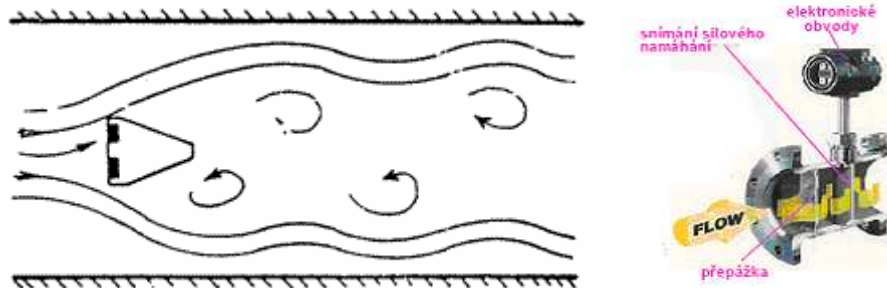
$k_s$  konstanta tzv. Strohalovo číslo

$v$  rychlost proudění

$b$  rozměrová konstanta překážky

Vložené těleso musí mít tvar zaručující stabilitu pravidelného snímání frekvence vírů, což splňují např. prizmatická tělesa s rovnou náběhovou čelní stěnou a definovanou rovinou snímání vírů. Konstrukční uspořádání se liší tvarem a velikostí vložených

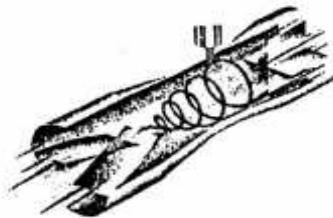
prizmatických těles, místem a způsobem snímání frekvence vzniklých vírů (ultrazvukem, kapacitními nebo tenzometrickými snímači, termistory). Místem snímání frekvence je vložené těleso nebo stěna potrubí [6].



Obr. 26: Princip funkce vírového průtokoměru

### 2.9.2 Vířivé průtokoměry

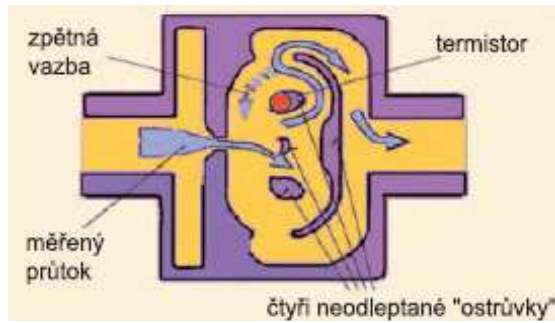
Princip spočívá v protékání tekutiny, která je vloženými zakřivenými lopatkami uvedena do rotačního pohybu. Tím vzniká radiální spád, který způsobí pohyb jádra. Frekvence rotace se snímá tenzometrem nebo termistorem. Výstupní signál je frekvence, pulsy nebo proud.



Obr. 27: Princip funkce vířivého průtokoměru

### 2.9.3 Oscilační průtokoměry

Principem měření je využití uměle vytvořeného pulzujícího proudu měřené kapaliny ve zpětnovazebním kanálu fluidikového zesilovače v režimu oscilátoru. Frekvence pulzací závisí na průřezu a délce zpětnovazebního kanálu, tzn. na rychlosti proudění. Nezávisí na vlastnostech měřeného média (např. jeho teplotě, hustotě).



Obr. 28: Příklad vnitřního uspořádání dutiny oscilátorového průtokoměru

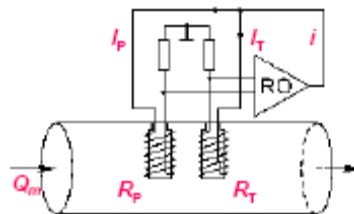
## 2.10 Tepelné průtokoměry

Tepelné průtokoměry jsou založeny na závislosti intenzity výměny tepla mezi zdrojem (čidlo) a okolím tvořeným proudící tekutinou na hmotnostním průtoku. Tento fyzikální princip nejvíce vyhovuje měření průtoku čistých plynů s malou hustotou. Metodu lze použít i pro měření malých průtoků kapalin. Existují dva základní typy tepelných hmotnostních průtokoměrů: termoanemometry – měří ochlazení žhaveného drátku

kalorimetrické průtokoměry - měří oteplení tekutiny

### 2.10.1 Termoanemometry

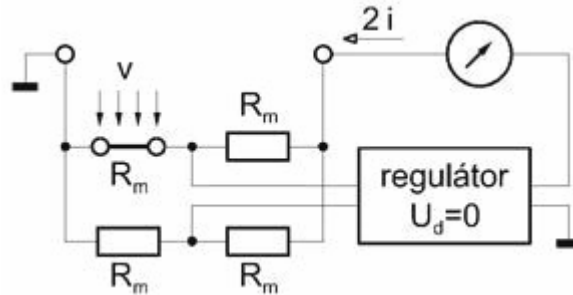
Tento typ průtokoměrů obsahuje pouze jeden aktivní/měřicí prvek. Ten je vytvořen z tenkého platinového drátku nebo napařené vrstvičky na skleněné nebo křemenné trubičce nebo miniaturním perličkovým termistorem, který je neustále elektricky zahříván na konstantní teplotu. Snímač je pak umístěn v měřicí trubce [7].



Obr. 29: Příklad umístění snímače do měřicí roury či trubice

Proudící plyn procházející trubicou tento drátek ochlazuje a k zajištění jeho stejné konstantní teploty je tedy zapotřebí více energie, tj. vyšší protékající proud. Zvýšení nebo

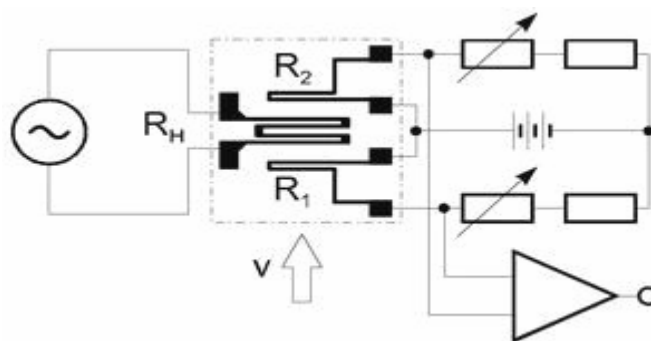
snížení odběru výkonu, resp. jeho absolutní hodnota, je úměrný zvýšení nebo snížení průtoku, resp. hodnotě průtoku nebo rychlosti proudění. Dokonalejší je provedení se dvěma snímači, kdy je tak možné zjišťovat i směr proudění, podle toho, který se ochlazován dříve.



Obr. 30: Měřící obvod termoanemometru s konstantní teplotou drátku

### 2.10.2 Kalorimetrický snímač průtoku

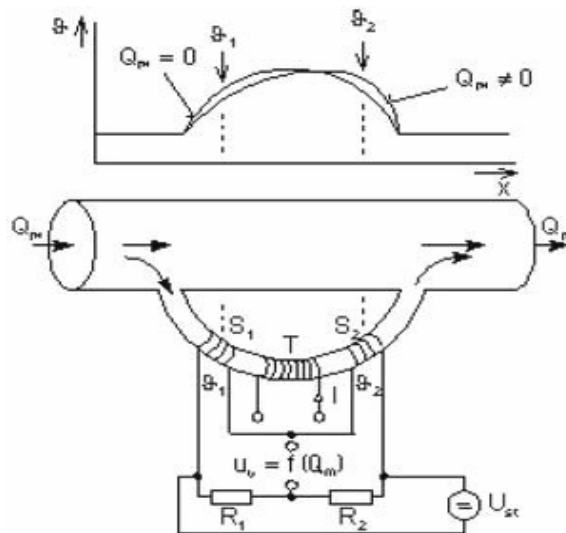
Kalorimetrický snímač, pracující na jako diferenční termoanemometr, pracuje na mírně odlišném principu. Zde již nepracuje jeden snímač zároveň jako zdroj tepla a snímač. K měření jsou použity pouze dva teplotní snímače (např. typu Pt100) a jedno topné tělísko. Jeden snímač (např. Pt100) měří aktuální teplotu okolního plynu (tlakového vzduchu), druhý je vyhříván topným tělískem na konstantní teplotní rozdíl vůči prvnímu. Čím vyšší je proudění plynu, tím více tepla je odváděno a tím více je ochlazován druhý Pt100. Aby se udržela konstantní teplotní diference, vyhřívací proud topného tělíska musí adekvátně vzrůst. Velikost vyhřívacího proudu je digitalizována a přivedena jako vstup do vyhodnocovací jednotky. Zde se jeho průběh linearizuje a na základě známých vnitřních rozměrů měřicího potrubí se vypočte aktuální průtok.



Obr. 31: Měřící obvod diferenčního termoanemometru



Diferenční anemometr využívá dvou vrstevných odporů  $R_1$  a  $R_2$  umístěných spolu s vyhřívacím odporem  $R_H$  (Obr.31) na izolačním podkladu. Při nulové rychlosti proudění tekutiny jsou odpory  $R_1$  a  $R_2$  zahřívány na stejnou teplotu a měřící můstek je vyvážen. Při nenulové rychlosti proudění tekutina ochlazuje přední odpor a zvýšeným přenosem tepla od  $R_H$  ohřívá odpor zadní. Toto zapojení je obecně doporučováno pro citlivá měření malých průtoků.



Obr. 32: Možné uspořádání snímačů a topného drátku pro měření množství průtoku

Při výpočtu hmotnostního průtoku se předpokládá, že teplo z vyhřívacího odporu se celé vyzáří do proudící tekutiny. Rozdíl teplot tekutiny před a za vyhřívacím odporem se dá vypočítat podle vztahu [35]:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (35)$$

přičemž

$$P = Q = R \cdot I_2 \quad (36)$$

kde  $m$  hmotnost ohřívané tekutiny

$c_p$  hmotnostní tepelná kapacita při konstantním tlaku

$T_2$  teplota tekutina za vyhřívacím odporem

$T_1$  teplota před vyhřívacím odporem

- $P$  tepelný výkon ohřívače
- $R$  odpor spirály topného odporu
- $I_2$  proud protékající topným odporem.

## 2.11 Průtokoměry se značením tekutiny

Při této metodě se měří časový interval, ve kterém se daná značka přemístí s tokem tekutiny od místa vzniku značky do místa snímače. Pro vytvoření značek je možno použít buď cizí částice (rozpuštěná látka, jiný plyn, barevná kapalina, radioizotop apod.) nebo změněných vlastností tekutiny (teplota, ionizace). Podle typu značky je volena i její detekce, tj. snímač. Při užití tepelné značky to může být např. termistor, při změně chemického složení analyzátor, fotoelektrický snímač apod. Časový interval, potřebný pro průchod značky, je úměrný rychlosti proudění při konstantním průřezu pak i průtoku. Značkovacích metod se používá převážně pro příležitostná a kontrolní měření.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 DĚLENÍ METOD PODLE POUŽITELNÉHO MĚŘÍČÍHO ROZSAHU A MĚŘENÉHO MEDIA

#### 3.1 Porovnání různých principů měření průtoků kapalin

Následující tabulka znázorňuje parametry průtokoměrů, které jsou v současné době k dostání na trhu. Jsou zde znázorněny použitelné měřicí rozsahy metod, tekutiny, které lze měřit určitou metodou a maximální teploty a tlak měřeného média.

Tabulka č. 1

Průtokoměr	Rozsah ( $Q_{\max}:Q_{\min}$ ) [poměr maximální a minimální měřitelné hodnoty ]	Plyny, páry		Kapaliny				Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
		A	B	A	B	C	D	
Normalizovaná clona	4:1	x	-	x	o	-	o	do 540
Venturiho trubice	4:1	x	o	x	o	o	o	do 540
Dýza	4:1	x	o	x	o	o	o	do 540
Pitotova trubice	3:1	x	-	x	-	o	o	do 540
Kolenový	3:1	x	o	x	o	-	o	do 540
Objemové	10:1	-	-	x	-	o	-	do 250
Plováčkový skleněný	10:1	x	-	x	-	x	o	do 120
Elektromagnetický	30:1	-	-	x	x	x	x	do 180
Vírový	20:1	x	o	x	o	-	o	do 430
Turbínkový	10:1	x	-	x	-	o	o	do 500

Ultrazvukový(Doppler)	30:1	-	x	-	x	o	x	do 300
Ultrazvukový(klasický)	30:1	x	x	x	x	o	x	do 300
Coriolisův	80:1	o	-	x	x	x	o	do 200
Termoanemometr	50:1	x	-	o	-	-	-	do 80

Vysvětlivky: **A** = čistá tekutina

**B** = znečištěná tekutina

**C** = viskózní tekutina

**D** = korozivní tekutina

**x** = průtokoměr je přímo určen pro daný typ tekutiny

**o** = průtokoměr lze použít pro tento typ tekutiny

**-** = průtokoměr není určen pro tuto tekutinu

Tabulka č. 2

<b>Průtokoměr</b>	<b>Tlaková ztráta</b>	<b>Tlak [MPa]</b>	<b>Přesnost (z měřené hodnoty) [%]</b>
Normalizovaná clona	velká	do 41	1-2
Venturiho trubice	střední	do 41	1-2
Dýza	velká	do 41	1-2
Pitotova trubice	malá	do 41	5
Kolenový	malá	do 41	5
Objemové	střední	do 10	1

Plováčkový skleněný	střední	do 3	1
Elektromagnetický	-	do 10,5	1
Vírový	střední	do 10,5	1,5
Turbínkový	velká	do 43	0,5
Ultrazvukový(Doppler)	-	do 10	5
Ultrazvukový(klasický)	-	do 10	5
Coriolisův	malá	do 10	0,2
Termoanemometr	malá	do 31	1

Z tabulky můžeme vyčíst, že clonou lze měřit průtok většiny čistých tekutin. Jsou však náchylné vůči opotřebení, které může být způsobeno znečištěným médiem nebo médiem s částicemi. To může ovlivnit tlakovou diferencii odpovídající určitému průtoku. Clona je při své jednoduchosti v principu přesné zařízení, nejistoty clonou mohou být v rozmezí 1-2.

Výhodou Venturiho trubice je menší tlaková ztráta než u clony a velká přesnost měření. Nevýhodou je poměrně vysoká cena, proto se Venturiho trubice využívá velmi málo.

Dýzy umožňují měřit větší průtok než clony a také umožňují měřit průtok u tekutin, které obsahují větší pevné částice. Na druhou stranu jsou dýzy méně přesné a způsobují větší tlakovou ztrátu.

Pitotovy trubice se používají především pro měření průtoku plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu možného zanesení otvorů trubice, kterými se tlak snímá.

Podobné parametry jako má clona můžeme vidět i u kolenových průtokoměrů.

Objemové průtokoměry obsahují velké množství pohyblivých částí, proto nejsou vhodné pro měření průtoku znečištěných kapalin a kapalin obsahujících pevné částice.

Navíc způsobují tlakovou ztrátu. Vzhledem k tomu, že nelze objemové průtokoměry spolehlivě utěsnit, jsou nevhodné pro měření průtoku plynů.

K nejvýznamnějším výhodám u plováčkových průtokoměrů patří jejich měřicí rozsah (10:1), malá tlaková ztráta a schopnost měřit i malé průtoky.

Elektromagnetickým průtokoměrem lze měřit kapaliny, které jsou elektricky vodivé i nemagnetické. Podmínkou pro správné měření průtoku je, že potrubí musí být zcela zaplněno tekutinou. Protože se tyto průtokoměry nevkládají do potrubí (jsou bezdotykové), nezpůsobují žádnou trvalou tlakovou ztrátu. Navíc nemají žádné pohyblivé části, které by podléhaly opotřebením.

Výhodou vírových průtokoměrů je to, že jsou relativně necitlivé na změny teploty, tlaku nebo hustoty měřeného média, dále jejich tlaková ztráta je velmi malá a lze tyto průtokoměry použít v rozsahu 20:1. Nevýhodou je, že vírové průtokoměry nelze použít při velmi malých rychlostech proudění a pro měření průtoku tekutin s viskozitou.

Výhodou turbínkových průtokoměrů je použití v širokém rozsahu měřených rychlostí, reprodukovatelnost měření i krátkodobá přesnost. Většinou se používají pro měření průtoku vody. Nevýhodou je, že je nelze použít u tekutin, které při proudění v potrubí víří, a nejsou doporučovány ani pro tekutiny s velkou viskozitou. Protože turbínkové průtokoměry obsahují pohyblivé části, jsou náchylné na opotřebením a na usazování nečistot.

Stejně jako elektromagnetické průtokoměry, tak i ultrazvukové průtokoměry jsou bezkontaktní, proto nezpůsobují tlakovou ztrátu, a také neobsahují pohyblivé části, které by se opotřebovávaly. Ultrazvukové průtokoměry mají široký rozsah měření a jsou přesnější než jiné používané průtokoměry.

Coriolisovy průtokoměry měří hmotnostní průtok velice přesně a jejich údaj je v podstatě nezávislý na teplotě, tlaku, viskozitě, obsahu pevných částic v tekutině.

Termoanemometry jsou vhodné pro čisté plyny a kapaliny známého složení a vlastností, s malou hustotou a především pro malé průtoky plynů. K hlavním výhodám výhodám patří rychlost a přesnost měření.

## 4 VÝBĚR METOD VHODNÝCH PRO KONSTRUKCI MALÝCH SENZORŮ PRŮTOKU

V poslední době se klade velký důraz na miniaturizaci měřících zařízení. Tímto problémem se zabývá mikrofluidika. Mikrofluidika se zabývá prouděním tekutin v malých kanálcích. Uplatnění nachází mikrofluidika všude tam, kde je nezbytné pracovat s tekutinami a vystačí se s jejich malým množstvím. Typická mikrofluidická zařízení jsou zhotovována technologiemi původně vyvinutými pro mikroelektroniku. Nejvíce se využívá leptání kanálků pro průtok tekutiny v křemíkových čípech, na nichž jsou často také elektronické obvody, které průtok ovládají a využívají informaci již tekutina přináší.

Průtokoměry se vyrábějí různými technologiemi jako CMOSens, které dokáže implementovat celé senzory na jeden křemíkový chip. Průtokoměry vytvářené technologií CMOSens jsou založeny na kalorimetrickém principu měření. Tzv. využívá se zde změny rozložení teploty okolo topného elementu při různé rychlosti proudění měřeného média. Výhodou metody CMOSens je možnost integrace většího počtu různých senzorů na jeden chip a tak vytvořit kompaktní, inteligentní a spolehlivý multisenzor.

Další technologií zabývající se miniaturizací je technologie, označovaná jako MEMS (Mikro-Elektrické-Mechanické-Systémy). Společné integrace mechanických a elektronických struktur. Technologie MEMS je spojení integrovaných obvodů a mikromechanických struktur a jejich vzájemnou integrací na jednom chipu.

### 4.1 Výběr metod

Důležité je vědět, kolik tekutiny kde v mikrofluidickém systému proudí. Metody měření průtoku jako třeba použití průřezových měřidel shledávám méně vhodné (clonky, Venturiho trubice), protože vyvozují příliš velké ztráty, generované tlakové rozdíly jsou velmi malé a hrozí ucpání mimořádně malých otvorů.

Zpravidla je požadován výstup průtokoměru v elektrické podobě, v níž jsou pak také informace dále zpracovávány. Zde se naráží na zásadní problém neexistence přímé přeměny pohybu běžné elektricky neutrální tekutiny na elektrický signál. Je nutná mezi přeměna. Nejjednodušší je cesta přes mechanický pohyb. Mikroturbínka by mohla být použita jako převodník na rotační mechanický pohyb. Existují ovšem jednodušší možnosti. Namísto rotace nebo přesouvání volně pohyblivých součástek, lze pro účely převodu



signálů vystačit s malými deformačními pohyby.

Nynější technologie dokáží vyrobit na křemíkové destičce snímač průtoku založený na principu připomínajícím plováčkový průtokoměr (rotometr) tím, že s průtokem se zvětšuje nejmenší protékaný průřez. Ovšem na rozdíl od rotometru není pohyb tak velký, aby se ustavil konstantní tlakový spád. Ten zde s průtokem narůstá a právě jeho velikost je měřena způsobem připomínajícím zase tenzometrický tlakoměr. Namísto deformace membrány tlakoměru je ohýbáno tělísko, jehož volný konec při svém průhybu vymezuje zvětšující se průřezovou kontrakci.

Myslím si, že v dnešní mikrofluidice je však mnohem charakterističtější využít pro mezipřevod místo mechanického pohybu, převod z tepelných efektů. Umožňují to právě malé rozměry, při nichž přestává být významná tepelná setrvačnost, která jinak u větších rozměrů výrazně omezuje dynamiku převodu.

Z mého pohledu a po prostudování dostupné literatury, která se mi dostala do rukou, si myslím, že nejvhodnější metody pro konstrukci malých senzorů průtoku jsou metody: Termoanemometry, Kalorimetrické, Oscilační metoda:

Termoanemometry, Kalorimetrické metody jsem vybral z důvodu, protože pro snímání využívají tenzometrických odporových snímačů, které se běžně zhotovují jako dopování upravené oblasti na povrchu tělíska. Myslím si, že je jednodušší využít pro převod místo mechanického pohybu tepelných efektů.

Další z metod, kterou shledávám použitelnou pro konstrukci malých senzorů průtoku je metoda oscilační. Kde se využívá uměle vytvořeného pulzujícího proudu měřené kapaliny ve zpětnovazebním kanálu. Kde měřený signál se pak velmi snadno převádí na digitální – prostým načítáním oscilačních period během konstantního časového intervalu.

Samozřejmě by se dali využít i jiné metody, ale já osobně shledávám tyto tři metody jako nejvhodnější. Jak z pohledu snímání tak i z převodu na digitální signál a pozdější zpracování.

## ZÁVĚR

První část práce se zabývá vypracováním přehledu základních fyzikálních principů a definic používaných při měření průtoku na základě literatury.

V další části je popsáno základní rozdělení používaných metod měření průtoku podle měřené veličiny (objemový nebo hmotnostní průtok) nebo ze závislosti výstupní veličiny průtokoměru na kinetické energii nebo rychlosti proudící tekutiny.

Další část obsahuje postupný rozbor jednotlivých metod měření průtoku a vysvětlení jejich principů funkce a použití.

Poslední, praktická část práce, je rozdělena na dvě části. První část je zaměřena na vlastní rozdělení metod podle použitelného měřicího rozsahu a měřeného média. V přehledových tabulkách jsou znázorněny použitelné měřicí rozsahy metod, tekutiny, které lze měřit určitou metodou a maximální teploty a tlaky měřeného média.

V další části se práce zabývá výběrem metod vhodných pro konstrukci malých senzorů průtoku. Tento výběr nebylo jednoduché vytvořit, protože technologie výroby jsou poměrně nové a není tolik dostupných materiálů pro konstrukci mikro snímačů z oboru měření průtoku. Vybral jsem pouze tři metody (termoanemometry, kalorimetrické, oscilační). A to jak z důvodu snímání, tak z důvodu převodu na digitální signál.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In the first part of my work I work up a resumption of the basic physical principles and of the definitions used for flow measurement based on literature.

Then I described basic division of the methods used for the flow measurement according to a measured value (volume rate of flow or weight flow) or according to the dependence of an output quantity of a flowmeter on the kinetic energy or the speed of the running liquid.

The next part contains the progressive parsing of the particular methods of the flow measurement and an explanation of its functional principles and using.

I deal with choosing of the methods which are efficient for a construction of the small flow sensors in the next part of the work. It wasn't easy to make the choice because technologies of production are quite new and there aren't available materials for the construction of the microsensors which are from the field of the flow measurement. I've chosen only three methods (thermoanemometer, calometrical, oscillative). The reasons were sensing and conversion to the digital signal.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Bejček Ludvík, Ďaďo Stanislav, Platil Antonín : Měření průtoku a výšky hladiny,BEN, 2006, ISBN 80-7300-156-X
- [2] Hardy, Jim E: Flow Measurement Methods and Applications,Wiley-Interscience, New York 1999
- [3] Hruška, F.: Technické prostředky automatizace IV., UTB ve Zlíně, 2001
- [4] Webster, J.: The measurement, instrumentation, and sensorshandbook, CRC Press, Boca Raton 1999
- [5] Článek o škrťicích orgánech na stránkách MENDELOVY UNIVERSITY:  
[http://old.mendelu.cz/~klepar/fls/sn\\_prskrtici.htm](http://old.mendelu.cz/~klepar/fls/sn_prskrtici.htm)
- [6] Článek o rychlostních průtokoměrech na stránkách MENDELOVY UNIVERSITY:  
[http://old.mendelu.cz/%7Eklepar/fls/sn\\_pr rychlostni.htm](http://old.mendelu.cz/%7Eklepar/fls/sn_pr rychlostni.htm)
- [7] Článek o teplotních průtokoměrech na stránkách AUTOMATIZACE:  
<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART269-teplotni-prutokomery-%E2%80%93-termoanemometry.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MEMS Mikro-Elektrické-Mechanické-Systemy

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Clona.....	16
Obr. 2: Klasická Venturiho trubice.....	17
Obr. 3: Dallova trubice .....	18
Obr. 4: Dýza.....	18
Obr. 5: Kolenový průtokoměr.....	19
Obr. 6: Rozložení proudnic kolem překážky s tupým čelem.....	20
Obr. 7: Princip Pitotovy trubice .....	20
Obr. 8: Prandtlova trubice tvaru L.....	21
Obr. 9: K odvození funkce plováčkového průtokoměru.....	22
Obr. 10: Nejužívanější tvary plováků: .....	24
Obr. 11: Řez turbinovým průtokoměrem.....	25
Obr. 12: Lopatkový radiální průtokoměr .....	25
Obr. 13: Vrtulové průtokoměry .....	26
Obr. 14: Oválné průtokoměry .....	27
Obr. 15: Průtokoměr s kyvným diskem .....	27
Obr. 16: Princip bubnového průtokoměru pro kapaliny .....	28
Obr. 17: Princip a fáze činnosti průtokoměru s rotujícími lopatkami: .....	29
Obr. 18: Šroubový průtokoměr .....	29
Obr. 19: Vodoměr s krouživým pístem. a) odměřovací komora, b) prstencový píst konající krouživý pohyb, c) píst v komoře, d) řez vodoměrem.....	30
Obr. 20: Princip ultrazvukového snímače průtoku .....	31
Obr. 21: Zapojení ultrazvukových měničů průtokoměru do smyčky zpětné vazby.....	32
Obr. 22: Princip ultrazvukového snímače průtoku - Dopplerův princip .....	33
Obr. 23: Princip indukčního průtokoměru .....	34
Obr. 24: Princip Coriolisova snímače hmotnostního průtoku. ....	35
Obr. 25: Snímač typu "U": .....	35
Obr. 26: Princip funkce vírového průtokoměru.....	38
Obr. 27: Princip funkce vířivého průtokoměru.....	38
Obr. 28: Příklad vnitřního uspořádání dutiny oscilátorového průtokoměru .....	39
Obr. 29: Příklad umístění snímače do měřicí roury či trubice .....	39
Obr. 30: Měřící obvod termoanemometru s konstantní teplotou drátku.....	40

---

Obr. 31: Měřící obvod diferenčního termoanemometru .....	40
Obr. 32: Možné uspořádání snímačů a topného drátku pro měření množství průtoku.....	41

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1.....	44
Tabulka č. 2.....	45