

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

**MĚŘENÍ PRŮTOKU**  
**A MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY KAPALINY**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Autor práce: David Janeček

**Praha 2011**

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Akademický rok 2009/2010

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**David Janeček**

obor Silniční a městská automobilová doprava - Jičín

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze  
čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Měření průtoku a měření výšky hladiny kapaliny**

## **Osnova bakalářské práce:**

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled metod používaných pro měření průtoku.
4. Přehled metod používaných pro měření výšky hladiny kapaliny.
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

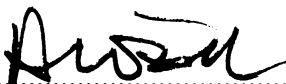
Doporučené zdroje:

- [1] ČAPLA, L. Problematika měření velkých průtoků zemního plynu ve vysokotlakých plynovodech. Kandidátská disertační práce. Praha: VŠCHT FTOP, 1998.
- [2] ĎAĎO, S. – BEJČEK, L. – PLATIL, A. Měření průtoků a výšky hladiny. Praha: BEN – technická literatura, 2005.
- [3] SBORNÍK. Měření průtoků. Praha: Dům techniky, 1989.
- [4] Furness Controls. Industrial & Scientific Instrument Manufacturers [on-line] [cit. 2008-12-08]. Dostupné z: <http://www.furness-controls.com/>
- [5] Meriam. The Trusted Leader in Measurement & Calibration [on-line] [cit. 2008-12-08]. Dostupné z: <http://www.meriam.com/>
- [6] Omega. Měření průtoků a měření výšky hladiny [on-line] [cit. 2008-12-08]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/shop/flow-level.html>
- [7] časopisy: MM průmyslové spektrum, Strojárstvo - Strojírenství, Strojírenská výroba, Technický týdeník, Technik.
- [8] normy ČSN, ČSN ISO, ČSN EN, STN, DIN, ASME, ASTM, GOST, BS, NF, aj.
- [9] firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Milan Brožek, CSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011

  
.....  
Vedoucí katedry



  
.....  
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

## Čestné prohlášení

*Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny jsem uvedl podle platného autorského zákona v seznamu literatury.*

*Lánov 4. dubna 2011*

podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za odborné vedení bakalářské práce.*

---

## Abstrakt

---

Cílem bakalářské práce je umožnit základní orientaci v přístrojích používaných pro měření průtoku a výšky hladiny kapaliny. V první části je uveden přehled metod používaných pro měření průtoku tekutiny. K jednotlivým metodám jsou přiřazeny nejčastěji používané typy průtokoměrů s popisem principu, předností, nedostatků a informacemi o možnostech použití. Pro pochopení procesů probíhajících uvnitř těchto senzorů je zařazena stručná kapitola se základními pojmy a definicemi souvisejícími s prouděním tekutin. Druhá část práce je zaměřena na přehled metod používaných pro měření výšky hladiny kapaliny, obdobně s rozbořem funkce a zhodnocením kladů či záporů v praxi nejvíce zastoupených hladinoměrů. Při volbě vhodného senzoru průtoku i výšky hladiny je nutné zvážit mnoho okolností a faktorů. Zanedbáním důležitých kritérií mohou vzniknout ekonomické i materiální ztráty, proto je věnován prostor nejvýznamnějších vlivům, ke kterým by měl konstruktér při návrhu senzoru přihlídnout.

*Klíčová slova: Průtokoměr, hladinoměr, objemový průtok, hmotnostní průtok, senzor.*

### **ENGLISH:**

The aim of this bachelor paper is to give a basic orientation in the instruments designed for a flow and level liquid measurement. In the first part there is given an overview of the flow rate measurement used methodology. For each method there are matched the most used types of flow-meters with a principle description, its advantages and disadvantages and information of usage possibilities. For understanding the processes running inside of these sensors there is a brief chapter with the basic terms and definitions related to a liquid flow. The second part is aimed on an overview of the methods used for the measurement of liquid level; analogical also with the function description and evaluation of pros-and-cons in the praxis mostly represented level measurements. When using the right flow and liquid level sensor it is necessary to consider many circumstances and factors. Ignoring the important criterions can lead to economical and also material losses, therefore the attention is paid to the most important factors, which the designer should take into consideration when designing the sensor.

*Keywords: Flowmeter, level indicator, volume flow, mass flow, sensor.*

---

# Obsah

---

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>2 CÍL PRÁCE A METODIKA.....</b>	<b>9</b>
<b>3 PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU.....</b>	<b>10</b>
3.1 Základní pojmy a definice.....	10
3.2 Senzory průtoku tekutin.....	13
3.2.1 Výběr senzoru průtoku.....	13
3.2.2 Metody měření průtoku tekutin.....	14
3.3 Objemové průtokoměry.....	14
3.3.1 Oválový průtokoměr.....	15
3.3.2 Tělesový průtokoměr.....	17
3.3.3 Průtokoměr s krouživým pístem.....	17
3.4 Rychlostní průtokoměry.....	19
3.4.1 Průřezové průtokoměry.....	19
3.4.2 Rotametry.....	22
3.5 Hmotnostní průtokoměry.....	25
3.5.1 Coriolisovy průtokoměry.....	25
<b>4 PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PRO MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY KAPALINY.....</b>	<b>29</b>
4.1 Výběr senzoru výšky hladiny.....	29
4.2 Jednoduché indikátory hladiny.....	30
4.3 Mechanické hladinoměry.....	31
4.3.1 Plovákové hladinoměry.....	31
4.4 Tlakové hladinoměry.....	33
4.4.1 Ponorné závěsné senzory.....	34
4.4.2 Statické senzory.....	35
4.4.3 Připojení s oddělovací membránou.....	35
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
<b>6 SEZNAM LITERATURY.....</b>	<b>41</b>

---

# 1 Úvod

---

Zájem o měření toku vody a větru je v lidské historii věčný. Připomeňme si např. znalost směru a rychlosti větru u starověkých kormidelníků, nebo distribuci a rozdělování vody ve starověkých akvaduktech, případně zavlažovací systémy na řekách Eufrat a Tigris.

Dnes patří měření průtoku a výšky hladiny mezi nejčastější a zároveň nejobtížnější základní provozní měření, kde jakékoliv chyby, nejistoty či poruchy měřicího postupu přímo ovlivňují ekonomické parametry technologického procesu.

V průmyslových a laboratorních aplikacích dávají průtokoměry a měřiče výšky hladiny odpověď na základní otázku: „Kolik?“. Společně určují, kolik hrubého nezpracovaného materiálu je k dispozici a jak rychle se spotřebová. Průtokoměry a měřiče výšky hladiny poskytují informace o toku materiálu, jsou zdrojem podkladů pro bilance během technologického procesu, při příjmu i expedici, slouží jako čidla v regulačních obvodech a mají velký význam pro měření znečišťujících látek v oblasti péče o životní prostředí.

Nasazení průtokoměrů je v praxi velmi široké: od měření průtoku krve v lékařském průmyslu až po měření rychlosti proudění říčních toků. Důvodem existence tak velkého rozsahu použití průtokoměrů jsou velké rozmanitosti v chemických i fyzikálních vlastnostech průmyslových tekutin a v podmínkách i účelu měření [1, 2, 7].



---

## 2 Cíl práce a metodika

---

Cílem bakalářská práce bylo poskytnout čtenáři základní přehled o v technické praxi nepoužívanějších metodách a přístrojích, sloužících k měření průtoku a k měření výšky hladiny kapaliny.

Pro pochopení procesů probíhajících uvnitř těchto přístrojů se první část stručně věnuje základním pojmům a definicím, které souvisí s prouděním tekutin. Společnou kapitolou je pak shrnutí nejdůležitějších kritérií a předpokladů pro výběr vhodného senzoru. K popisovaným metodám měření průtoku a polohy hladiny jsou přiřazeny nejčastěji používané typy přístrojů s uvedením principu, konstrukčního řešení, předností, nedostatků a informacemi o možnostech použití v provozech.

Metodika práce vychází ze sběru informací z dostupné odborné literatury. Pro zachování aktuálnosti zpracovávaného tématu je silně využito zdrojů informací z odborných časopisů a internetových stránek firem zabývajících se vývojem a distribucí těchto zařízení.

---

## 3 Přehled metod používaných pro měření průtoku

---

Kapitola se zabývá rozborem metod používaných k měření průtoku tekutin. U metod jsou popsány nejčastěji používané typy průtokoměrů.

### 3.1 Základní pojmy a definice

Pro porozumění procesům, které probíhají uvnitř průtokoměrů se první část stručně věnuje základním pojmům a definicím souvisejícím s prouděním tekutin.

#### Tekutina

*Tekutina* je látka bez specifického tvaru, která se působením vnějších sil nevratně deformuje. Při pohybu (toku) má vždy tendenci sledovat obrysy nádoby. Tekutiny lze rozdělit na kapaliny a plyny. Vzájemně se odlišují stlačitelností a rozpínavostí. Plyny jsou rozpínavé, kdežto kapaliny vytvářejí volnou hladinu. Kapaliny jsou stlačitelné jen velmi málo, zatím co plyny jsou stlačitelné velmi dobře.

*Proudění* je definováno jako makroskopický pohyb tekutiny [1]:

- *jednorozměrné proudění* – částice tekutiny se pohybují ve stejném směru, přičemž rychlost v libovolném místě tekutiny je dána pouze velikostí této rychlosti,
- *rovinné proudění* – částice tekutiny se pohybují ve vzájemně rovnoběžných rovinných drahách. Vektor rychlosti určují složky v rovině proudění, přičemž ve směru kolmém k rovině proudění je složka rychlosti rovna nule,
- *prostorové proudění* – vektor rychlosti má obecnou podobu a k jeho definování je nutné znát tři složky rozložené do základních směrů.

#### Objemový průtok – hmotnostní průtok

Průtok je obecně definován jako podíl množství tekutiny protékající průtočným průřezem za jednotku času.

Výsledek měření průtoku může být tradičně udáván jako průtok objemový  $Q_V$  (např. v jednotkách  $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ ), nebo jako hmotnostní  $Q_m$  (např. v jednotkách  $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ ). Rozlišovány jsou tedy dva základní druhy průtoku:

- *objemový průtok* je definován jako objem tekutiny, který proteče daným místem (celým průřezem v jednom místě trubice) za jednotku času, kde  $\Delta V$  je elementární objem kapaliny a  $\Delta t$  je časový interval,

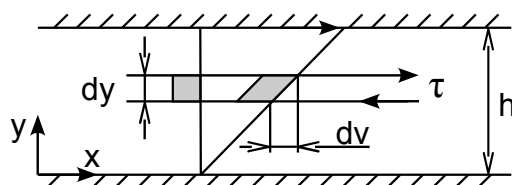
$$Q_V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} , \quad (1)$$

- *hmotnostní průtok* je definován jako hmotnost tekutiny, která proteče daným průřezem za jednotku času, kde  $\Delta m$  je elementární hmotnost protékající tekutiny a  $\rho$  je hustota protékající tekutiny [1, 2],

$$Q_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} . \quad (2)$$

### Viskozita tekutin

Viskozita je vlastnost skutečných tekutin, která se projevuje za jejich pohybu. Je příčinou odporu proti vzájemnému posunu částic tekutiny a vzniku tečného napětí  $\tau$  na rozhraní mezi tekutinou a stěnou.



Obr. 1: K pojmu viskozita tekutiny [5]

Jednoduchý příklad proudění tekutiny mezi dvěma deskami je znázorněn na obr. 1. Při laminárním proudění tekutiny mezi dvěma deskami platí vztah podle Newtona

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} , \quad (3)$$

kde  $\eta$  je *dynamická viskozita* tekutiny [Pa·s],

$dv/dy$  je *gradient rychlosti* ve směru kolmém na směr pohybu [s<sup>-1</sup>].

Vedle dynamické viskozity je zavedena také *kinematická viskozita* tekutiny, kterou lze definovat jako podíl dynamické viskozity tekutiny a hustoty tekutiny,

$$v = \frac{\eta}{\rho} , \quad (4)$$

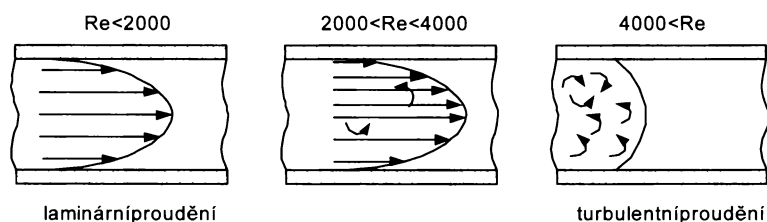
kde  $v$  je *kinematická viskozita* tekutiny [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>],

$\rho$  je *hustota* tekutiny [kg·m<sup>-3</sup>].

Zásadní význam viskozity při měření průtoku spočívá v tom, že společně s místní rychlostí, polohou v potrubí a drsností stěn určují profil rychlosti v potrubí [1, 5].

### Klasifikace proudění

Činnost průtokoměru je do značné míry ovlivněna druhem proudění tekutiny v potrubí. Pro povahu proudění je určující rozložení *třecích* (viskózních) a *setrvačných* sil v tekutině. Proudění potrubím může probíhat dvěma způsoby.



Obr. 2: Rychlostní profil pro různé druhy proudící tekutiny [1]

Při jednom, který označujeme *laminární* proudění (lat. „lamina“ = vrstva) převládá účinek třecích sil a jednotlivé myšlené vrstvy tekutiny po sobě v potrubí kloužou. Laminární proudění je daleko jednodušší než turbulentní. V technické praxi se projevuje především tam, kde se vyskytují malé průtočné průřezy, větší viskozita tekutiny a menší průtokové rychlosti.

Rychlost proudění je rozložena parabolicky s maximální rychlostí ležící v ose potrubí (obr. 2) a minimální rychlostí v místě dotyku hraničních vrstev s vnitřními stěnami potrubí. Vzniká tak tzv. *úplně vyvinutý rychlostní profil* ve tvaru rotačního osově symetrického paraboloidu [13].

Při proudění *turbulentním*, o větších rychlostech, naproti tomu nastává v potrubí výrazné víření (lat. „turbo“ = vír). Uplatňují se především účinky setrvačných sil. Doposud nebyla stanovena jednotná definice turbulentního proudění, v jednotlivých definicích se zpravidla zdůrazňují jen některé znaky. Za příčinu vzniku turbulentního proudění se považuje nestabilita laminárního proudění při vyšších Reynoldsových číslech.

Ke vzniku turbulentního proudění také dochází při míchání dvou nezávislých toků, např. v případě clony může míchání proudu hlavním otvorem s jiným proudem vstupujícím malým otvorem v cloně nebo v jejím blízkém okolí, vést ke vzniku turbulentního proudění. Tekutina se pohybuje při turbulentním proudění ve většině průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil je plochý [1, 5, 6].

## Reynoldsovo číslo

Výstupní hodnota průtokoměru silně závisí na bezrozměrné fyzikální jednotce, tzv. *Reynoldsově* čísle, udávající poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině.

Pro proudění tekutiny v kruhovém potrubí je Reynoldsovo číslo  $Re$  definováno [1]

$$Re = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad [-], \quad (5)$$

kde  $v$  je rychlost proudící tekutiny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$D$  je průměr potrubí [m],

$\eta$  je dynamická viskozita tekutiny [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ],

$\nu$  je kinematická viskozita tekutiny [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Kritické limitní stavy Reynoldsova čísla [12]

$Re < 2000$  laminární proudění,

$2000 < Re < 4000$  přechodná oblast mezi laminárním a turbolentním prouděním,

$Re > 4000$  turbolentní proudění.

Limitní hodnoty Reynoldsova čísla pro jednotlivé typy proudění nejsou v odborné literatuře zcela sjednoceny. Např. literatura [1] uvádí hodnoty  $Re < 2320$  pro laminární proudění a  $Re > 4000$  pro turbolentní proudění.

Na rozložení (profilu) rychlosti v potrubí mají značný vliv tzv. *hydrodynamické poruchy*, které vznikají díky odlišným vlastnostem ideálního a skutečného potrubí. Např. nerovnosti na vnitřních stěnách potrubí, nesprávná instalace a výběr materiálu potrubí.

## 3.2 Senzory průtoku tekutin

Rozdělení metod měření průtoku tekutiny s nejpoužívanějšími průtokoměry.

### 3.2.1 VÝBĚR SENZORU PRŮTOKU

Základem pro správný výběr průtokoměru je vždy pochopení požadavků konkrétní aplikace, včetně úplného poznání podstaty technologické tekutiny a podstaty celkové instalace senzoru. Při návrhu konstrukce průtokoměru se tak setkáváme s řadou protichůdných požadavků a problémů, které jsou přímo spojeny s charakteristikou měřené tekutiny, s rozsahem měření, s přesností senzoru a vyhodnocováním výsledků měření.

K nejvýznamnějším patří tyto vlivy:

- *druh pracovní činnosti* – spojitá, nespojitá; jednorázové, trvalá, laboratorní,
- *druh a charakteristika měřené tekutiny* – kapalina, pára, plyn; hodnoty teploty, tlaku, vodivosti, viskozity, hustoty; agresivita apod.,
- *charakteristika místa měření* – potrubí, otevřený kanál, jejich rozměry, přístupnost, náběhové délky atd.,
- *způsob zobrazení* – zobrazení nebo zápis hodnoty, místní nebo dálkový, analogový nebo digitální, tisk,
- a další: rušení senzoru, vyhodnocení měření, přesnost měření, možné opotřebení mechanických dílů a nestálost parametrů.

Výběr správného průtokoměru je nelehký úkol a proto výrobci k jeho usnadnění nabízí různé pomůcky ve formě tabulek, dotazníků; případně pro tento účel sestavují speciální programy či formuláře na internetových stránkách [1].

### 3.2.2 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU TEKUTIN

Senzory používané pro měření průtoku využívají celou řadu funkčních principů a je možné je rozlišovat podle mnoha různých hledisek, např. podle použité měřicí metody na tři základních skupiny. Na *metody objemové, rychlostní a hmotnostní*, které lze charakterizovat takto [2]:

- *objemové metody*:
  - měření objemu tekutiny v odměrných prostorách se známým objemem,
  - cyklické plnění a vyprazdňování těchto odměrných prostor,
  - měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů,
- *rychlostní metody*:
  - vhodnou technikou se měří rychlost proudícího média,
  - ze znalosti průtočného profilu a průřezu se vypočítává objemový průtok,
- *hmotnostní metody*:
  - měří se veličina, která je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku.

## 3.3 Objemové průtokoměry

Mezi průtokoměry založené na principu objemové metody lze zařadit např. průtokoměr s krouživým pístem, membránový a bubnový plynoměr, oválový průtokoměr, tělesový průtokoměr aj.

Objemové měření průtoku patří mezi absolutní metody s vysokou třídou přesnosti měření. Měřidla založená na tomto principu se proto používají pro přesná bilanční měření a jako etalony pro ověřování jiných měřidel průtoku.

Pro všechny objemové průtokoměry je charakteristické dělení toku tekutiny na dílčí objemy vytvářené rotujícími mechanickými prvky měřidla. Měření může být realizováno jako *spojité* nebo *nespojité (diskrétní)*.

Při spojitém měření se po určitý čas tekutina hromadí (akumuluje) a po jeho uplynutí je k dispozici údaj o měřeném objemu. Princip průtokoměru pracujícího v nespojitém režimu spočívá v dělení tekutiny na konečná objemová kvanta – dávky [1, 2, 7].

Mezi nejvíce rozšířené typy objemových průtokoměrů se řadí:

- oválový,
- tělesový,
- s krouživým pístem.

### 3.3.1 OVÁLOVÝ PRŮTOKOMĚR

Mezi značně rozšířený typ objemového měřidla patří *oválový průtokoměr*.

Konstrukce je složena ze dvou velmi přesných ozubených oválových těles, které se otáčejí ve válcových komorách.

Na *obr. 3* vlevo jsou ozubená kola zachycena v okamžiku, kdy se delší osa horního tělesa nachází ve vertikální poloze, osa spodního tělesa je v horizontální poloze. Oválová tělesa rotují v opačném směru a při pohybu zachycují do měsíčkovitých prostorů mezi tělesy a stěnou skříně protékající tekutinu. Čítač pak zaznamenává počet otáček jednoho z oválových těles jako veličinu úměrnou objemovému průtoku. Obdobný princip využívá i tělesový průtokoměr.

Dodržením rozměrů oválových těles, zamezením ztrát mezi oválovými tělesy a skříní, může být dosaženo i velmi malých nejistot měření (menších než 1 %).

Tento typ průtokoměru nachází uplatnění v petrochemickém<sup>1</sup> průmyslu – benzín, kapalné plyny, louhy, kyseliny, alkoholy, lepidla, mazací oleje i v potravinářském průmyslu – jedlé oleje, vína, alkoholické nápoje apod. Průchodnost průtokoměru je ovlivněna mazacími vlastnostmi technologické tekutiny. U tekutin, které nemají dostatečné mazací

---

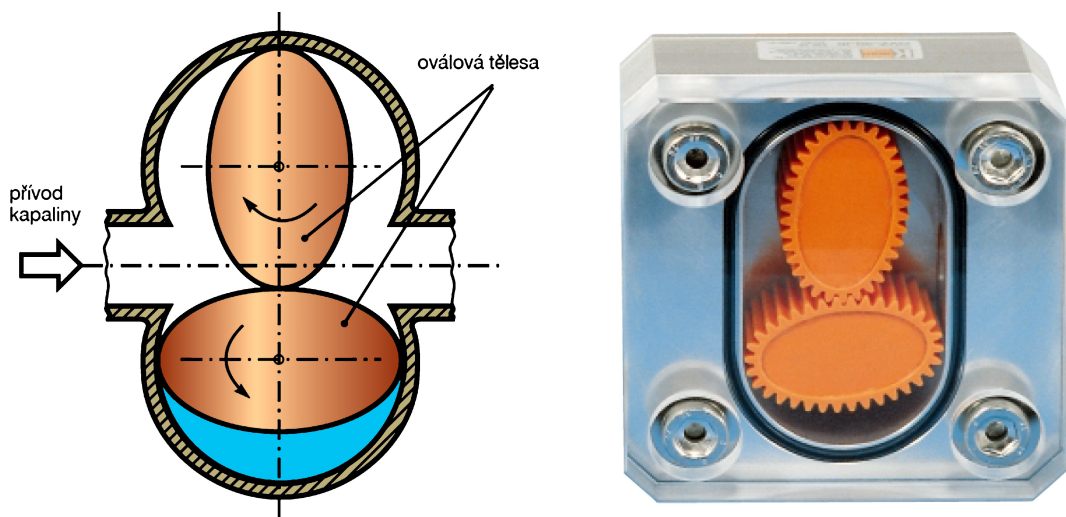
1 Petrochemický průmysl je odvětví průmyslu, které se zabývá zpracováním ropy.

schopnosti, je vhodné snížit maximální rychlost otáčení oválových těles, aby se snížilo jejich opotřebení.

Jsou vhodné také pro měření průtoku tekutin s velkou viskozitou, kde však může docházet k usazování kapaliny na zubech. Z toho důvodu se zuby upravují výřezy, dovolujícími průtok velmi viskózních látek. Nevýhodou jsou rázy ve výstupním potrubí způsobené kolísáním průtoku.

Oválový průtokoměr se používá v průtocích od jednotek  $\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  do  $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , při tlaku až 2 MPa a teplotě až 300 °C.

Na trhu jsou k dispozici také oválové průtokoměry s tělesy s *hladkým povrchem*, tj. bez ozubení. Kapalina v tomto provedení neprochází středem průtokoměru, ale je vytlačována při pohybu těles mezerami u stěn komory. Rovněž na rozdíl od ozubených oválových těles nedochází k ulpívání viskózní kapaliny na hladkých oválových kolech [1, 2, 7, 13].



Obr. 3: Vlevo schéma oválového průtokoměru [2]; vpravo ukázka provedení – průtokoměr Kobold OVZ



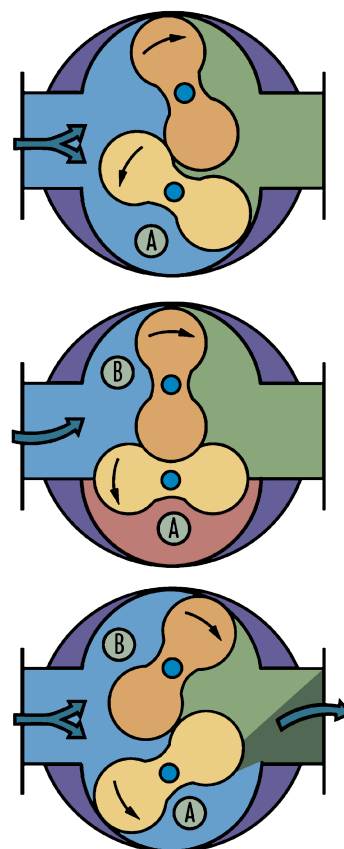
### 3.3.2 TĚLESOVÝ PRŮTOKOMĚR

*Tělesový průtokoměr*, je levnější variantou k průtokoměru s ozubenými oválovými tělesy.

Vyrábí se ve velkém rozsahu konstrukčních materiálů, od termoplastů až po kovy s velkou odolností proti korozi a agresivním tekutinám.

Rotací těles proti sobě je do volných prostorů skříně zachytáván vždy stejný daný objem tekutiny, který je následně vytlačován ven. Obě tělesa konají vázaný pohyb, proto stačí zaznamenávat otáčení pouze jednoho z nich. K tomu se používá buď propojení pomocí převodovky s registračním zařízením, případně počítadlem, nebo je těleso magneticky spojeno s vysílačem impulzů.

Při velkém průtoku poskytují dobrou opakovatelnost měření, lepší než 0,015 % z měřeného údaje a mohou být navrženy pro práci při velkých tlacích (až 15 MPa a teplotách (až 200 °C). Jsou vhodné pro velké objemové průtoky. Mezi hlavní nevýhody tělesových průtokoměrů patří velká ztráta přesnosti při měření malých průtoků a také skutečnost, že maximální průtok, který lze měřit je menší, než průtok u stejně velkého měřiče s *kývným kotoučem* nebo s *oscilujícím oběžným kolem* [1, 2, 7].



Obr. 4: Princip tělesového průtokoměru [7]

### 3.3.3 PRŮTOKOMĚR S KROUŽIVÝM PÍSTEM

Průtokoměr se vyzníá důvtipným a jednoduchým principem činnosti, do jisté míry podobným Wankelovu<sup>2</sup> motoru. Jeho vývoj se přisuzuje firmě Siemens.

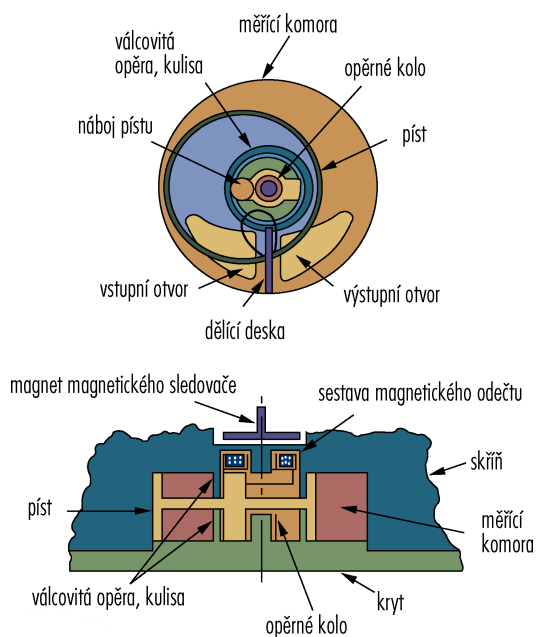
Válcovitý tvar měřicí komory (*obr. 5*) je přepážkou rozdělen na vstupní a výstupní otvor. Píst je po obvodu opatřen množstvím otvorů, které umožňují průtok tekutiny bočními stěnami pístu. Jeho pohyb v měřicí komoře je kývavě-krouživý, vedený opěrným kolem. Poloha pístu je magneticky snímána sledovačem na vnější straně komory. Tento signál je dále zpracováván do požadované formy. Kinematika činnosti průtokoměru je detailně popsána např. v [1].

2 Wankelův motor je spalovací motor s rotačním pístem založený na principu rozpínání plynů.

Průtokoměr je mimořádně citlivý na přesnost výroby dílů. Přesné opracování dotýkajících se ploch a malé tolerance rozměrů vyžadují náročnou a nákladnou technologii výroby a zvyšují tak výrobní cenu.

Za jeden cyklus projde průtokoměrem objem kapaliny rovnající se objemu měřicí komory, zmenšený o objem pístu.

Průtokoměry mohou pracovat při tlacích mezi 1 až 15 MPa a dosahovat průměru až do 75 mm. Používá se jich u domácích vodoměrů, v potravinářském, chemické a farmaceutickém průmyslu a obecně pro měření malých průtoků. Při zahřívání měřicí komory lze využít průtokoměr také pro měření průtoku viskózních tekutin, např. nafty, tuků, barev a lepidel, kde se nejistota měření pohybuje do  $\pm 2\%$  z měřeného údaje. Měřičem může protékat tekutina s určitým omezeným množstvím nečistot, jako jsou například usazeniny na stěně trubky, nebo jemný písek. Nesmí ale obsahovat větší nebo abrasivní částice [1, 2, 7].



Obr. 5: vlevo schéma prstencového průtokoměru [7];  
vpravo ukázka provedení – prstencový průtokoměr Badger Meter OP 15

### 3.4 Rychlostní průtokoměry

Mezi průtokoměry založené na principech rychlostní metody lze řadit průřezové průtokoměry, rotametry, Pittotovy a Prandtlovy trubice, laminární průtokoměry, kolenové průtokoměry, ultrazvukové průtokoměry aj.

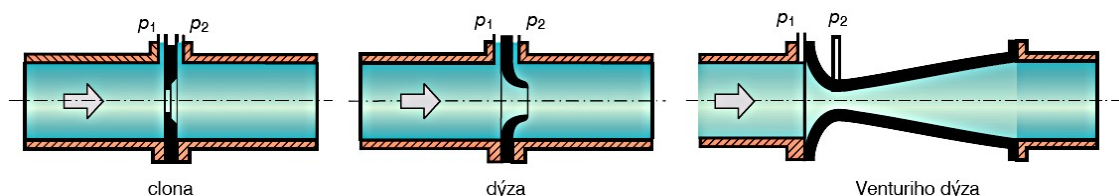
*Rychlostní průtokoměry* vyhodnocují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti proudění a ze znalosti profilu proudění a průtočného průřezu. Informaci o rychlosti proudění lze získat z dynamického tlaku, který může být určen jako rozdíl statických tlaků před a za škrticím orgánem (*průřezová měřidla*) nebo z rozdílu celkového a statického tlaku (*rychlostní sondy – Pitotova a Prandtlova trubice*). Ke zjišťování statického tlaku se běžně používá senzorů tlaku (manometrů) [1, 2].

#### 3.4.1 PRŮŘEZOVÉ PRŮTOKOMĚRY

Měření průtoku škrticími orgány patří mezi nejčastěji využívané, především díky jednoduchosti, nízké ceně, použitelnosti ve velmi širokém rozmezí teplot, tlaků a mnoha letům praktických zkušeností. Oproti ostatním typům měřidel, mají průřezová měřidla mnoho výhod. Neobsahují pohyblivé části a příliš nepodléhají opotřebení. S tím také souvisí malé nároky na údržbu. Postupně jsou však nahrazovány průtokoměry vírovými a ultrazvukovými.

Princip měření využívá zachování energie v proudící tekutině definovaný *Bernoulliho* rovnicí. V uzavřené trubici je umístěn škrticí orgán (*obr. 6*), zmenšující průtočný průřez. Při průtoku tekutiny tak v tomto místě dochází ke změnám rychlosti proudění a tlaku. Tekutina se značně urychluje a energie pro toto zrychlení se získává poklesem statického tlaku v místě se zmenšeným průtočným průřezem.

Rozdíl statických tlaků před zúžením ( $p_1$ ) a za zúžením ( $p_2$ ), snímaný rozdílovým tlakoměrem, je závislý na hodnotě průtoku [1, 2, 13].



Obr. 6: Základní škrticí orgány [2]

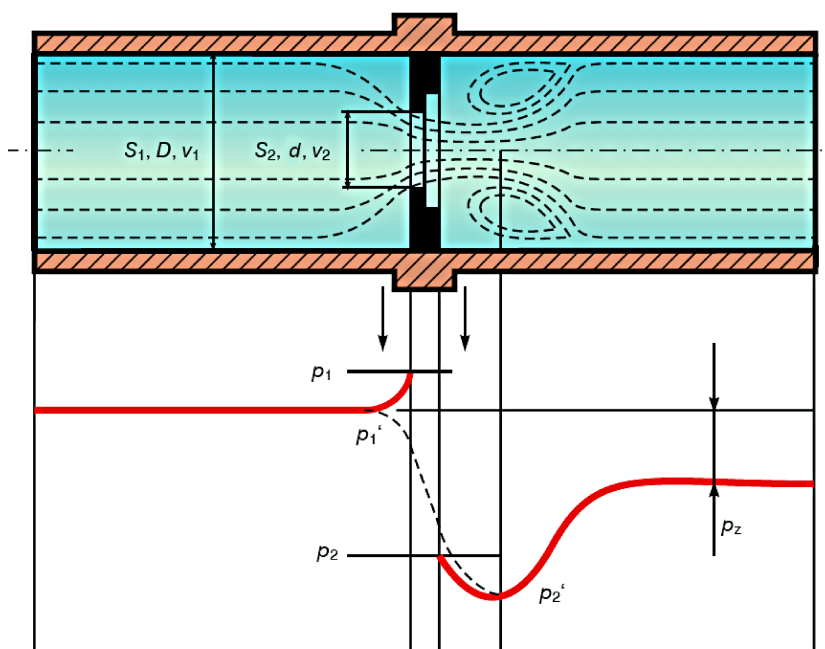
Škrticí orgány lze rozdělit do dvou základních skupin:

- *základní škrticí orgány* s matematicky zvládnutými výpočtovými podklady, lze řešit pouze početně, bez nutnosti kalibrace. Mezi nejrozšířenější patří koncentrická kruhová clona, dýza a Venturiho dýza,
- *speciální škrticí orgány*, které nelze řešit výpočtem, nutnost kalibrace. Patří mezi ně čtvercová, obdélníková a segmentová clona; čtyřhranná Venturiho dýza a škrticí orgán ve tvaru klínu [2].

### Koncentrická kruhová clona

Clona má tvar ploché kovové desky s kruhovým otvorem se středem v ose potrubí, která se vkládá do potrubí mezi příruby. Vyrábí se z antikorozičního materiálu, hrany otvorů jsou čisté a ostré. Místo dotyku otvoru clony s tekutinou by za ideální situace mělo být „čárové“, tj. ve tvaru kružnice, aby se co nejvíce zmenšila plocha dotyku s tekutinou (tření).

Clony jsou náchylné na opotřebení, především na otupení hran korozí. Nevyhovující je deformace clony a přítomnost usazenin maziv. Při standardních pracovních podmínkách dosahuje clona celkové přesnosti do 5 % z měřené hodnoty. Používají se pro měření většiny čistých tekutin. Pro měření vícefázových tekutin je nutné zajistit vertikální orientaci potrubí.



Obr. 7: Průběh proudnic a tlaků na cloně ( $v_1, v_2$  – rychlost proudění v průřezu  $S_1$ , popř.  $S_2$ ;  $p_1, p_2$  – statický tlak před zúžením, popř. v místě zúžení;  $p_1'$  a  $p_2'$  značí totéž v ose potrubí,  $p_z$  – tlaková ztráta na škrticím orgánu [2])

Průběh tlaků na cloně je zobrazen na *obr. 7*, v dolní části. Čárkovaná čára označuje průběh tlaku v ose potrubí, plná čára pak u stěny potrubí. Rozdíl tlaků  $(p_1) - (p_2)$  je snímán diferenciálním (rozdílovým) tlakoměrem.

Odvození následujících vzorců je založeno na Bernoulliho rovnici a rovnici kontinuity toku. Význam parametrů je evidentní z *obr. 7*.

Pro nestlačitelné kapaliny platí rovnice kontinuity [2, 13]

$$Q_V = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 , \quad (6)$$

kde

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} , \quad S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} . \quad (7)$$

Pro horizontální potrubí je hydrostatický tlak nulový, Bernoulliho rovnice má tvar

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} . \quad (8)$$

Z rovnice (6) se vyjádří  $v_1$  a dosadí do rovnice (8), pak pro objemový průtok  $Q_V$  platí

$$Q_V = S_2 \cdot v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho}} . \quad (9)$$

Výsledný vzorec pro výpočet objemového průtoku má tvar

$$Q_V = \frac{C \cdot \varepsilon \cdot S_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}} , \quad (10)$$

kde  $C$  je součinitel průtoku, který je závislý na Reynoldsově čísle a na poměru průměrů  $\beta$  ( $\beta = d/D$ ),

$\varepsilon$  je expanzní součinitel, který je závislý na expanzi a změně hustoty média, protéká-li škrticím orgánem plyn nebo pára.

## Dýza

Měřicí dýza je nátrubek upevněný mezi dvě příruby, jehož vtoková hrana je zaoblena a výtoková strana je ostrá. Jedná se o kompromis mezi clonou a Venturiho dýzou. Dýzy jsou méně finančně nákladné než Venturiho dýzy, ale také méně přesné.

Hlavní nevýhodou dýzy oproti cloně je, že se dýza vyměňuje, pokud ji nelze vyjmout současně s celou potrubní sekci, obtížněji. Při kalibracích a přesných aplikacích se často využívá efektu, kdy dosáhne-li plyn v hrdle dýzy rychlosti zvuku, při dalším zvyšování tlaku již jeho rychlost dále nestoupá. Nejistota měření dýzou se pohybuje do 1 %, kalibrací je možné dosáhnout nejistoty pouze 0,25 % z měřené hodnoty.

Používají se zejména pro vysoké teploty (přehřátá pára) a pro vysoké rychlosti proudění. Nedoporučují se pro měření znečištěných kapalin a kalů. Lze je instalovat v potrubí v libovolné pozici.

## Venturiho dýza

Venturiho dýza má tvar nátrubku, jehož vtoková strana je zaoblena a výtoková strana se kuželovitě rozšiřuje až na původní průměr. Odběr tlaků je umístěn, na rozdíl od koncentrické clony a dýzy, v místě největšího zúžení. Tvar Venturiho dýzy snižuje vnik víření, má proto nejmenší provozní náklady.

Venturiho dýzy nachází uplatnění pro měření čistých, nekorodujících plynů a kapalin. Konstrukce není náchylná ke většímu nanášení usazenin. Nejčastěji je využívána v průmyslu (energetickém, teplárenském a petrochemickém). Nevýhodou je vyšší pořizovací cena, daná náročností výroby [1, 2, 13].

### 3.4.2 ROTAMETRY

Patří do skupiny průtokoměrů s proměnným průřezem. Jsou to jednoduchá univerzální zařízení, která pracují na principu konstantní tlakové diference na průtokoměru, přičemž změna rychlosti proudění vyvolává změnu polohy rotačního tělíska (*obr. 8*).

*Rotametr* je složen z vertikálně umístěné mírně kuželovité trubice, která se směrem nahoru rozšiřuje a rotačního tělíska (plováčku) nebo u nových typů kuličky, které se v trubici působením proudící tekutiny vznášejí. Pokud tekutina neproudí, je tělísko v trubici dole, jakmile začne tekutina proudit, začne se zvedat.

Horní okraj tělíska je opatřen šikmými zářezy, které účinkem proudění uvedou tělísko do rotačního pohybu, čímž se stabilizuje jeho poloha. Aktuální poloha, ve které se tě-

lísko nachází podává přímou vizuální indikaci o hodnotě průtoku, nebo může být poloha snímána snímat elektricky, případně mechanicky.

Při konstantní průtoku tělísko setrvává v trubici v určité poloze, dokud nedojde ke změně průtoku. V tomto stavu nastává rovnováha všech sil (*obr. 8*) na tělísko působících a pro těžiště tělíska T platí [3]

$$F_G = F_V + F_p + F_t, \quad (11)$$

kde  $F_G$  je gravitační síla působící směrem dolů,

$F_V$  je vztlaková síla nadnášející tělísko,

$F_M$  je síla proudící tekutiny, skládající se z tlakové síly  $F_p$  a třecí síly  $F_t$ .

Při turbulentním proudění lze třecí sílu  $F_t$  zanedbat. Dosazením za  $F_G$ ,  $F_V$ ,  $F_p$  a úpravě rovnice se tlakový spád  $\Delta p$  na tělísku rovná

$$\Delta p = V_T \cdot g \frac{(\rho_T - \rho)}{s}, \quad (12)$$

kde  $V_T$ ,  $\rho$  je objem tělíska, resp. hustota tělíska,

$s$  je plocha největšího příčného průřezu tělíska,

$g$  je tíhové zrychlení.

Jelikož členy na pravé straně rovnice (12) jsou konstantní, na tělísko působí konstantní tlakový spád  $\Delta p$ .

Průtočný průřez je mezikružím o ploše  $P = S - s$ , kde

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad s = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (13)$$

Plocha mezikružím je funkcí polohy  $h$  rotačního tělíska. Pro lineární stupnici průtoku by měla mít trubice tvar rotačního paraboloidu. Při menší přesnosti lze použít i trubici ve tvaru kužele.

Dosazením tlakového spádu  $\Delta p$  z rovnice (12) do analogické rovnice, která byla odvozena pro průřezová měřidla, dostane průtoková rovnice rotametru tvar

$$Q_V = C_r (S - s) = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_T}{s \cdot \rho} \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)}, \quad (14)$$

kde  $C_r$  je průtokový součinitel, je funkcí tvaru tělíska a hodnoty Reynoldsova čísla, závisí na viskozitě tekutiny.

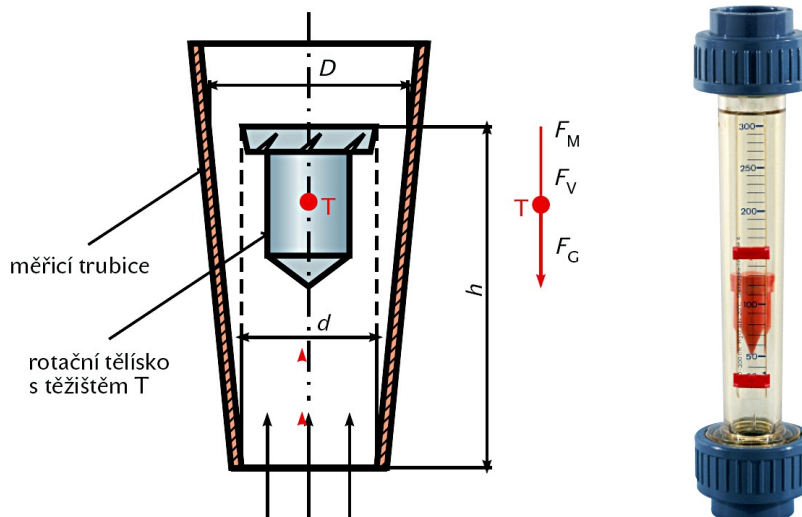
Kromě popsaného konstrukčního provedení rotometru – kuželovitá trubice a rotující tělísko – existují i další varianty provedení. Např. válcová trubice a kuželový trn, píst pohybující se v perforovaném válci, vychylovaná klapka. Další varianty lze nalézt v literatuře [1, 13].

Identickým znakem rotačních tělísek je ostrá hrana (mimo tělíska ve tvaru kuličky), sloužící k odečítání polohy v trubici. Tvary rotačních tělísek se mohou různit podle aplikace použití, např. pro kompenzaci účinků viskozity kapaliny, velký rozsah průtoků aj. Vyrábí ze skla, korozivzdorných materiálů, případně umělých hmot.

Rotometry s kovovými trubicemi lze použít k měření agresivních látek, kyselin a roztažených kovů. Rotometry s trubicemi z umělých materiálů jsou doporučovány pro měření vzduchu, deionizované vody a korozivních látek.

Průměry trubic dosahují až 100 mm, tlaky do 50 MPa a teploty až 540 °C. Měřitelný objemový průtok u kapalin dosahuje hodnoty  $75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , u plynů až  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  při statickém tlaku do 5 MPa.

K výhodám rotometrů patří měřicí rozsah (až 10 : 1). Mezi nevýhody lze zařadit, kvůli požadavku vertikální instalace u větších typů, nároky na montážní prostor [1, 3, 7].



Obr. 8: vlevo princip rotometru s kónickou trubicí [3];  
vpravo ukázka provedení – rotometr firmy Kobold



### 3.5 Hmotnostní průtokoměry

Měření hmotnostního průtoku patří mezi základní postupy pro dosažení předepsaného složení látek, určení materiálových bilancí a pro závazné měření při předávání/přejímání přepravovaných tekutin. Ve výrobním procesu patří tato měření mezi nejdůležitější, proto je spolehlivost a přesnost měření hmotnostního průtoku velmi důležitá.

Průtokoměry pro měření hmotnostního průtoku lze rozdělit na dvě základní skupiny:

- průtokoměry na principu *Coriolisova* zrychlení,
- tepelné průtokoměry, využívající při měření průtoku vliv proudění tekutiny na šíření tepla.

Coriolisovy průtokoměry patří mezi nejpopulárnější a nejúspěšnější hmotnostní průtokoměry. Rychle rozšířily do mnoha oblastí provozního měření a uplatňují se i v laboratorních podmínkách při měření malých průtoků [1, 4].

#### 3.5.1 CORIOLISOVY PRŮTOKOMĚRY

Využití Coriolisova jevu k měření průtoku je datováno do druhé poloviny dvacátého století, kdy *J. Smith* ze společnosti *Micro Motion* sestavil první komerčně použitelný hmotnostní Coriolisův průtokoměr.

##### **Coriolisova síla**

– byla pojmenována po francouzském inženýrovi *G. G. Coriolisovi*, který jako první pozoroval, že tělesa pohybující se po zemském povrchu se důsledkem rotace Země stáčí na stranu. Na severní polokouli jsou od původního směru vychylovány doprava, na jižní doleva. Nejvíce se Coriolisova síla projevuje na zemském pólu, na rovníku je její účinek nulový. Způsobuje např. stáčení proudění severních a jižních větrů, jednostranné opotřebovávání železničních kolejnic, ovlivňuje trajektorii letu vystřeleného náboje [8].

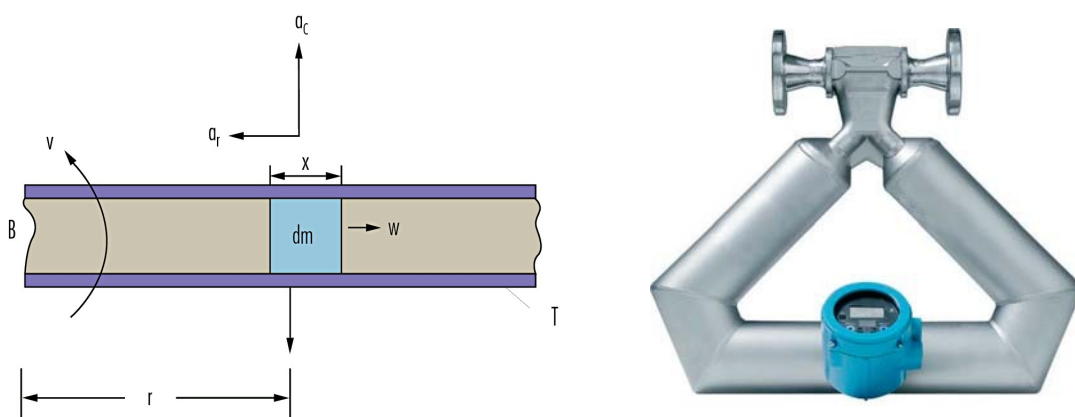
##### **Princip činnosti**

Průtokoměry pracují na principu působení Coriolisovy síly, vyvolané mechanickým uvedením trubice do rotace, na protékající tekutinu.

Tato síla, působící na každý prvek tekutiny, závisí na velikosti hmotnostního průtoku tekutiny. Proudící tekutina v rotující trubici vyvolává svojí setrvačností sílu, která má směr kolmý na směr proudění a touto silou na trubici působí.

Na obr. 9 je zobrazena, kolem stacionárního bodu (B), rotující trubice (T). Element hmotnosti  $dm$  proudící rychlostí  $w$  se nachází ve vzdálenosti rovnající se poloměru rotace  $r$  od (B).

Na pohybující se element hmotnosti  $dm$  o úhlové rychlosti  $v$ , působí zrychlení skládající se ze dvou složek. Dostředivé zrychlení  $a_r$ , působící do středu rotace (B) a Coriolisovo zrychlení  $a_c$ , směřující kolmo na dostředivé zrychlení [7].



Obr. 9: vlevo princip Coriolisova průtokoměru [7];  
vpravo ukázka provedení – Coriolisův průtokoměr Micro Motion Elite

Pro dostředivé zrychlení platí

$$a_r = v^2 \cdot r \quad (15)$$

pro Coriolisovo zrychlení platí

$$a_c = v^2 \cdot r \quad (16)$$

Pro urychlení hmotnostního elementu tekutiny  $dm$  Coriolisovým zrychlením  $a_c$ , musí rotující trubice vyvinout sílu rovnající se součinu  $dm \cdot a_c$ . Na trubici tak působí hmotnostní element tekutiny stejně velkou silou opačné orientace

$$F_c = dm \cdot a_c = 2 \cdot dm \cdot v \cdot w \quad (17)$$

Ve vzdálenosti  $x$  působí proudící tekutina o hustotě  $\rho$ , tekoucí konstantní rychlostí průřezem  $S$ , na trubici Coriolisovou silou o velikosti

$$F_c = 2 \cdot v \cdot w \cdot \rho \cdot S \cdot x \quad (18)$$

Hmotnostní průtok má velikost

$$Q_m = \rho \cdot w \cdot S \quad (19)$$

Po dosažení  $Q_m$  z rovnice (19) do rovnice (18) dostaneme vztah pro Coriolisovu sílu

$$F_c = 2 \cdot v \cdot Q_m \cdot x \quad (20)$$

Výsledný vztah pro hmotnostní průtok Coriolisovým průtokoměrem má tvar [7]

$$Q_m = \frac{F_c}{2 \cdot v \cdot x} \quad (21)$$

### Měřicí trubice

Pro komerční použití byla rotující trubice nahrazena vibrující nebo kmitající trubicí. Ta je ve většině případů ukotvena ve dvou bodech a je vertikálně rozkmitávána působením elektromagnetu. Budicí kmitočet je obvykle volen jako rezonanční kmitočet trubice, protože při něm je pro udržení zaplněné trubice v ustáleném kmitavém pohybu zapotřebí nejmenší budicí síla. Materiál trubice se nejčastěji vyrábí z korozi-vzdorné oceli, tantalu nebo titanové nebo zirkoniové slitiny. Trubice mohou mít různé tvary a uspořádání. Tvar trubice má vliv na vlastnosti průtokoměru. Původně se nejčastěji používaly trubice tvaru U. Současné průtokoměry využívají i jiné typy zakřivených nebo i přímých trubic. Přehled typických schematicky znázorněných tvarů měřicích trubic lze nalézt např. v [1].

### Řidicí a vyhodnocovací obvody

Elektroniku průtokoměru obsahuje obvody pro buzení a vyhodnocování kmitů měřicí trubice. Zpracování signálů zajišťuje technologie MVD (*Multi Variable Digital*). Analogový signál se převádí do digitální podoby a výpočty probíhají v obvodech, které jsou přímo součástí senzoru. Komunikace je zajištěna pomocí protokolů HART, Profibus aj. Vybrané typy mohou být vybaveny diagnostikou správné funkce.

### Použití průtokoměrů

Uplatnění Coriolisových průtokoměrů lze pozorovat v chemickém, petrochemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu a v dalších odvětvích. Dokáží vyhodnocovat kontinuálně množství, objemový a hmotnostní průtok, hustotu, koncentraci a teplotu nejrůznějších látek. Jsou vhodné pro měření od čistých plynů a kapalin až po suspenze a kaly, včetně velmi viskózních kapalin. Výstupní signál přímo odpovídá hmotnostnímu průtoku a není ovlivněn změnami vlastností proudící tekutiny, jako je hustota, viskozita, tlak a teplota. Vyrábí se pro potrubí od světlosti 2,5 mm do 100 mm. Provozní přístroje měří do rozsahu až  $400 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . U kapalin se dosahuje přesnosti až 0,1 %, u plynů 0,2 % z měřené hodnoty. Provozní rozsah teplot senzoru je od  $-240 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  při přetlaku měřené tekutiny až 30 MPa [1, 4, 7,8].

**Tabulka 1: Základní vlastnosti vybraných průtokoměrů [2]**

Metoda	Typ průtokoměru	Specifikace senzoru	Princip měření	Výstup	Tlaková ztráta	Přesnost	Rozsah průtoků [m <sup>3</sup> /h]	Poměr Q <sub>max</sub> /Q <sub>min</sub>	Použití
objemová	objemová měřidla	se spojitou funkcí (oválový průtokoměr)	cyklické plnění a vyprazdňování odměrných nádob	lineární	střední až velká	0,1–2	10 <sup>3</sup> –10 <sup>3</sup>	100:1 až 200:1	měřidla protoklého množství a bilanční měřidla
rychlostní	průtokoměry s měřením rozdílu tlaků	průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho dýza)	měření rozdílu statických tlaků před a za zúžením průřezu	odmocnina	střední až velká	0,5–0,2	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>3</sup>	4:1 až 8:1	nyňi na ústupu ve prospěch průtokoměrů výro- vých a ultrazvukových
	rotametry (plovákové průtokoměry)	—	se změnou průtoku se mění průtočný průřez při stálé tlakové změně	přibližně lineární	střední	0,5–5	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>3</sup>	10:1	laboratorní i provozní měření; měřicí trubice musí být svislá
hmotnostní	Coriolisovy průtokoměry	se zakřivenou trubici	využití Coriolisovy síly při pohybu tekutiny v rotující soustavě	lineární	střední	0,1–0,5	1–10 <sup>3</sup>	50:1 až 500:1	nezávislé na změnách teploty, tlaku, viskozity, hustoty média

---

## 4 Přehled metod používaných pro měření výšky hladiny kapaliny

---

Důvodem zjišťování výšky (polohy) hladiny bývá optimalizace využití, zabránění proti přetečení, popř. určení množství produktu v zásobnících a nádobách, jako jsou různé tanky, zásobní a provozní nádrže apod.

V praxi se většinou nejedná o zjišťování výšky hladiny, ale o objem materiálu v nádrži uskladněný. Pokud však nádrž nemá tvar vertikálního válce se stejným půdorysem, objem uskladněné látky není lineární funkcí měřené výšky hladiny. Je nutné provést přepočet, případně kalibraci. Např. u palivových nádrží automobilů, kde je jejich tvar určen designem karoserie, nebo u letadel [1, 10].

### 4.1 Výběr senzoru výšky hladiny

Při volbě vhodného senzoru výšky hladiny je třeba zvážit mnoho okolností a faktorů, mezi které mimo jiné patří:

- obecné fyzikální a chemické vlastnosti měřené kapaliny (teplota, tlak, viskozita, vodivost, hustota apod.)
- charakteristika okolního prostředí (nebezpečí ohně, výbuchu, jiskření apod.),
- požadovaná přesnost, spolehlivost a rozsah měření,
- nebezpečí pro samotný hladinový senzor (agresivní, korozivní materiály),
- umístění senzoru (uvnitř nebo vně nádoby),
- prostorové nároky při montáži senzoru,
- požadavek na spojitě měření výšky hladiny, nebo postačuje bodový odečet,
- charakter výstupního signálu,
- možnost jednoduché opravy při poruše senzoru, dostupnost náhradních dílů,
- náklady na pořízení a na samotný provoz měřicího zařízení.

Existence velkého množství metod měření výšky hladiny je dána širokou škálou vlastností měřeného média. Kapaliny, suspenze, příp. sypké materiály, jejichž výška se v průmyslu měří, se mohou značně odlišovat: čistá voda; hořlavé, viskózní, lepkavé, abrazivní, korozivní či agresivní kapaliny; suspenze s abrazivními účinky.

## **Přesnost senzoru**

Výrobce senzoru obvykle specifikuje jeho přesnost odvozeným způsobem a zaručuje ji pouze v laboratorních podmínkách. tlakové senzory jsou většinou kalibrovány pomocí tlaku vzduchu, u radarových a ultrazvukových senzorů se používá měření „proti zdi“. Nasazení senzoru v praktickém provozu tak může způsobit podstatné zhoršení přesnosti v důsledku jeho rušení okolními vlivy, např. změny hustoty měřeného média u tlakových senzorů [1, 7, 11].

Mezi v praxi nejrozšířenější typy senzorů výšky hladiny se řadí:

- mechanické hladinoměry,
  - jednoduché indikátory hladiny,
    - tyčové měřidlo,
    - průhledítka a stavoznaky,
  - plovákové hladinoměry,
    - plovákové hladinové spínače,
- hydrostatické hladinoměry,
  - měření hydrostatického tlaku v atmosférických (otevřených) nádobách,
    - ponorné sondy a statické sondy,
  - měření hydrostatického tlaku v tlakových (uzavřených) nádobách,
    - připojení s oddělovací membránou

## **4.2 Jednoduché indikátory hladiny**

Mezi jednoduché hladinoměry patří tyčové měřidlo, různé druhy průhledítek a stavoznaků.

### **Tyčové měřidlo**

Historicky snad nejstarší nástroj na měření výšky hladiny je tyčové měřidlo. Používá se i dnes, především pro orientační měření. Např. měrné stupnice na březích řek pro odečítání výšky hladiny, pro sledování povodňového ohrožení apod.

Tyčové měřidlo může být z měřeného média vyjmuto a pak se zkoumá délka smočenné části. Jedná se o velmi jednoduchý způsob, avšak jde dost možná o nejrozšířenější měřidlo hladiny na světě.

## Průhledítka a stavoznaky

Jedná se o skleněný průzor ve stěně nádoby, který se používá pro vizuální sledování polohy hladiny zejména v malých kotlích a nádržích. Průzor má z konstrukčních důvodů omezenou velikost, proto je nutné pro pokrytí celého požadovaného rozsahu měření na stěnu nádoby aplikovat stavoznaků několik nad sebou.

Nevýhodou je zanášení průzorů nečistotami, jako je rez a jiné úsady. Průzory lze použít i pro velké tlaky až do 10 MPa. Předností těchto měřidel je jednoduchost, nevýhodou skutečnost, že neposkytují vhodný signál pro přenos a další zpracování naměřených údajů [1].

## 4.3 Mechanické hladinoměry

Hladinoměry s pohyblivými mechanickými díly představují doposud široce používanou technologii. Postupně roste snaha o jejich náhradu bezkontaktními metodami.

### 4.3.1 PLOVÁKOVÉ HLADINOMĚRY

Pro všechny druhy těchto hladinoměrů je typické využití plovákového tělesa vznášejícího se na rozhraní kapaliny a plynu. Plovák musí dokázat vyvinout dostatečný vztlak, aby se nepotopil pod hladinu. Jeho hustota musí být nižší než hustota kapaliny. Obvykle bývá vyroben v podobě lehkého kulového (někdy též válcového) dutého tělesa nebo tělesa vyrobeného z materiálu o velmi malé hustotě (pěnový polystyrén).

Tvar plováku by měl mít minimální množství rovinných ploch na kterých se mohou držet zbytky kapaliny, nebo se mohou tvořit usazeniny zvyšující jeho hmotnost a tím i hloubku ponoření [1, 7, 10].

Síla, kterou plovák vyvine, odpovídá dle Archimédova zákona hmotnosti kapaliny vytlačené větším ponořením tělesa [1]

$$F = S \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g , \quad (22)$$

kde  $F$  je plovákem vyvozená síla,

$S$  je horizontální průřez plováku,

$\Delta h$  je změna ponoření plováku,

$\rho$  je hustota kapaliny,

$g$  je tíhové zrychlení.

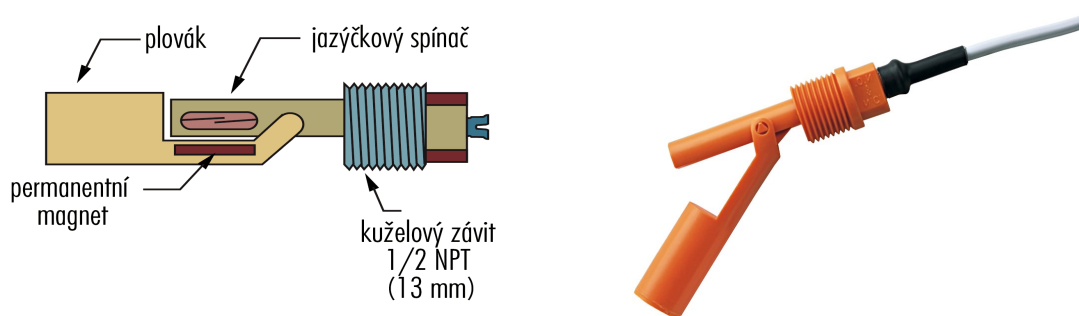
## Plovákové hladinové spínače

Mezi nejrozšířenější plovákové hladinové spínače patří magneticky ovládané *jazyčkové spínače* (obr. 10).

V těle plováku je zabudovaný permanentní magnet, který se při stoupnutí hladiny přiblíží k jazyčkovému spínači. Kontakty jazyčkového relé jsou vyrobeny z magneticky měkkého materiálu. V magnetickém poli permanentního magnetu jsou opačně zmagnetovány a vzájemně se přitahují, takže dojde k jejich sepnutí. Při poklesu hladiny, v nepřítomnosti magnetického pole, postačuje k jejich rozpojení síla vyvinutá pružností samotných kontaktů.

Kontakty spínače jsou uloženy v ochranné atmosféře inertního plynu. Je-li plovákový spínač umístěn do stejnosměrné proudové smyčky, je vhodné, pro zajištění požadované velmi malé rezistance sepnutých kontaktů, použít jazyčkový spínač s pozlacenými kontakty. Překročením maximálního spínaného proudu může „spečením“ kontaktů dojít ke znehodnocení spínače. Spínací kapacita je specifikována pro čistě odporovou zátěž. V praktické aplikaci není tento požadavek vždy splněn. Použití dlouhých přípojovacích kabelů, vykazujících velkou kapacitu mezi vodiči, může zapříčinit proudovou špičku při sepnutí. Pro rozpínání indukční zátěže, které vyvolává napětovou špičku a hoření oblouku mezi kontakty spínače, je vhodné do obvodu zařadit např. polovodičovou diodu.

Při použití za vysokých teplot je nutné posoudit odolnost plováku a kontaktů jazyčkového spínače. U tlakových nádob může při překročení maximální povolené hodnoty tlaku nastat kolaps plováku. Plovákové hladinové spínače jsou jednoduchá a spolehlivá zařízení [1, 7, 10].



Obr. 10: vlevo schéma plovákového hladinového spínače s jazyčkovým kontaktem [7]; vpravo ukázka provedení – plovákový spínač Kobold pro teploty do 100 °C a tlaky do 10 MPa



## 4.4 Tlakové hladinoměry

Doposud v praxi značně rozšířeně a populární pro svoji jednoduchost a relativně nízkou cenu. Na trhu stále drží téměř poloviční podíl používaných průmyslových hladinoměřů. Pozvolna jsou nahrazovány především bezkontaktními metodami měření [1].

Výška hladiny  $h$  se vyhodnocuje na základě měření hydrostatického tlaku  $p$  v určitém místě pod hladinou.

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{konst.} \quad (23)$$

Z rovnice (23) plyne, že výsledek měření závisí na hustotě  $\rho$  a tedy i na teplotě kapaliny. V přesném významu tato metoda neměří výšku hladiny, ale hmotnost sloupce kapaliny nad místem snímání tlaku. Tento detail se projevuje nejvíce v situaci, kdy dojde k poklesu hustoty kapaliny (např. díky procesům ve vyhnívacích nádržích čistíren), hladina v nádrži pak může stoupnout, ačkoli údaj tlakového senzoru je konstantní.

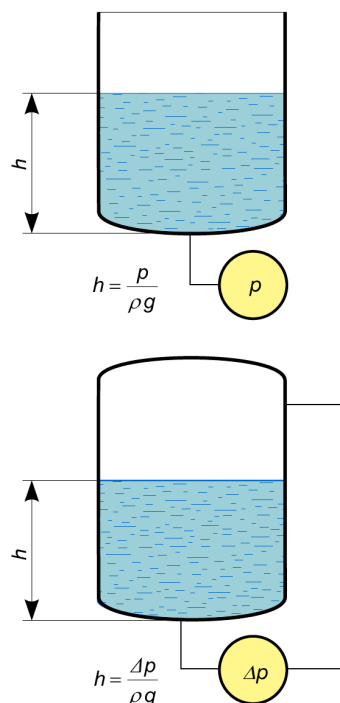
Tlak působí do všech stran, proto je možné měřit libovolně orientovaným tlakovým senzorem. Běžně se dosažitelná přesnost při určování výšky hladiny pohybuje v řádu několika centimetrů.

K měření hydrostatického tlaku je možné použít libovolný tlakoměr, např. kapalinovým manometrem. V praxi se pro vzdálené měření používají diferenční senzory tlaku s membránou. Deformace membrány je pak přímo měřena tenzometry, kapacitně, nebo senzory s elektromagnetickou silovou zpětnou vazbou.

### Základní způsoby měření

Tlakové senzory lze podle charakteru měření rozdělit na dva základní typy (obr. 11):

- senzory pro otevřené (atmosférické) nádoby, kde se měří hydrostatický tlak u dna nádoby jako přetlak proti atmosféře; technicky jednodušší a tedy i levnější řešení,
- senzory pro uzavřené (tlakové) nádoby, kde pracují jako diferenční senzory, tj. měří rozdíl tlaků mezi dnem nádoby a hladinou.

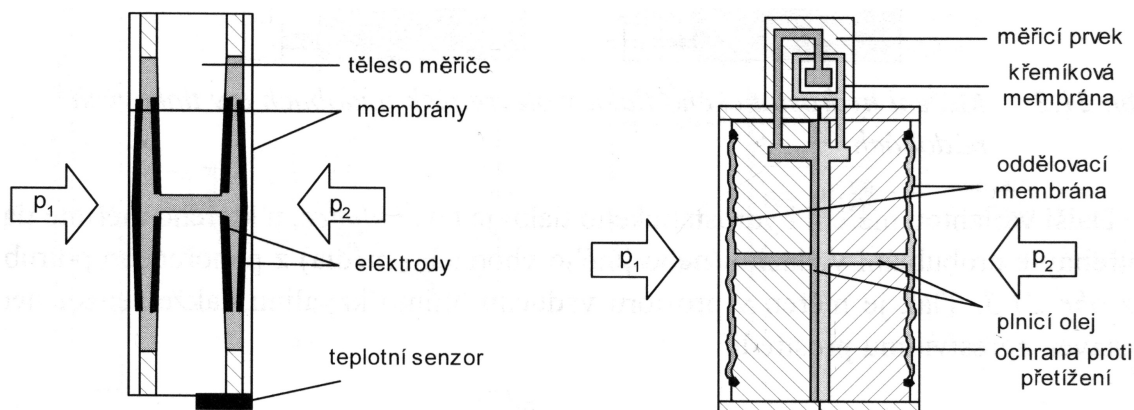


Obr. 11: Měření hydrostatického tlaku v otevřené a uzavřené nádobě [10]

Na obr. 12 jsou znázorněny dva typy senzorů diferenčního tlaku.

Vlevo je schématicky zobrazen senzor s keramickou membránou. Vnitřní objem je vyplněn silikonovým nebo minerálním olejem. Deformace způsobená tlakovou diferencí je zaznamenávána kapacitně pomocí elektrod, které tvoří kapacitní kondenzátor.

Vpravo je zobrazen senzor s kovovou oddělovací membránou. Dělený vnitřní prostor je také vyplněn silikonovým olejem, který transportuje diferenční tlak na měřící křemíkovou membránu s polovodičovými odporovými tenzometry [1].



Obr. 12: Schéma senzorů diferenčního tlaku na kapacitním a tenzometrickém principu od firmy Endress+hauser [1];

Podle konstrukčního provedení senzoru a podle způsobu použití je dále možné tlakové senzory dělit na:

- ponorné závěsné senzory,
- statické senzory,
- připojení s oddělovací membránou.

#### 4.4.1 PONORNÉ ZÁVĚSNÉ SENZORY

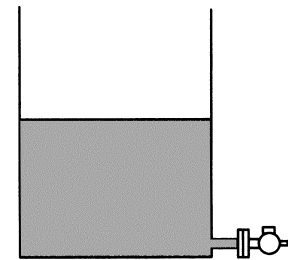
Ponorné závěsné senzory představují nejjednodušší případ tlakového senzoru. Používají se pro otevřené nádoby. Zpravidla bývá senzor zavěšen na izolovaném elektrickém kabelu. Lepší modely senzoru mohou být vybaveny vyrovnávacím tlakovým vedením, pomocí něhož kompenzují meteorologické změny barometrického tlaku, které mohou vnášet do měření chyby.

Jako výhody lze uvést malé rozměry, nízké pořizovací náklady, snadnou manipulovatelnost, montáž a údržbu [1, 9].

#### 4.4.2 STATICKÉ SENZORY

Statické senzory se montují do stěny otevřené nádoby.

Měřidlem je většinou diferenční senzor tlaku, jehož tělo se nachází vně nádoby a je odvětráno do atmosféry. Samotné připojení k měřené kapalině může být u čistých kapalin s nízkou viskozitou a bez pevných částic provedeno jako přímé, popř. přes oddělovací membránu a kapiláry. Viz. obr. 13.



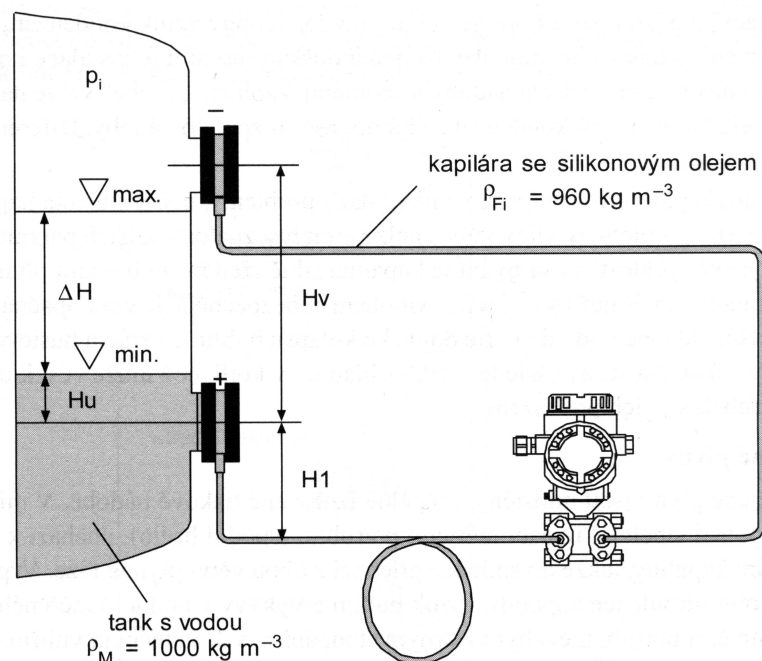
Obr. 13: Vestavěný senzor tlaku [1]

#### 4.4.3 PŘIPOJENÍ S ODDĚLOVACÍ MEMBRÁNOU

Diferenční senzory s oddělovacími membránami připojenými pomocí kapilárního potrubí se používají u tlakových nádob. Schéma zapojení je znázorněno na obr. 14. Senzor bude měřit diferenční tlak daný tlakem atmosféry v nádobě, výšku a hustotu kapaliny kapilárního potrubí [1].

$$P_+ = P_{Hu} + P_{Hl} = H_u \cdot \rho_M \cdot g + H_l \cdot \rho_{Fi} \cdot g + P_i, \quad (24)$$

$$P_- = P_{Hv} + P_{Hl} = H_v \cdot \rho_{Fi} \cdot g + H_l \cdot \rho_{Fi} \cdot g + P_i. \quad (25)$$



Obr. 14: Diferenční senzor připojený přes oddělovací membrány [1]

Přítomnost tekutiny v kapilárním potrubí vyvolává přídavný tlak. Jeho velikost nezáleží na délce kapiláry ale na převýšení vůči úrovni montáže senzoru diferenčního tlaku. Jeho rozsah senzoru lze posunout umístěním senzoru pod nebo nad úroveň spodního připojení k nádobě. Přitom je nutné dodržet povolený rozsahu tlaků senzoru.

### **Oddělovací membrány**

Oddělovací membrány izolují měřenou kapalinu v nádobě od přímému styku s citlivým měřicím prvkem. Membránový oddělovač bývá obvykle vyroben z odolného materiálu a je naplněn hydraulickou kapalinou (např. silikonový olej, minerální olej, glycerín). Pro agresivní látky se používají ušlechtilé materiály (tantal, zirkon, titan), příp. koroziivzdorné slitiny Hastelloy, Money, nebo je membrána potažena vrstvou teflonu. Tuhost membrány však nesmí zkreslovat měření tlaku.

Je-li je spodní i horní tlak v nádobě připojen k senzoru přes oddělovací membránu, obvykle se používá dvou kapilárních vedení o stejné délce. Dosáhne se tím totožné chyby způsobené teplotní roztažností hydraulické kapaliny a tím nulové chyby diferenčního tlaku. Viz. *obr. 14*.

Na trhu jsou k dispozici diferenční tlakoměry s plochými a širokými membránami, s opakovači tlaku a těsněními chránícími diferenční tlakoměry proti chemickým účinkům technologického média. Pro přesnější měření a menší tlaky by membrána měla mít větší průměr (a tím i větší ohebnost).

Výhody hydrostatické metody měření výšky hladiny:

- jednoduchost konstrukce, protože neobsahují pohyblivé části (jako např. plováky),
- měření není ovlivněno nečistotami v kapalině, nevádí ani kal u dna,
- metoda je vhodná pro měření výška hladiny velmi viskózních kapalin
- rozsah měření výšky hladiny je směrem nahoru v podstatě neomezený,
- měřit lze i hladiny kapalin o teplotě až do 400 °C [1, 9].

**Tabulka 2: Senzory výšky hladiny [11]**

Skupina	Typ senzorů	Princip měření	Možnosti použití
mechanické	plovákové	snímání polohy plováku	čisté, neviskózní kapaliny
	vztlakové	měření a kompenzace vztlakové síly ponorného tělesa	čisté, neviskózní kapaliny, včetně měření polohy mezihladiny; údaj závisí na hustotě měřeného média
	elektromechanické	periodické spouštění závaží k hladině	spojité měření výšky násypu sypkých látek
	vibrační	vyhodnocení útlumu vibrací indikačního prvku	limitní měření polohy kapalin i sypkých látek
	vrtulkové	vyhodnocení útlumu otáčení indikačního prvku	limitní měření sypkých hmot; nevyžaduje kalibraci
	hydrostatické	senzory hydrostatického tlaku pneumatické s probubláváním	měření hydrostatického tlaku měření hydrostatického tlaku při probublávání měřeného média vzduchem
elektrické	vodivostní	vyhodnocení změny elektrické vodivosti mezi elektrodami	jednoduchý a levný senzor pouze pro elektricky vodivé kapaliny; vhodný senzor pro odpadní vody
	kapacitní	měření elektrické kapacity senzoru	měření elektricky vodivých i nevodivých kapalin a sypkých hmot; vhodné pro limitní i spojitě měření, a to i při vysokých teplotách a tlacích; možnost snímání polohy mezihladiny kapalin; nevhodné pro média ulpívající na sondě
	tepelné	změna odvodu tepla z vyhřívaného rezistoru	limitní měření polohy hladiny kapalin
	fotoelektrické	vyhodnocení změny intenzity světla	jednoduché provedení, vhodné i pro vyšší teploty; nevhodné pro prašná prostředí a pro média ulpívající na sondě

**Tabulka 3: Senzory výšky hladiny – pokračování [11]**

Skupina	Typ senzorů	Princip měření	Možnosti použití
fyzikální	ultrazvukové	měření doby šíření ultrazvukového signálu	bezdotykové, neinvazivní měření; vhodné pro kapaliny, pastovité i sypké hmoty a agresivní média s měnícími se vlastnostmi; nevhodné pro měření za nízkých a vysokých tlaků; vadí turbulence hladiny, prašné prostředí
		vyhodnocení útlumu ultrazvukového signálu	vhodné pro limitní měření
	radarové	měření doby šíření mikrovlnného signálu	bezdotykové, neinvazivní měření; vhodné k použití za extrémních podmínek pro velmi agresivní i toxické materiály za vysokých teplot a tlaků; pro viskózní s lepivá média, pasty a kaly, zkapalněné plyny, těkavé a agresivní kapaliny; nevhodné pro kapaliny s malou permitivitou
	reflektometrické (radary TDR)	měření doby odrazu impulsu mikrovlnného impulsu od fázového rozhraní	pro kapaliny i sypké látky, včetně měření polohy mezihladiny kapalin; měření není ovlivňováno teplotou a tlakem ani přítomností pěny nebo prachu; nevhodné pro kapaliny s malou permitivitou
	radioizotopové	vyhodnocení absorpce radioaktivního záření	bezdotykové, neinvazivní měření s gamazářičem vhodné k použití za extrémních podmínek pro toxická, agresivní a abrazivní média při jakýchkoliv teplotách a tlacích; senzory se umísťují vně nádrží; nutná ochrana obsluhy; povinné pravidelné kontroly

**Tabulka 4: Přehled aplikačních možností senzorů výšky hladiny [11]**

Měřené médium	kapaliny						mezihladina	sypké látky		extrémní podmínky
	limitní		spojité		viskózní, suspenze	limitní		spojité		
	čisté	viskózní, suspenze	čisté	viskózní, suspenze						
Typy senzorů:										
– plovákové	V	N	V	N		N	—	—		M
– vztlakové (s ponorným tělesem)	—	—	V	N		N	V	—		V
– vibrační	V	M	—	—		—	N	—		M
– vrtulkové	—	—	—	—		—	V	—		—
– hydrostatického tlaku	M	M	V	M		M	—	—		M
– pneumatické s průhlednými	—	—	V	M		M	N	—		M
– vodivostní	M	M	M	N		N	N	—		V
– kapacitní	V	M	V	M		M	V	V		V
– tepelné	V	V	—	—		—	M	—		N
– fotoelektrické	V	A	M	N		N	M	N		M
– ultrazvukové	V	V	V	V		V	N	V		N
– radarové	M	M	V	V		V	N	V		N
– reflektometrické	—	—	V	V		V	V	V		M
– reflektometrické (radary TDR)	—	—	V	V		V	V	V		M
– radioizotopové	V	V	V	V		V	N	V		V

*Symbole: V: vhodné, N: nevhodné, M: možnost použití za určitých podmínek, —: běžně se nepoužívá*

---

## 5 Závěr

---

Měření průtoku a výšky hladiny v současné době prochází rychlým vývojem v důsledku stále se zvětšujícího množství obchodovatelných tekutin, pro které je nutné poskytovat a vyvíjet nové metody měření, protože ty jsou zase klíčové pro vytváření nových technologií v průmyslu.

Na trhu je díky tomu k dispozici velké množství cenově dostupných a zároveň velmi přesných měřidel pracujících na mnoha různých principech. Přitom ještě před několika lety se jednalo o velmi statický a konzervativní segment trhu, kde trvalo velmi dlouhou dobu, než byly nové technologie akceptovány pro širší použití. Dnes se na celém světě se zabývá konstrukcí a výrobou průtokoměrů více než tisícovka společností.

Správný výběr průtokoměru vyžaduje značné zkušenosti. Je přitom třeba brát ohled nejen na požadovanou přesnost měření, ale též na mnoho dalších faktorů: provozní podmínky, jako jsou tlak, teplota, chemická agresivita a abrazivita měřeného média, výskyt pevných částic nebo bublin plynu, nutnost instalovat uklidňovací potrubí, možnost snadného nastavení měřidla a jeho údržby atd. V neposlední řadě je významným faktorem také cena. Stále více vystupuje do popředí i energetická náročnost měřicího procesu, daná především tlakovou ztrátou na měřidle.

Podrobné informace o vlastnostech jednotlivých konstrukcí průtokoměrů a jejich aplikacích lze nalézt v široce dostupné teoretické i firemní odborné literatuře.



---

## 6 Seznam literatury

---

- [1] ĎAĎO, Stanislav; BEJČEK, Ludvík; PLATIL, Antonín: *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vydání. BEN – technická literatura, Praha 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X.
- [2] KADLEC, Karel: Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA*. Praha 2006, č. 10, s. 5–9.
- [3] KADLEC, Karel: Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 2). *AUTOMA*. Praha 2006, č. 11, s. 24–29.
- [4] KADLEC, Karel: Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 3). *AUTOMA*. Praha 2006, č. 12, s. 30–34.
- [5] JEŽEK, Jan; VÁRADIOVÁ, Blanka; ADAMEC, Josef: *Mechanika tekutin*. 3. vydání. ČVUT, Praha 2000. 150 s.
- [6] JANALÍK, Jaroslav; ŠTÁVA Pavel: *Mechanika tekutin*. 1. vydání. VŠB, Ostrava. 123 s.
- [7] ANONYM (OMEGA): *FLOW and LEVEL measurement*, Transactions in Measurement and Control, vol. 4. Library Reference Edition, Omega Engineering, Inc., 2003.
- [8] KADLEC, Karel: Coriolisovy průtokoměry. *AUTOMA*. Praha 2006, č. 12, s. 30–34.
- [9] VACULÍK, Jan: Hydrostatické snímače úrovně hladiny. *AUTOMA*. Praha 2003, č. 5. [cit. 2011-04-03]. Dostupný také z WWW:  
<[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=28802](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28802)>
- [10] KADLEC, Karel: Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 1). *AUTOMA*. Praha 2005, č. 5, s. 5–10.
- [11] KADLEC, Karel: Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 2). *AUTOMA*. Praha 2005, č. 6, s. 26.
- [12] RIPKA, P.; TIPEK, A: *Master Book on Sensors, Part A*. BEN – technical literature for Skoda Auto, Prague 2003. 525 s. ISBN 80-7300-129-2.
- [13] MILLER, R.W.: *Flow Measurement Engineering Handbook*. 2nd ed. McGraw-Hill, New York 1989. 1168 s. ISBN 0-07-042046-7.