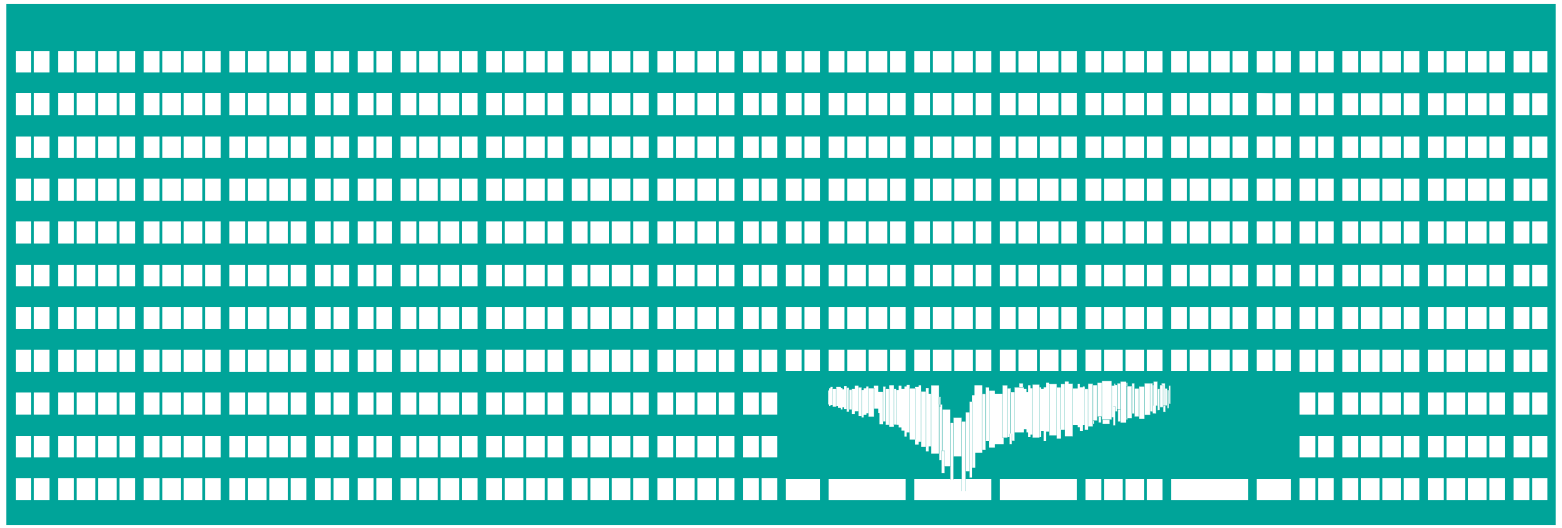
VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

VSB TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Snímače a senzory v biomedicíně
Přednáška 4

Snímače průtoků

Základní pojmy

- **Senzory průtoku tekutin** (tj. kapalin i plynů) určují množství objemové $\mathbf{Q_v}$ nebo hmotnostní $\mathbf{Q_m}$ tekutiny proteklé zvoleným průřezem za jednotku času.
- Ze známé plochy průřezu **S** a střední rychlosti proudění lze určit $\mathbf{Q_v}$ a $\mathbf{Q_m}$ z definičních vztahů:

$$Q_v = \frac{DV}{Dt} = \bar{v} \cdot S \qquad Q_m = \frac{Dm}{Dt} = r \cdot \bar{v} \cdot S$$

kde:

Q_v [$m^3.s^{-1}$] objemové množství tekutiny

Q_m [$kg.s^{-1}$] hmotnostní množství tekutiny

ΔV [m^3] změna objemu tekutiny

Δm [kg] změna hmotnostní tekutiny

ρ [$g.m^3$] hustota tekutiny

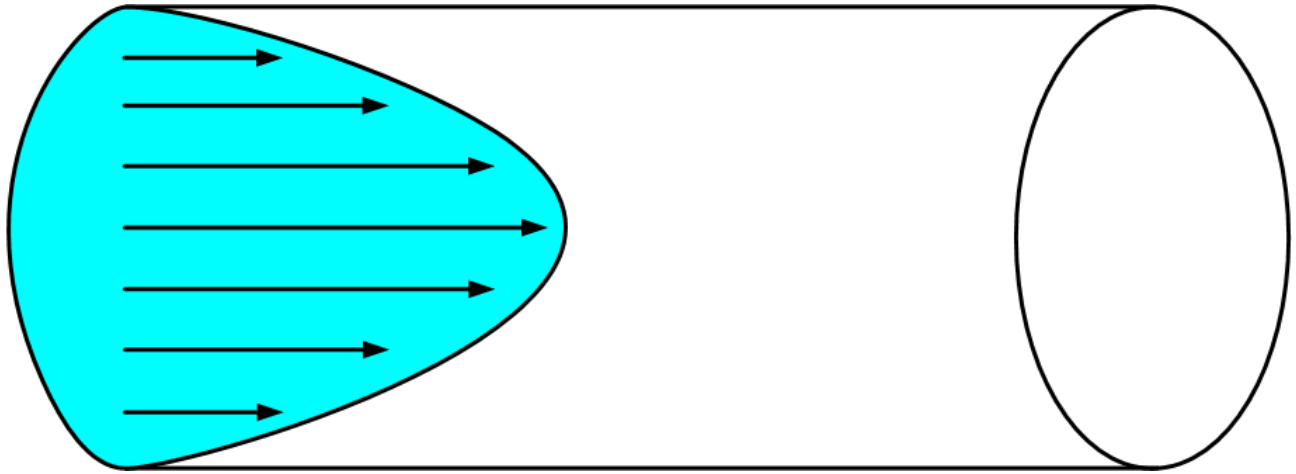
S [m^2] plocha průřezu

v [$m.s^{-1}$] střední rychlost proudění

Δt [s] čas

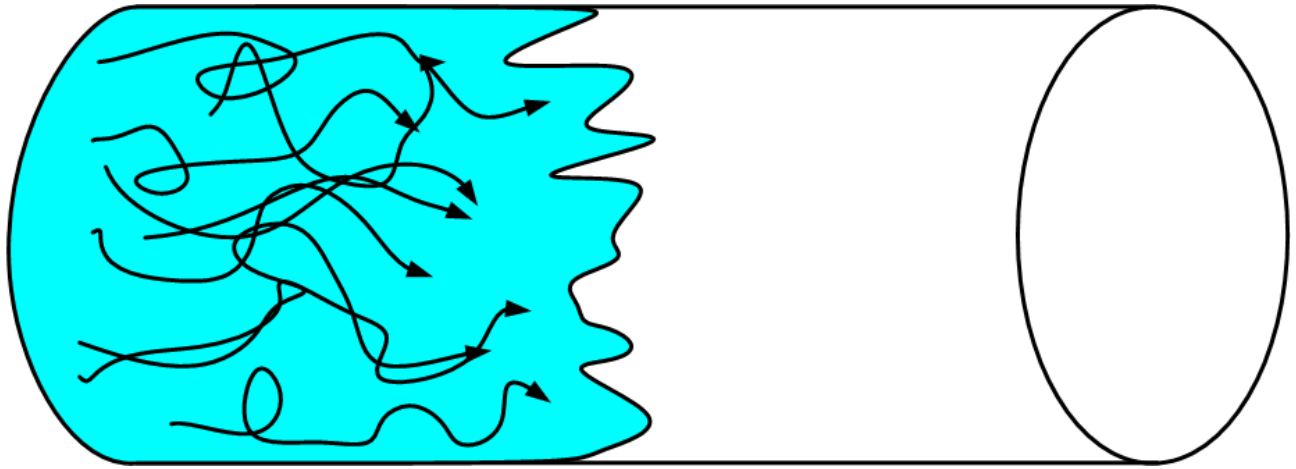
Laminární proudění

- **Laminární proudění** je takové proudění vazké kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se.
- Částice kapaliny se pohybují vedle sebe ve vrstvách. Mezi jednotlivými vrstvami se předpokládá vnitřní tření.
- **Laminárním prouděním** lze vhodně aproximovat proudění reálných kapalin při malých rychlostech.



Turbulentní proudění

- **Turbulentní proudění** je takové proudění, při kterém se proudnice navzájem promíchávají.
- Částice tekutiny při proudění vykonávají kromě posuvu i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů.
- Rychlost těchto částic se nepravidelně mění – částice v různých místech nemají stejnou rychlost.



Reynoldsovo číslo

- Jedním ze stěžejních kritérií pro posouzení druhu proudění je **Renoldsovo číslo Re**, které udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině.
- Reynoldsovo číslo je definováno jako:

$$Re_D = \frac{S}{T} = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v D}{\eta} [-]$$

Kde:

S – setrvačná síla

T – třecí síla

η – dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

v – kinematická viskozita tekutiny [$m^2 s^{-1}$]

Hodnoty Reynoldsova čísla

- **Kritické Reynoldsovo číslo** určuje hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro potrubí kruhového průměru je stanovena teoretická hranice: Re_{Dkrit}=2320.
- **Laminární proudění** nastává pro Reynoldsova čísla **R_e< 2000** a je charakteristické parabolickým rychlostním profilem.
- Většina aplikací pracuje s turbulentním prouděním, vyskytujícím se pro **R_e> 3000**.
- Průtok krve cévami má Reynoldsovo číslo hodnotu přibližně **2000**.

Nusseltovo číslo

- Je spojováno s přenosem tepla, využívá se např. u tepelných anemometrů.

- Nusseltovo číslo je definováno vztahem:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \; [-]$$

Kde:

α – je koeficient přestupu tepla [W/m^{2}K]

d – je průměr žhaveného drátku [m]

λ – je měrná tepelná vodivost [W/mK]

Prandtlovo číslo

- Jedná se o bezrozměrný parametr charakterizující teplotní poměry při proudění, který je definován vztahem:

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\eta \rho c_p}{\rho \lambda} = \frac{\eta c_p}{\lambda} [-]$$

Kde:

v – je kinematická viskozita [$m^2.s^{-1}$]

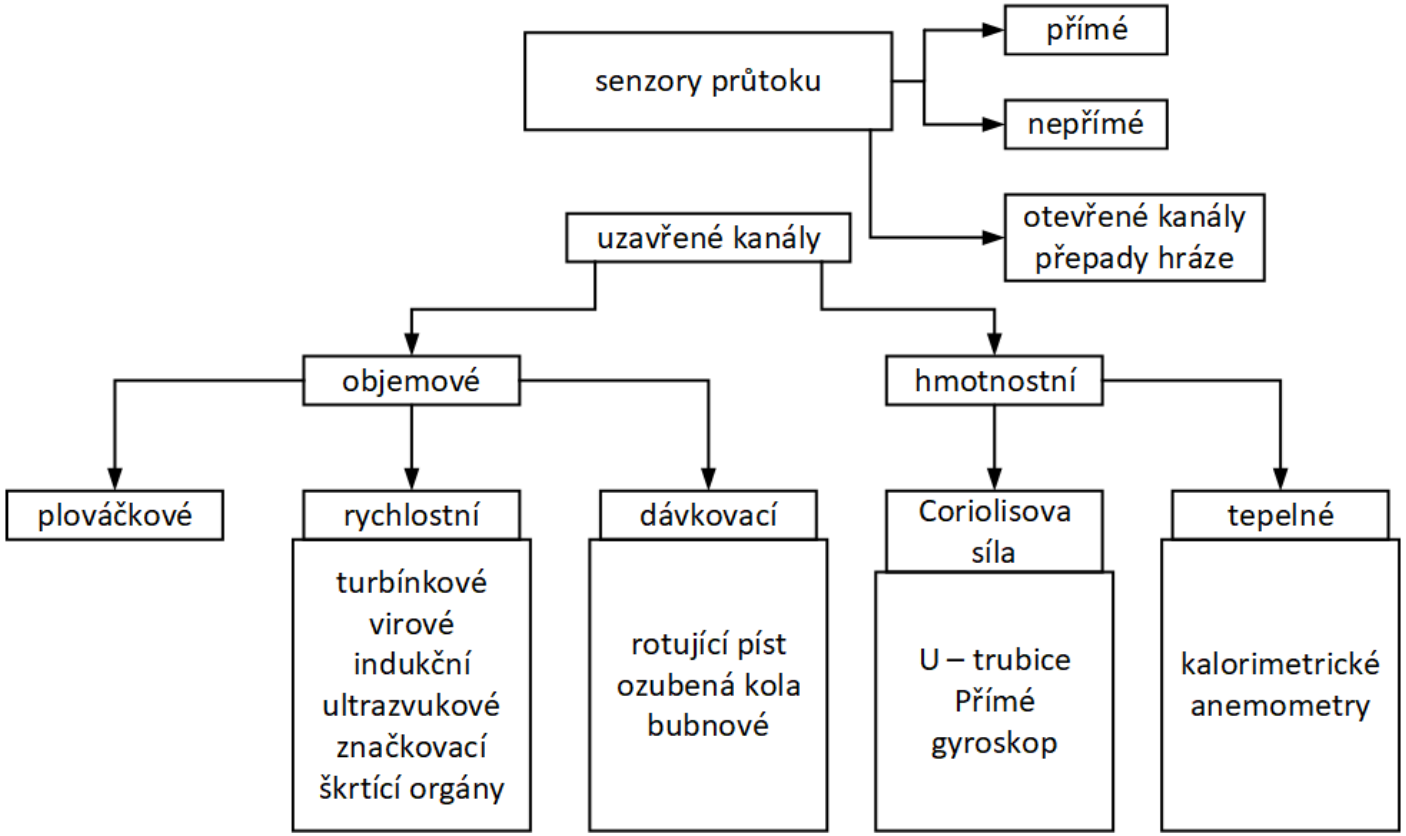
a – teplotní vodivost [$m^2.s$]

c_p – je měrná tepelná kapacita tekutiny za konstantního tlaku [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

η – je dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

ρ – je hustota

Dělení senzorů průtoku



Rychlostní průtokoměry

- **Průtokoměry s konstantním průtočným průřezem** - u tohoto typu je měřítkem průtoku okamžitá střední rychlost proudění.

- **Průtokoměry s konstantní střední rychlostí proudění** – u níž je měřítkem průtoku velikost průtočného průřezu.

- **Průtokoměry, energii spotřebovávající** – u těchto senzorů se energie pohybující tekutiny předává pevnému, nebo pohyblivému čidlu ponořeného do tekutiny.

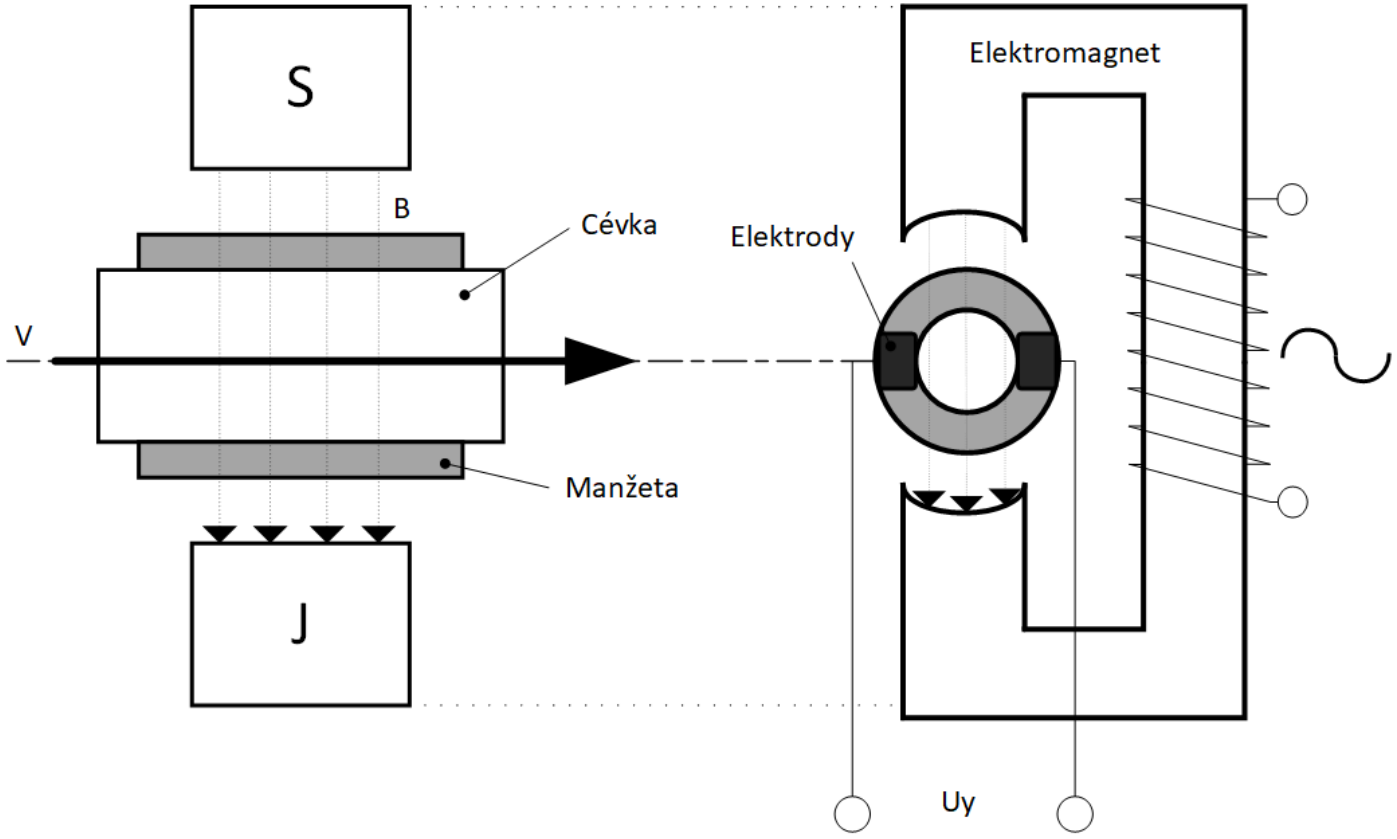
Požadavky na snímače průtoku a průtokoměry

- **Pracovní činnost** – spojitá, nespojitá, jednorázová, trvalá.
- **Druh, vlastnosti a hodnoty parametrů** měřené tekutiny.
- **Měřící místo** a jeho parametry.
- **Rušivé vlivy senzoru** – tlaková ztráta, časové zpoždění údaje.
- **Způsob indikace** – zobrazení, analogový nebo digitální tisk, uložení do paměti.
- **Přesnost měření** – bez korekce nebo s korekcemi.
- **Opotřebení** mechanických dílů a nestálost.
- **Dynamické vlastnosti** – časová konstanta, zpoždění.

Elektromagnetické senzory průtoku

- **Elektromagnetické průtokové senzory** se v medicíně používají k monitorování průtoku krve v tepnách a žílách při operačních zákrocích na kardiovaskulárním systému.
- Senzor obsahuje **zdroj magnetického pole** (magnet, elektromagnet).
- V oblasti mezi póly magnetu S a J je umístěna obnažená céva stáhnutá na definovaný průměr manžetou.
- **Elektromagnetický průtokový senzor** se používá v několika aplikacích při operačních zákrocích na sále ve dvou provedeních – **perivaskulární** a **intravaskulární**.

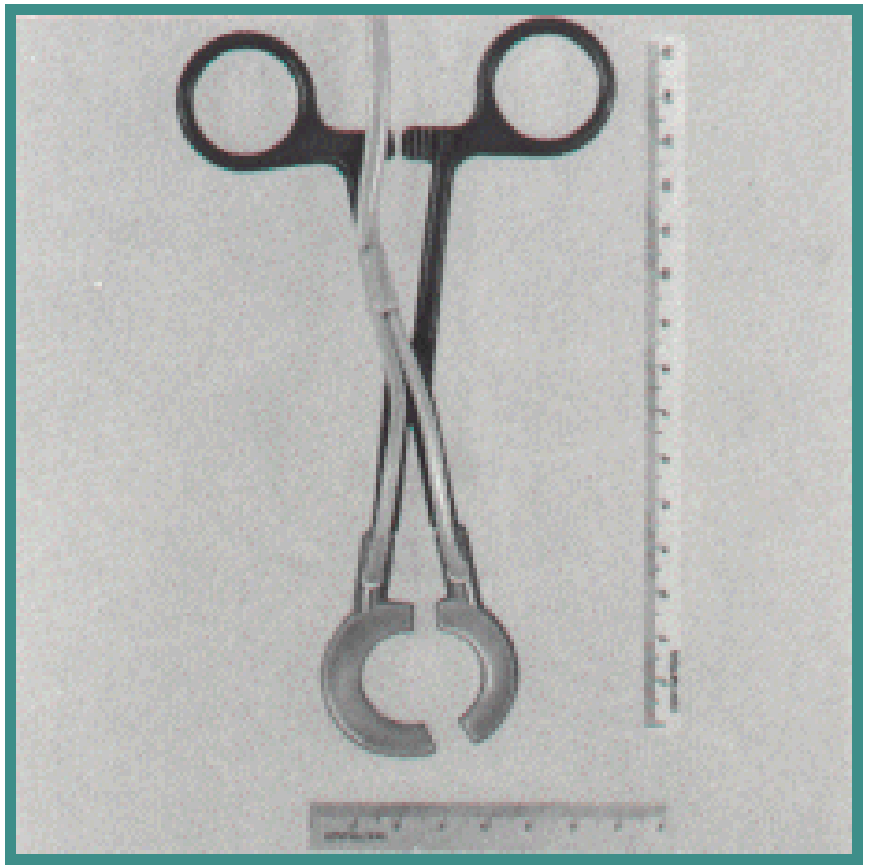
Schéma elektromagnetického průtokoměru



Perivaskulární elektromagnetické průtokoměry

- Tyto senzory se aplikují na obnažený povrch cévy.
- **Magnetická indukce** použitých magnetů se pohybuje od 3.10^{-2} T do 3.10^{-3} T
- Jako materiál pro snímací elektrody komerčně dostupných snímačů se používá většinou zlato.
- **Perivaskulární senzory** běžně umožňují monitorovaní krevního průtoku v rozsahu 5 ml/min až 20 l/min.

Perivaskulární elektromagnetické průtokoměry



Intravaskulární elektromagnetické průtokoměry

- Pracují na stejném principu jako perivaskulární senzory.
- Jedná se o katetrové provedení senzoru, kdy krevní tok je vyvedený do katetru průtokoměru, na vnitřní stěně katetru jsou umístěny snímací elektrody.
- Na rozdíl od předchozího typu zde proudící krev přichází do přímého kontaktu s cizorodým materiálem.
- Výhoda intravaskulárního provedení spočívá v jeho univerzálnosti – na různé průměry cév je možno použít stejný snímač.

Termoanemometrické senzory průtoku

- Jedná se o tepelný senzor hmotnostního průtoku, což je senzor založený na závislosti výměny tepla mezi zdrojem (drátek, vrstvový odpor) a okolím (proudící tekutina) na hmotnostním průtoku.
- Teplo odvedené ze žhavého drátku (folie) do tekutiny je závislé na Reynoldsově čísle:

$$R_e = \frac{d.v.\rho}{\eta}$$

kde:

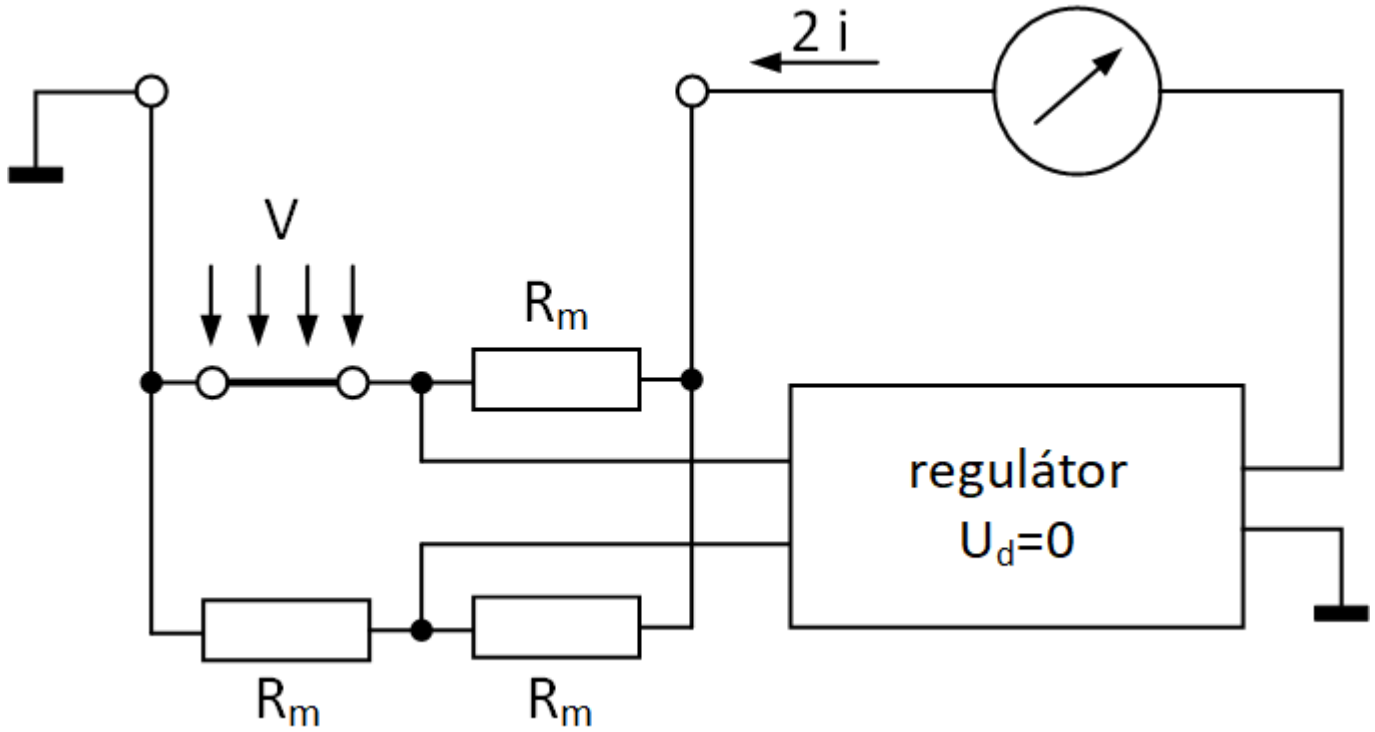
d [m] průměr potrubí

v [m.s^{-1}] průměrná rychlost proudění tekutiny

ρ [kg.m^{-3}] hustota tekutiny

η [Pa.s] dynamická viskozita

Měřící obvod termoanemometru



Režimy činnosti senzoru

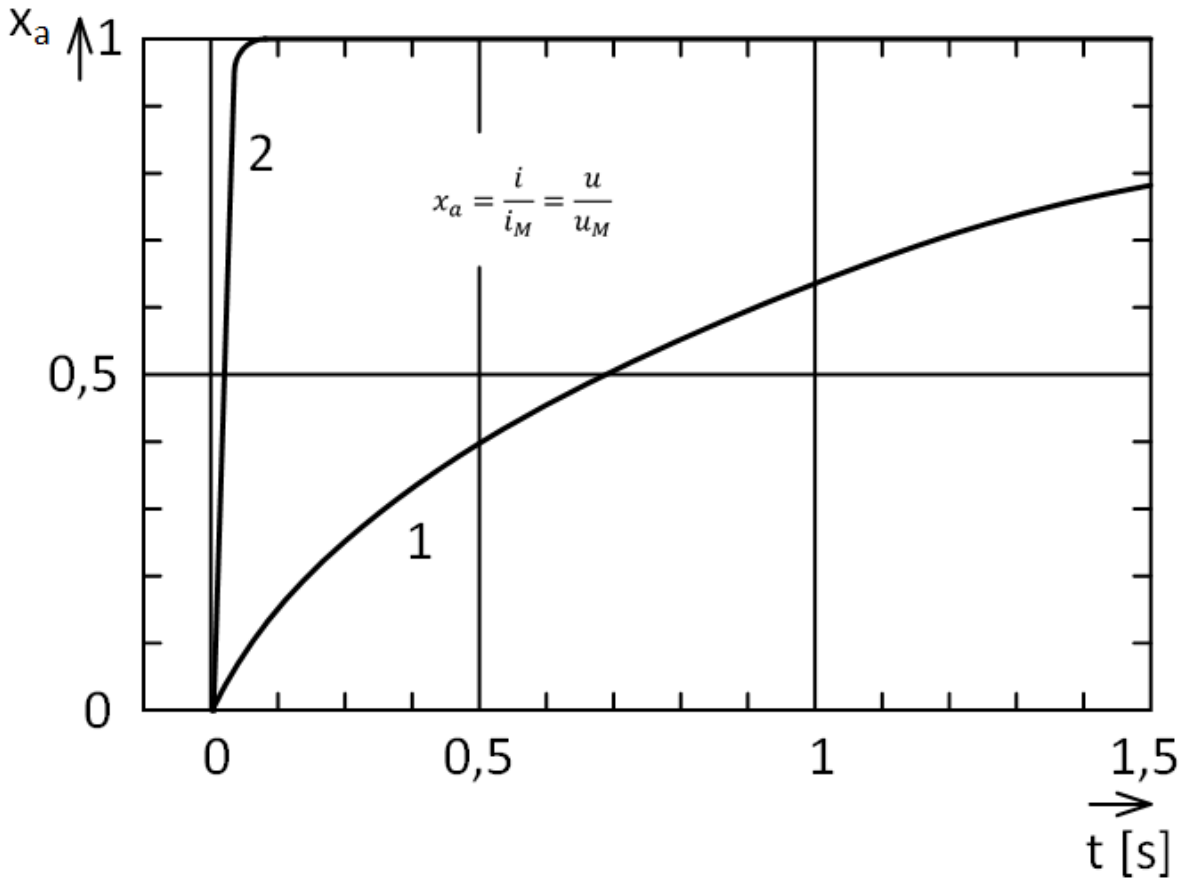
- **Senzor pracující s konstantním proudem** je zapojen v běžném odporovém můstku, napájeném konstantním proudem.

- Při **nulové rychlosti proudění** je můstek vyvážen, zvýšení rychlosti proudění (směrovat kolmo na osu drátku) vyvolá změnu jeho teploty a následně odporu.

- **Senzor v zapojení s konstantní teplotou** tvoří jedno rameno můstku navrženého tak, aby při maximální rychlosti proudění $\mathbf{v_M}$, kde je drátek zahřát na teplotu $\mathbf{\upsilon_M}$ a má odpor $\mathbf{R_M}$, byl můstek vyrovnán.

- Při poklesu je můstek **méně ochlazován** a napětí nerovnováhy můstku zmenší napájecí proud můstku **2i** tak, aby teplota drátku zůstala konstantní.

Odezva na skok rychlosti



Termoanemometr KIMO VT 200L

- **Vybrané technické parametry:**

  Dvouřádkový display LCD 50x54 mm.

  Pracovní teplota 0 – 50 °C.

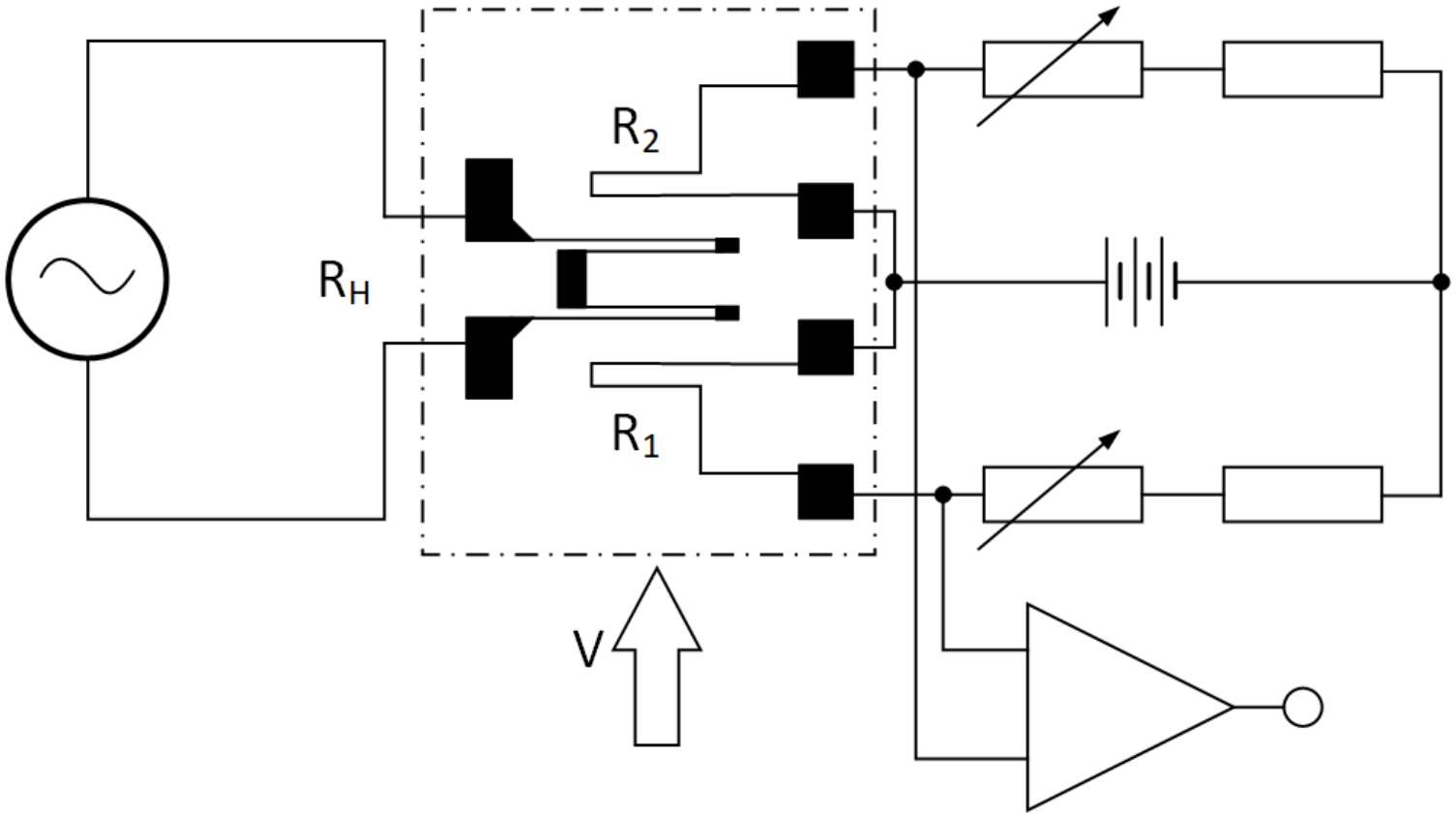
  Měřící element (rychlost proudění) – termistor, nebo ventilátor, Hallova sonda.

  Měřící element (okolní teplota) – termočlánkový senzor.

Diferenční anemometr

- **Diferenční anemometr** svou konstrukcí opět spadá do kategorie tepelných senzorů hmotnostního průtoku.
- **Anemometr** používá dvou vrstvových odporů $\mathbf{R_1}$, $\mathbf{R_2}$ (nebo drátků) umístěných spolu s vyhřívacím odporem $\mathbf{R_H}$ na izolačním podkladu.
- Při **v=0** jsou $\mathbf{R_1}$,$\mathbf{R_2}$ zahřátý na stejnou teplotu a můstek je vyvážen. Proudění tekutiny ochlazuje přední a ohřívá zvýšeným přenosem tepla od $\mathbf{R_H}$ zadní odpor.
- **Diferenční anemometr** je jednou z variant senzorů průtoku s oteplením tekutiny.

Schéma diferenčního anemometru



Průtokoměry na principu tlakového rozdílu

- Využívají **princip zachování energie** v proudící tekutině, formulovaný v **Bernouliho rovnici**.
- Při proudění tekutiny dochází k **vzrůstu dynamického** a k **poklesu statického tlaku**.
- Dynamický tlak je určen jako **tlakový rozdíl** statických tlaků před a za překážkou (tzv. primární člen průtokoměru).
- K měření **statického tlaku** se používá senzorů tlaku (sekundární člen průtokoměru).

Senzory s diferenčním manometrem

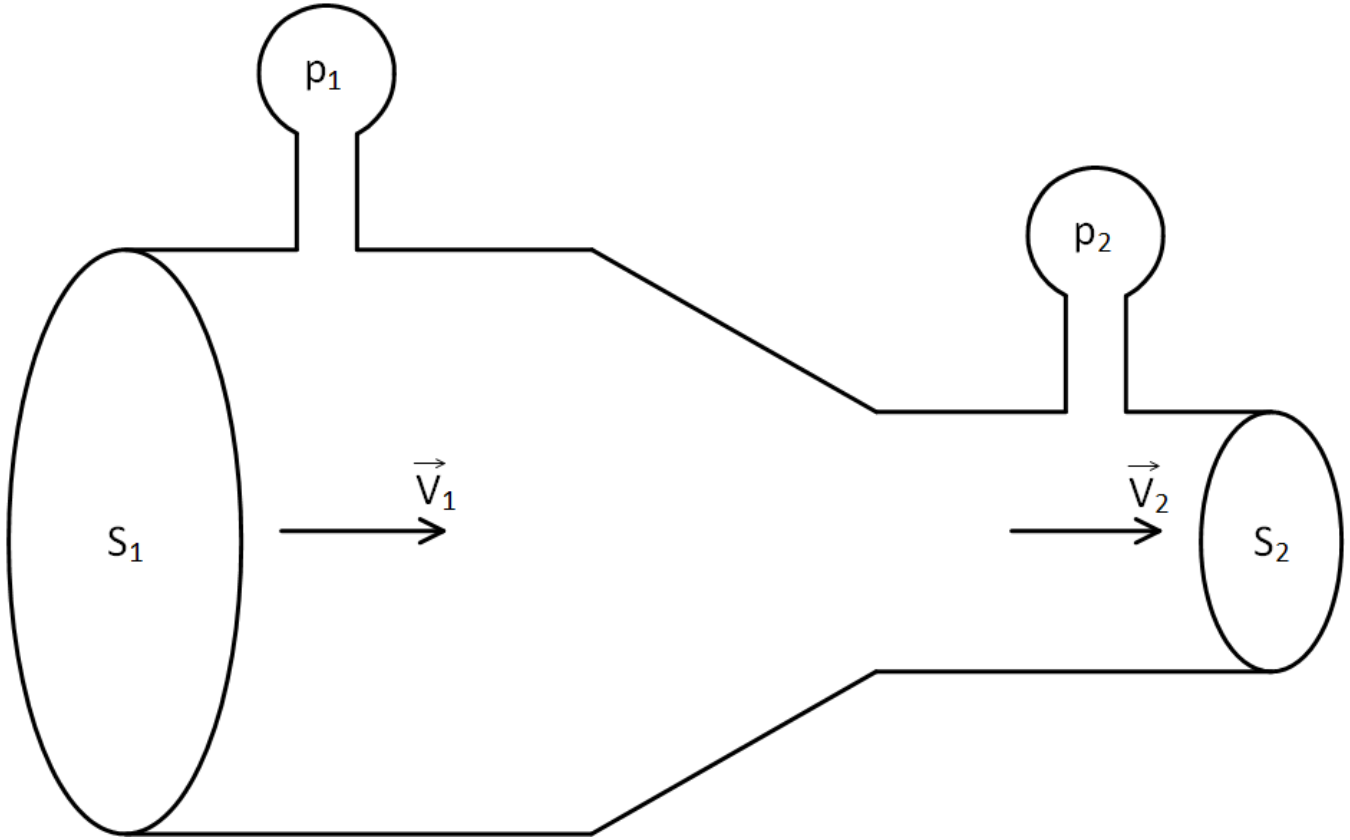
- Měření průtoku pomocí **diferenčních manometrů** se používá zejména u měření průtoků dýchacích plynů.

- Senzory pracující na systému diferenčního manometru měří **rozdíl tlaku** vznikající mezi dvěma místy, mezi nimiž je průtokový nejčastěji vzduchový odpor.

- Nejjednodušším způsobem lze rozdíl tlaku vytvořit pomocí tzv. **Venturiho trubice**. Vztah mezi rozdílem tlaku a rychlostí proudění lze u Venturiho trubice odvodit s využitím **Bernoulliovy rovnice**.

$$\frac{1}{2}\rho \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho \cdot v_2^2 + p_2$$

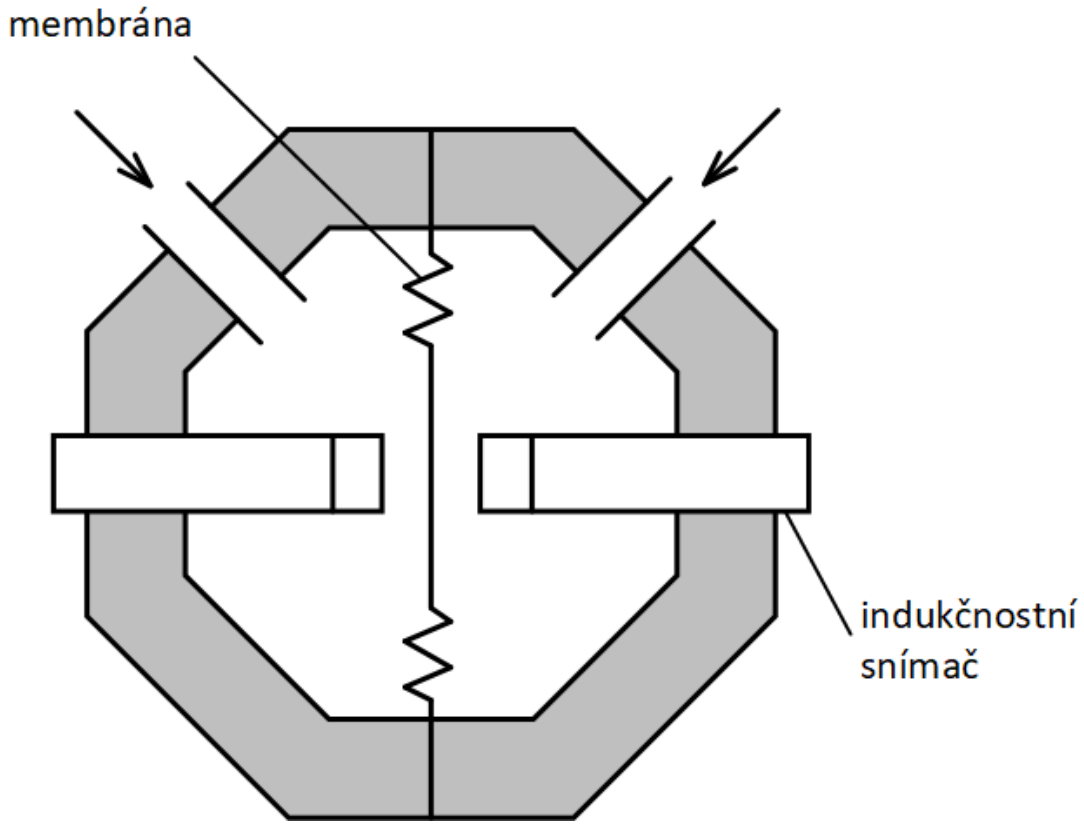
Venturiho trubice



Realizace diferenčního manometru

- Protože potřebujeme **znát rozdíl tlaku** mezi místy měření **Δp**, je výhodné využít namísto dvou klasických manometrů pouze jeden a to **diferenční**.
- Sestává ze dvou membránou navzájem oddělených komůrek, které jsou spojeny s měřicími místy Venturiho trubice.
- **Výchylka membrány** bude závislá na **rozdílu tlaku** v komůrkách.
- Tuto výchylku měříme pomocí vhodných snímačů, **indukčnostních** nebo **kapacitních**.
- Aby se dosáhlo většího poklesu rozdílu tlaku, používají se v praxi různé typy **vzduchových odporů**.

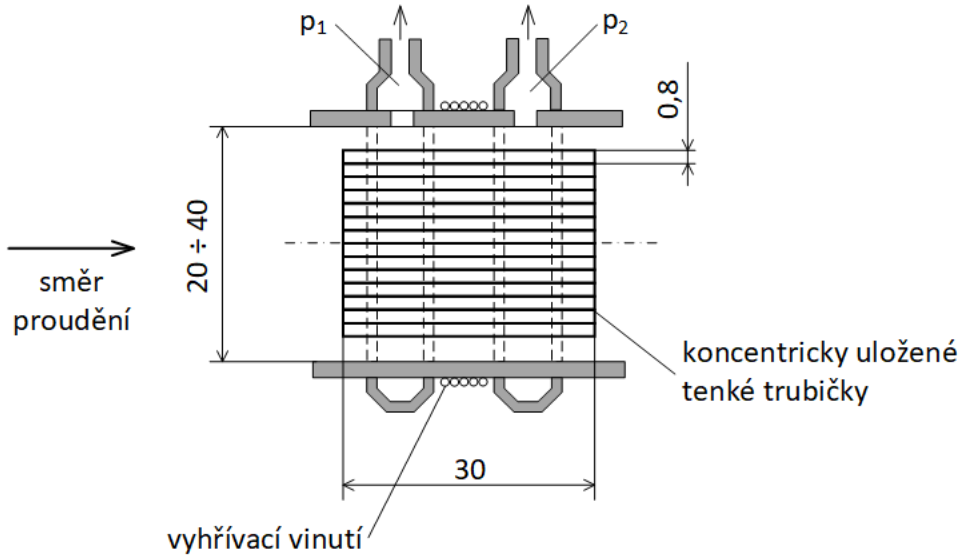
Příklad realizace diferenčního manometru



Fleischův manometr

- Tvoří ho hustá soustava koncentricky uložených tenkých trubiček o průměru menším než 1 mm, ležících ve směru proudění vzduchu.

- Tlak je měřen před a za tímto svazkem trubiček. Protože v trubičkách dochází ke kondenzaci vodních par, obsažených ve vydechovaném vzduchu, bývá manometr vybaven vyhřívacím vinutím, pomocí kterého lze zkondenzovanou vodu odpařit.



Clony

- Slouží k **omezení průměru potrubí** a mají tvar desky s otvorem vložené do potrubí kolmo na směr proudění.

- Tlak se měří v jisté vzdálenosti před clonou (průřez $\mathbf{S_1}$, tlak $\mathbf{p_1}$) a za clonou v místě minimálního statistického tlaku (průřez $\mathbf{S_2}$, tlak $\mathbf{p_2}$).

- Pro objemový průtok platí:

$$Q_v = S_1 v_1 = S_2 v_2$$

$$S_1^2 v_1^2 = S_2^2 v_2^2$$

$$v_1^2 = \frac{S_1^2}{S_2^2} v_2^2$$

Tvary měřících clon

- **Koncentrické clony** – Jsou vhodné pro čisté kapaliny, plyny a páry pro Reynoldsovo číslo v rozmezí: 20 000 do 107 a průměru potrubí do 150 mm.

- **Koncentrické clony** bývají obvykle opatřeny výpustnými otvory – pro odvod kapalné fáze při měření plynů.

- **Segmentové clony** – Mají otvor tvaru kruhového segmentu. Používají se pro měření znečištěných tekutin, tj. obsahují kromě hlavní fáze také sekundární fázi.

Ultrazvukové senzory průtoku

- **Ultrazvukové senzory průtoku** jsou založeny na změně rychlosti šíření, nebo frekvenci ultrazvukového vlnění průtokem tekutiny.

- **Ultrazvukové šíření** se šíří mezi **vysílačem** a **přijímačem**, které jsou umístěny na stěnách potrubí.

- **Ultrazvukové vlnění** je vysíláno i přijímáno **ultrazvukovým měničem**, pracujícím střídavě v režimu **piezostrikčním** (vysílač), nebo **piezoelektrickém** (přijímač).

- Podle charakteru generovaného vlnění mohou být ultrazvukové průtokoměry jak v režimu **spojité akustické vlny** (CW – continous Wave), nebo v **impulsním režimu**.

Dělení ultrazvukových průtokoměrů

- **Přímé impulsní**: Měří se doba průchodu ultrazvukového signálu od vysílače k přijímači. Ultrazvuková vlna má tvar impulsu o trvání až několik ms, frekvence vlnění závisí na resonanční frekvenci měniče.

- **Zpětnovazební**: Výstupní signál z přijímače je zesílen a přiveden do měniče, který pracuje v režimu vysílače. Tímto vznikne zpětnovazební zapojení, které vytváří oscilátor.

- **Dopplerovy**: Vyhodnocují změnu kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od částic unášených proudící tekutinou.

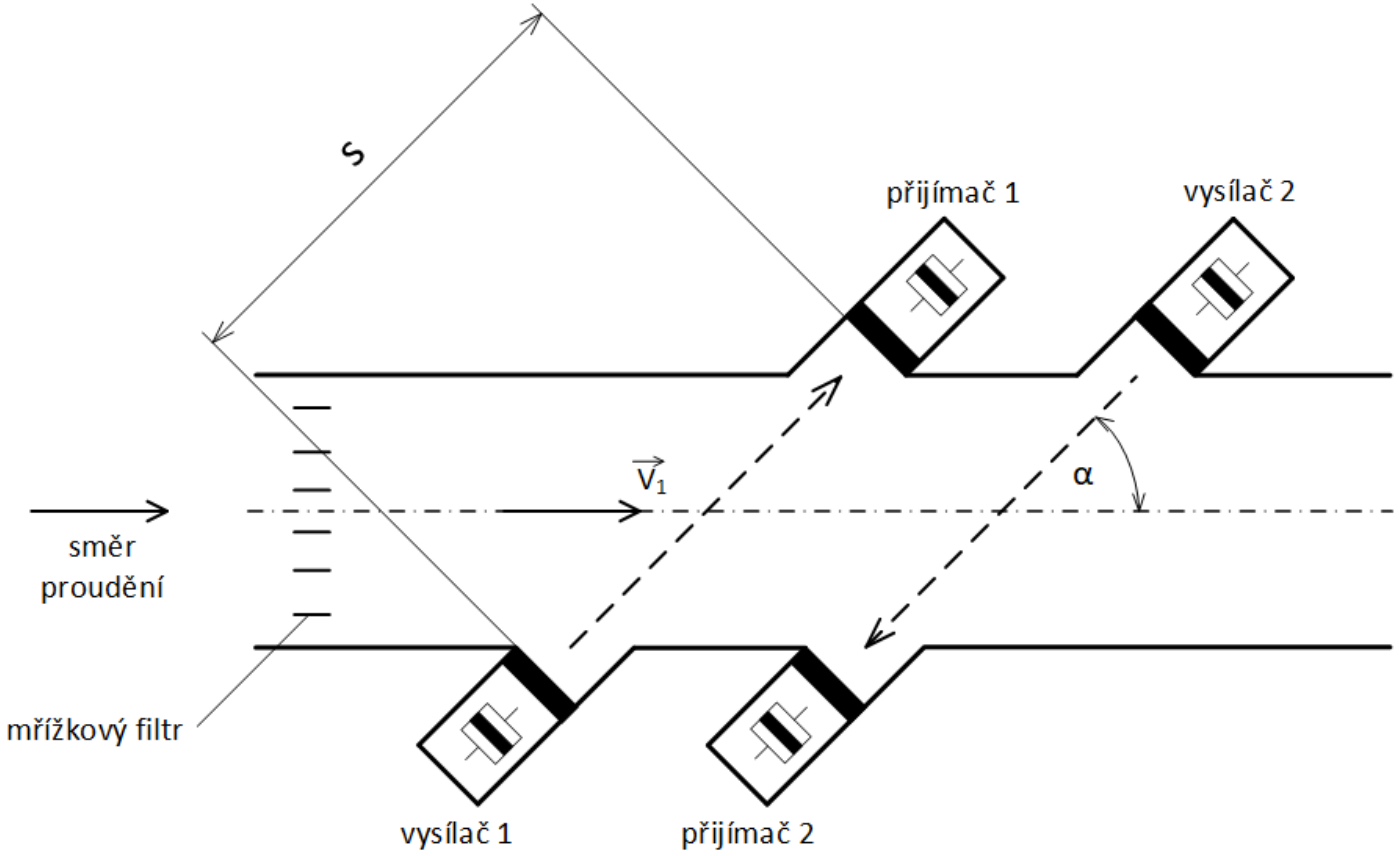
Ultrazvukový pneumotachograf

- **Ultrazvukové pneumotachografy** využívají dvou vzájemně opačně orientovaných párů protilehlých měničů vysílače a přijímače.

- Ultrazvuk se od vysílače k přijímači šíří vždy pod úhlem **α**, který svírá s osou trubice.

- Jednou z možností stanovení rychlosti průtoku vzduchu je její výpočet z rozdílu mezi dobou, za kterou urazí ultrazvuk vzdálenost vysílač-přijímač u obou páru měničů. Tato vzdálenost s je stejná.

Měniče ultrazvukového penumotachografu



Dávkovací senzory průtoku

- Tato skupina senzorů se využívá především v konstrukcích **infuzních pump** pro dávkování infuzní látky do pacientova organismu v přesně stanoveném množství (např. přesně stanovený počet kapek) i intervalech.

- Aplikačním příkladem může být **infuzní pumpa se zpětnou vazbou**, která se používá pro dávkování léčiva pro rozšíření cév
u pacientů s vysokým krevním tlakem.

Tlaková infuzní pumpa

- Tyto přístroje **čerpají tekutinu** přímo z infuzní láhve svým vlastním čerpadlem, podle konstrukce pod tlakem až 160 kPa.

- Proto se může pomocí této pumpy aplikovat infuze prakticky kamkoliv. Každá tlaková pumpa však nese nebezpečí aplikace vzduchu a tím pádem vzduchové embolie.

- Proto se vybavují složitými **elektronickými obvody** pro detekci a prevenci tohoto závažného problému.

- Nové infuzní pumpy využívají dlouhodobě stabilního chování vlastních čerpadel, která řídí **mikropočítačový systém**. Do jeho paměti lze vložit pomocí klávesnice údaje, potřebné pro **regulaci dávkování**.

Programovatelná infuzní pumpa (IDDS)

- Tyto pumpy jsou napájeny baterií, obsahují **integrovanou elektroniku**, díky níž lze telemetrickým přenosem naprogramovat dávkování léku.

- Pro telemetrický přenos dat se používají tzv. **programátory**. Jedná se o minipočítač, který je upraven pro bezdrátovou komunikaci s pumpou.

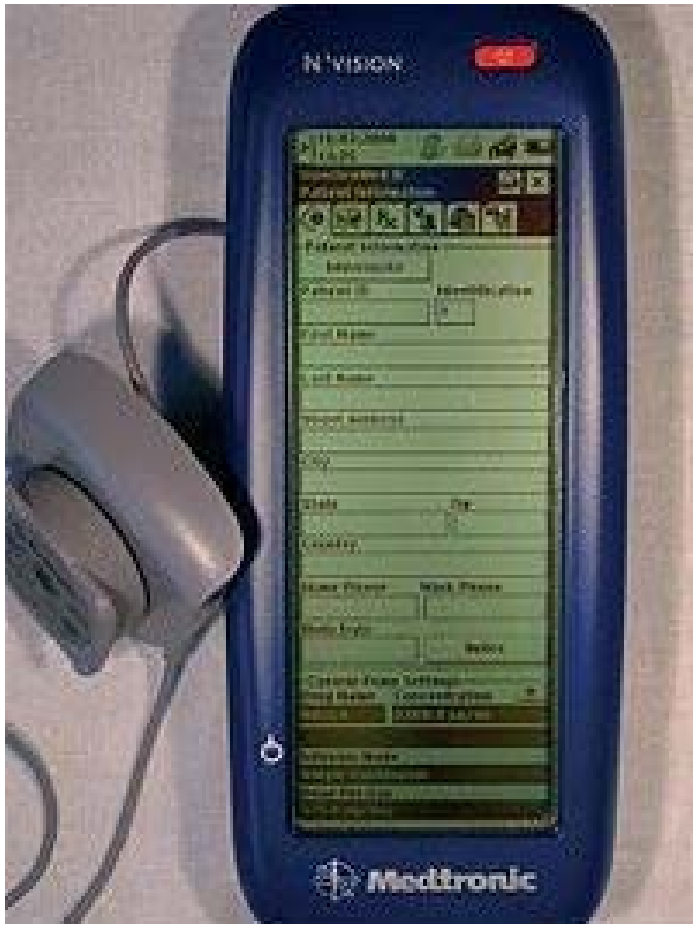
Tyto programátory jsou dvojího typu:

- **Lékařský programátor**: Umožňuje plnohodnotnou komunikaci s pumpou a změnu nastavitelných parametrů.
- **Pacientský programátor**: Je dodáván společně s pumpou. Pacient si může měnit některé parametry.

Infuzní pumpa s konstantním průtokem

- Jedná se o **dávkovací systém**, jenž není závislý na bateriovém zdroji.
- Obsahuje systém dvou **hermeticky uzavřených komor**.
- **První komora** slouží jako zásobník tekutého roztoku. **Druhá tlaková komora** je naplněna hnacím médiem. Jako medium se používá tekutý plyn.
- **Hlavní výhodou** pumpy je její nízká cena a nezávislost na vnitřním energetickém zdroji. Také její využitelnost na dlouhou dobu léčby (řádově roky).
- Mezi **hlavní nevýhody** patří nemožnost rychlé změny dávky.

Lékařský programátor firmy Medtronix



Lineární dávkovač

- **Infuzní dávkovače** jsou charakteristické tím, že látka, která má být dopravena do těla pacienta, je umístěna v injekční stříkačce.
- Množství látky, které je touto cestou možno jednorázově bez výměny injekční stříkačky podat, je tedy omezeno.
- **Přesnost dávky** závisí nejen na přesnosti pohybu tlačného mechanismu dávkovače, ale i na vlastním provedení injekční stříkačky.
- Udává-li tedy výrobce přesnost dávkování, mělo by být definováno, za jakých podmínek vlastně tento údaj platí.

Lineární dávkovač

Vybrané technické parametry

Objem infuze: 0 – 9999ml

Bolus dávky: 10 – 1200ml/h

Přesnost: ±2%

Hmotnost pacienta: 0,4 – 400g

Kapacita akumulátoru: 10h

Rozhraní: RS232

Vlhkost: max. 90%

Děkuji za pozornost