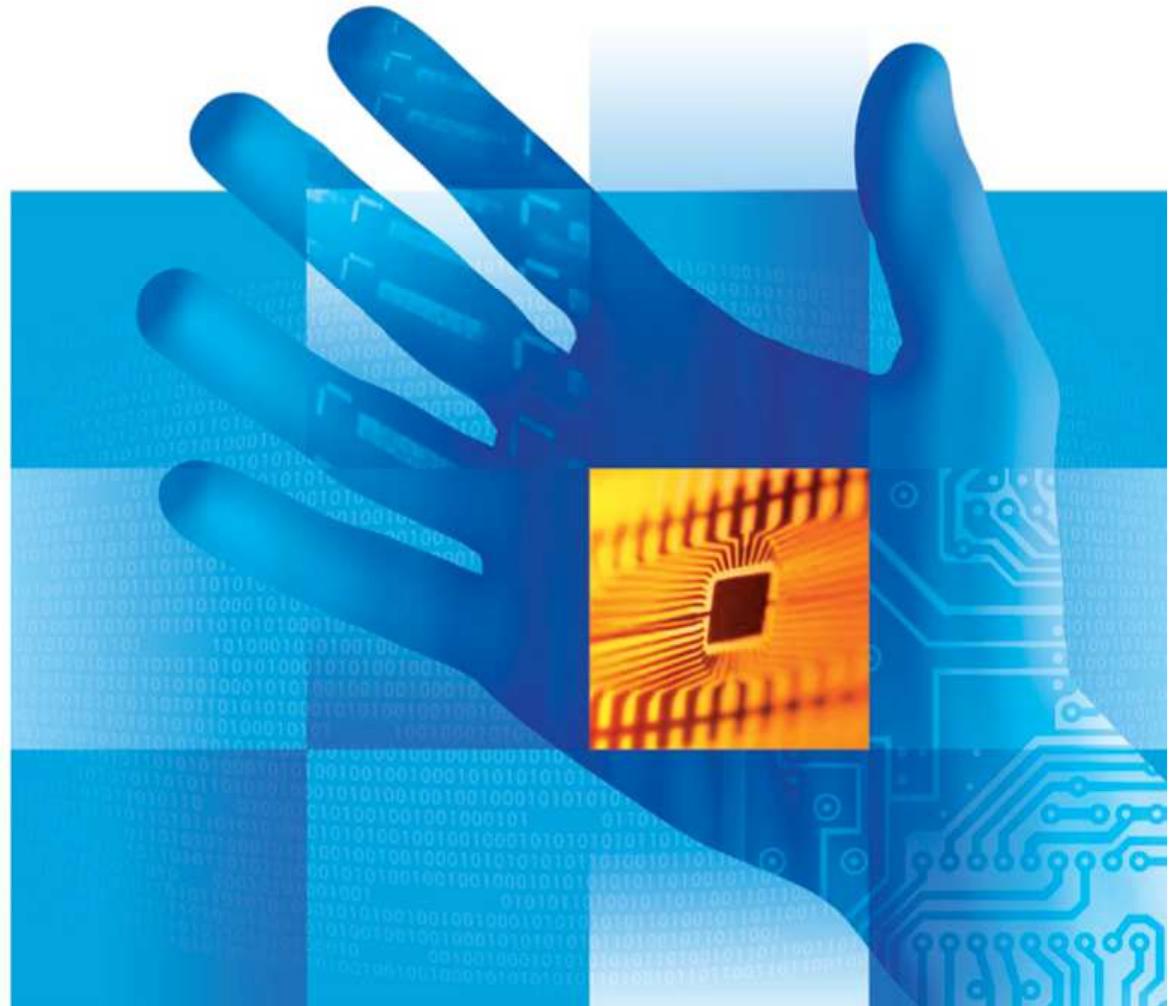




# Senzory a Měření

## 6-Senzory magnetického pole a jejich aplikace

Katedra měřicí a řídicí techniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
VŠB-TUO





## Senzory magnetického pole

Základní typy senzorů magnetického pole:

- Indukční snímače
- Fluxgate
- Magnetorezistory
- Halovy sondy
- Magneto-optické senzory
- Rezonanční magnetometry
- SQUID – Superconducting Quantum Interference Devices
- Jiné principy





## Senzory magnetického pole

Mezi jiné principy, které se využívají víceméně okrajově, můžeme zařadit například:

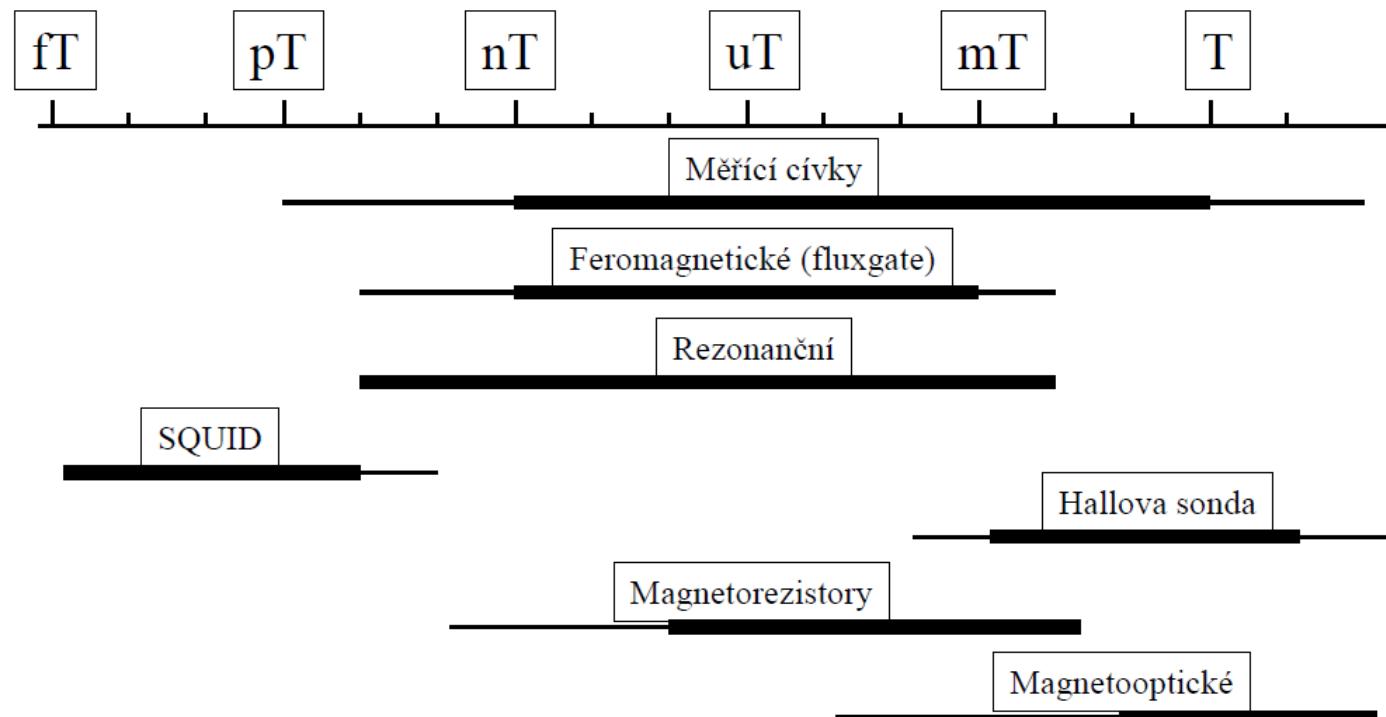
- Magneto-impedanční a magneto-indukční
- Magneto-elastické
- Magnetostriční – piezoelektrické
- Magnetostriční optické





# Senzory magnetického pole

Rozsah citlivosti magnetických senzorů

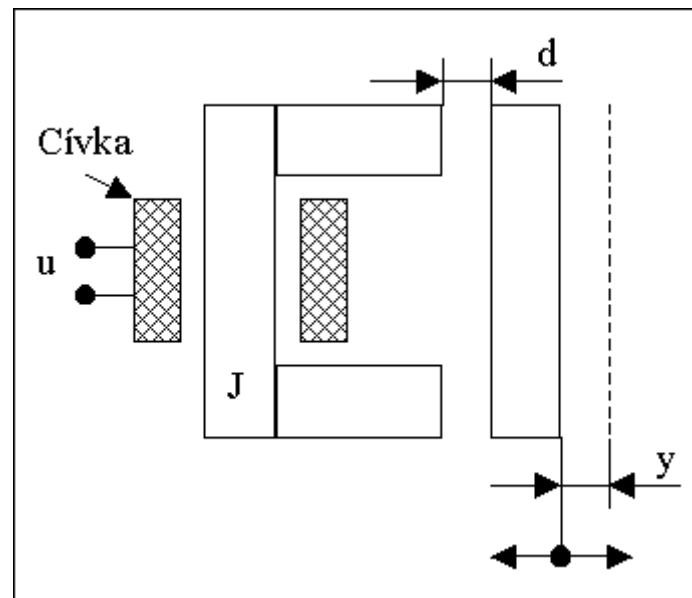




## Indukční snímače

Fyzikální princip

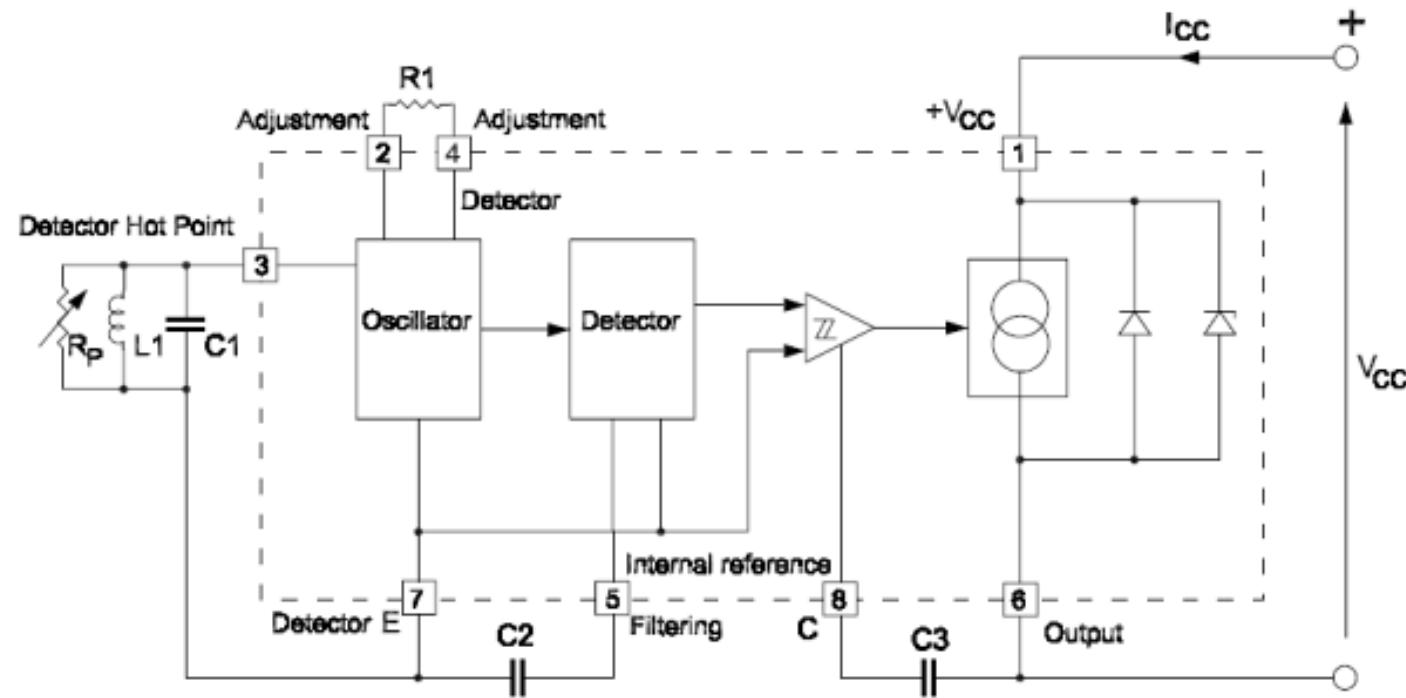
$$U = -\frac{d\phi}{dt}$$





# Indukční snímače

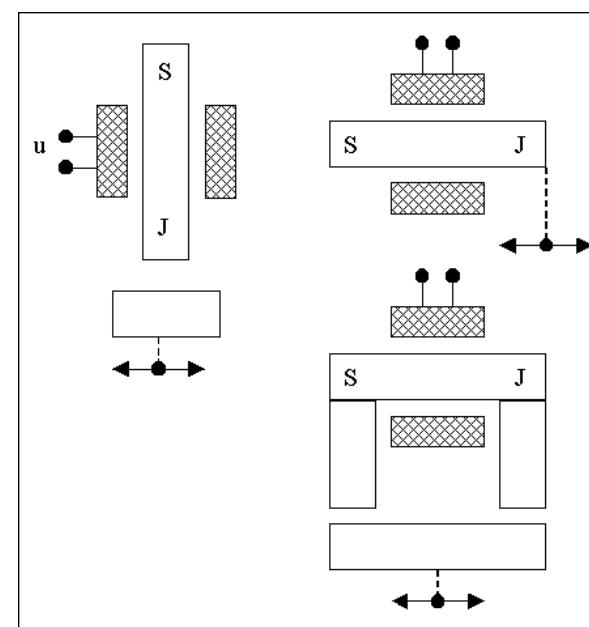
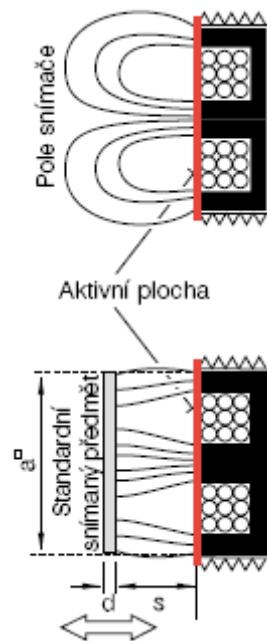
## Blokové schéma





# Indukční snímače

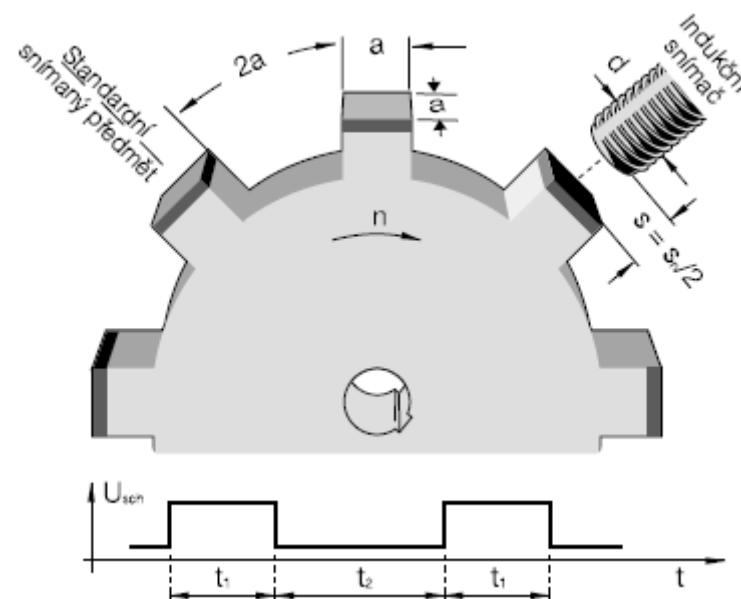
Princip funkce a mechanického uspořádání





# Indukční snímače

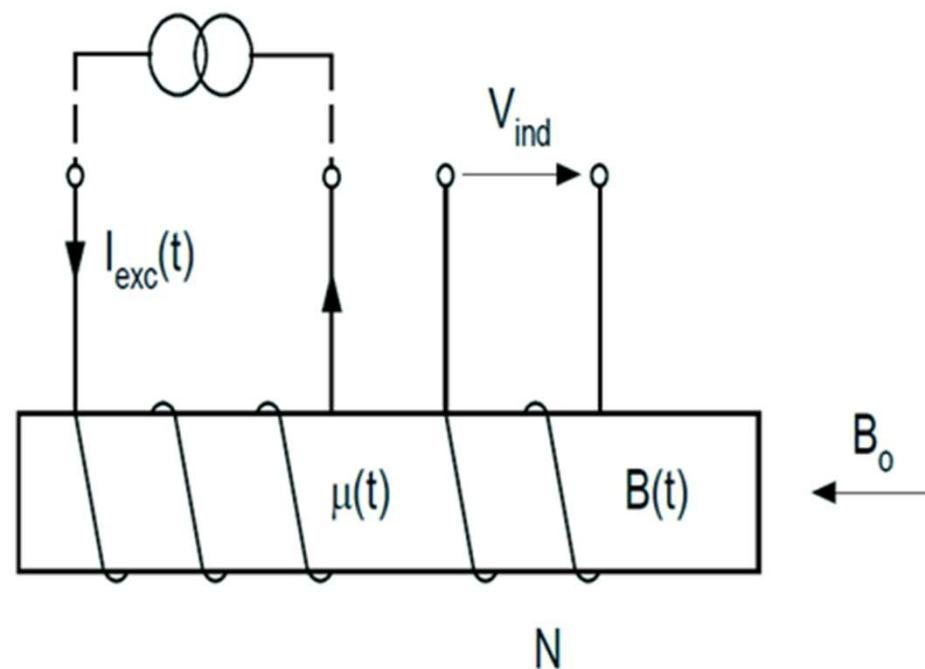
## Příklad aplikace





## Fluxgate

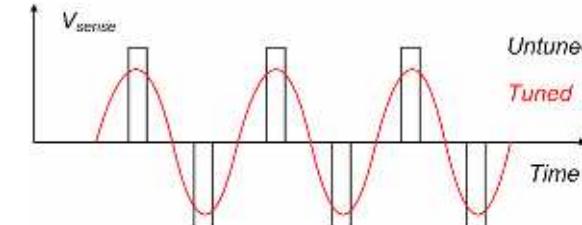
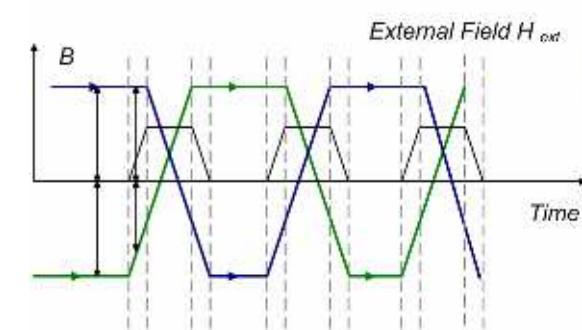
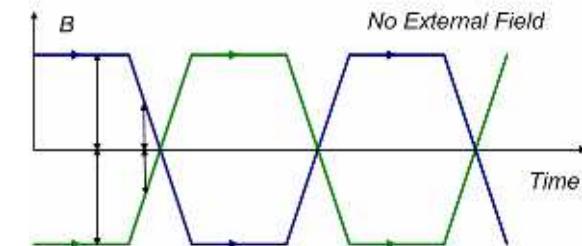
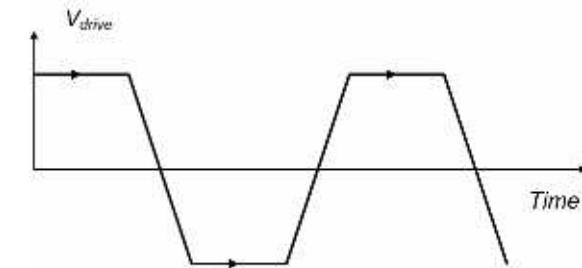
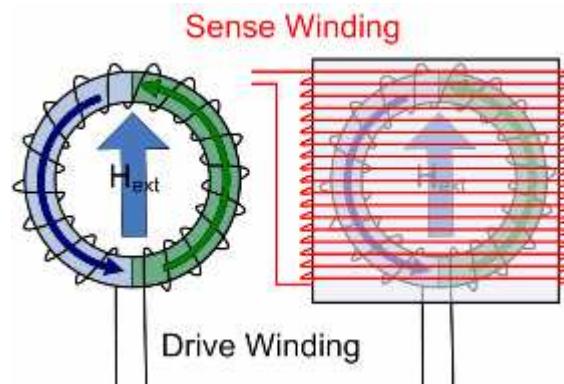
Princip uspořádání senzoru





# Fluxgate

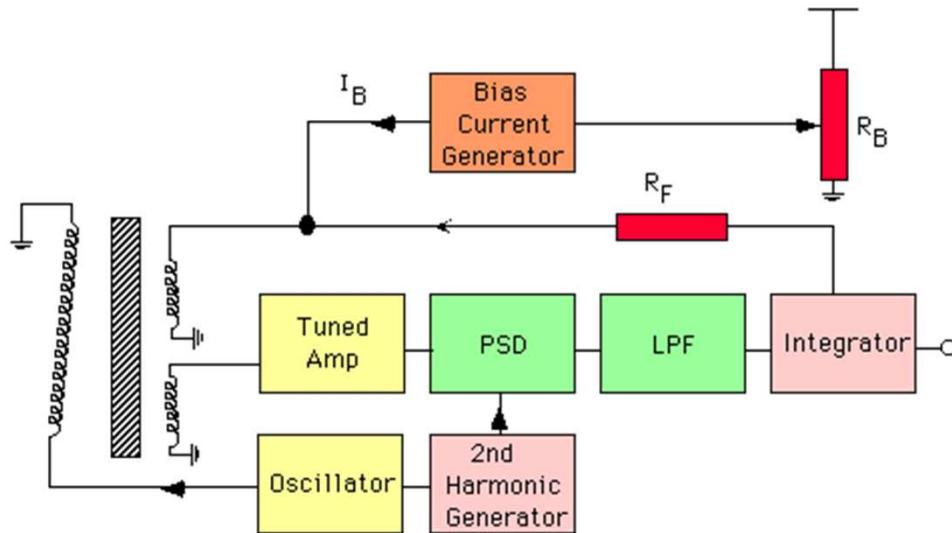
## Princip funkce





# Fluxgate

Blokové schéma





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

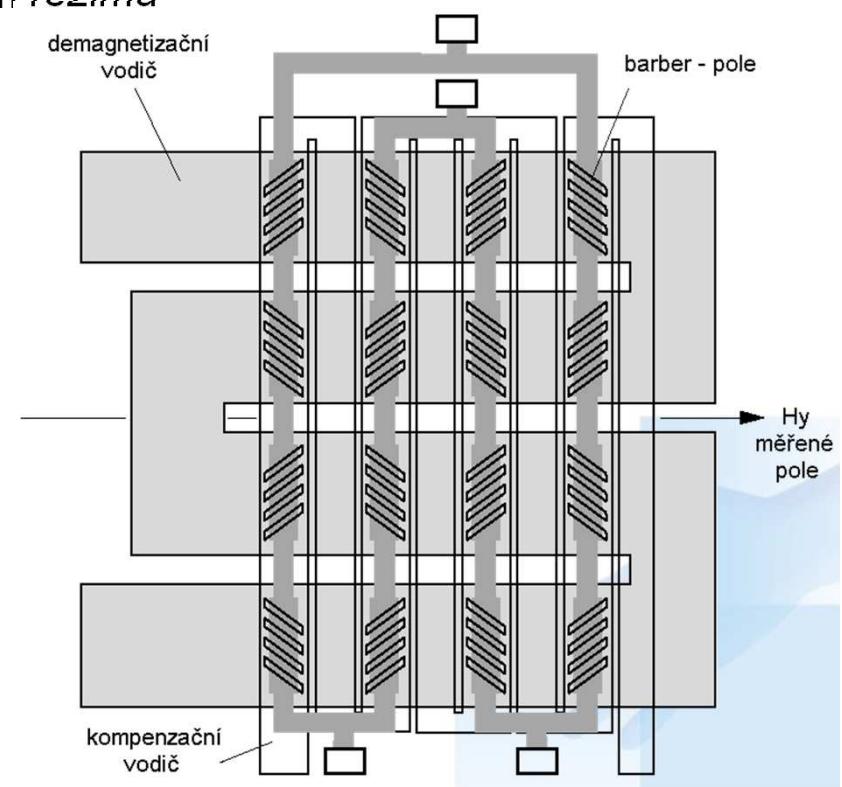
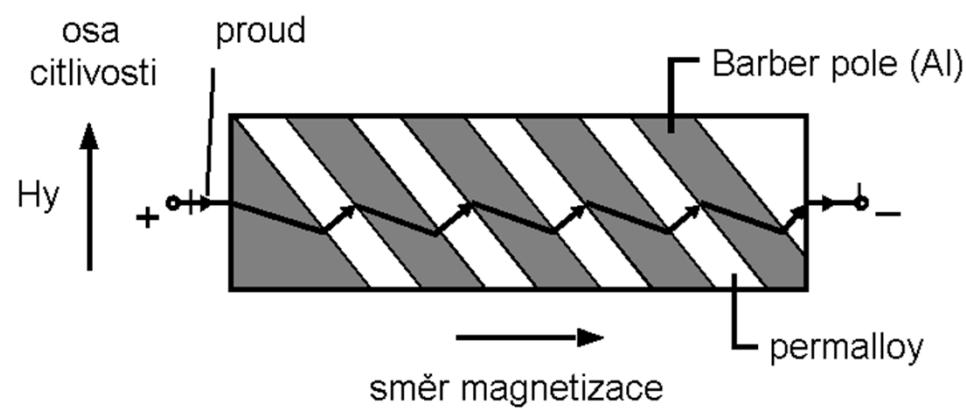
- Magnetorezistivní jev objeven v roce 1857 W. Thomsonem
- Další rozvoj a miniaturizace díky technologie výroby integrovaných obvodů
- Vhodný pro detekci slabých magnetických polí
- Čtecí hlavičky pro magnetická media (spolu s GMR)
- Magnetické kompasy
- Měření změny slabých magnetických polí
- Měření proudu





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

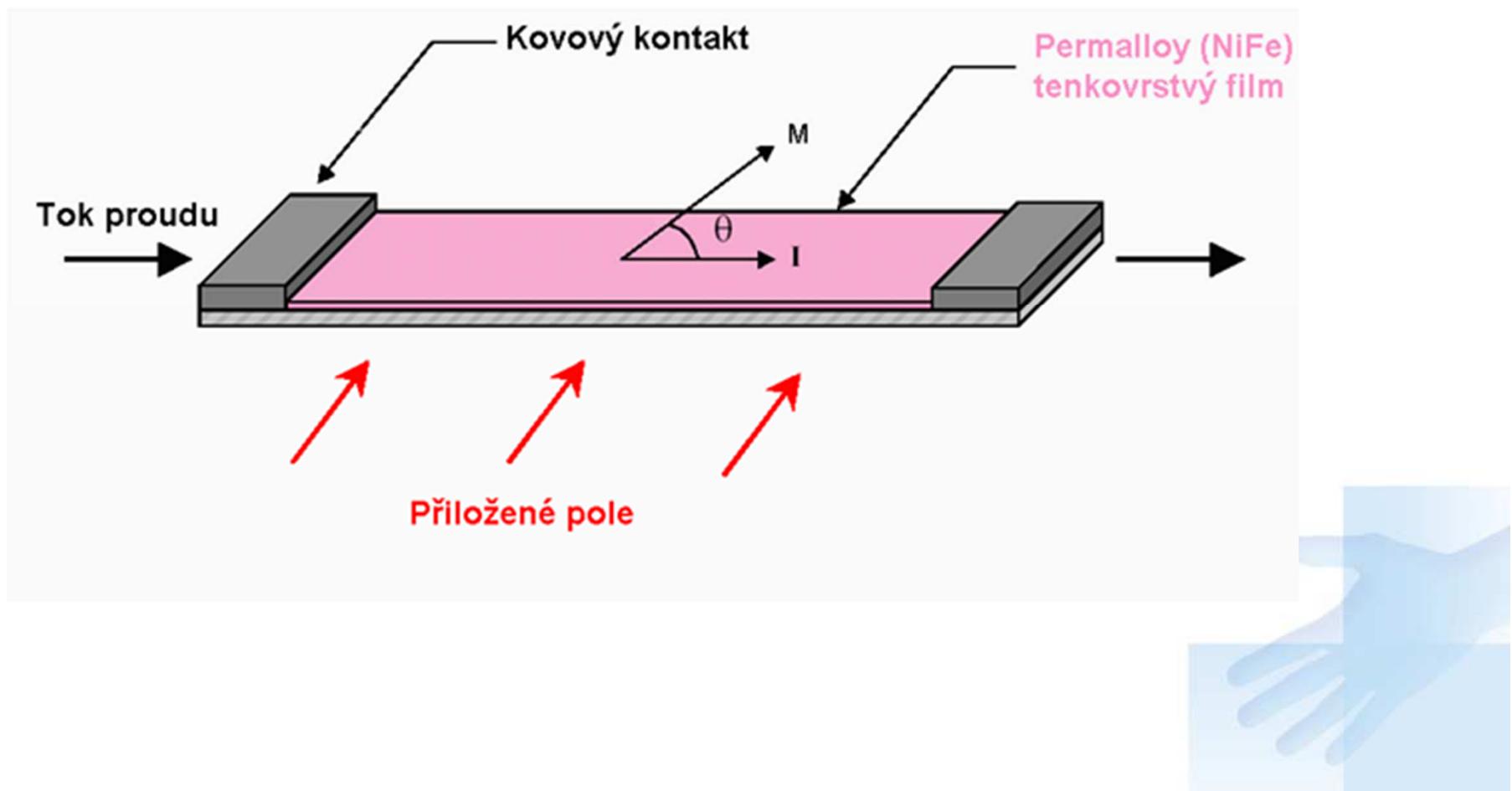
- Můstkové uspořádání senzoru
- Stejnosměrné napájení
- Možnost používat ve zpětnovazebném režimu
- Malé geometrické rozměry
- „Pasivní senzor“





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

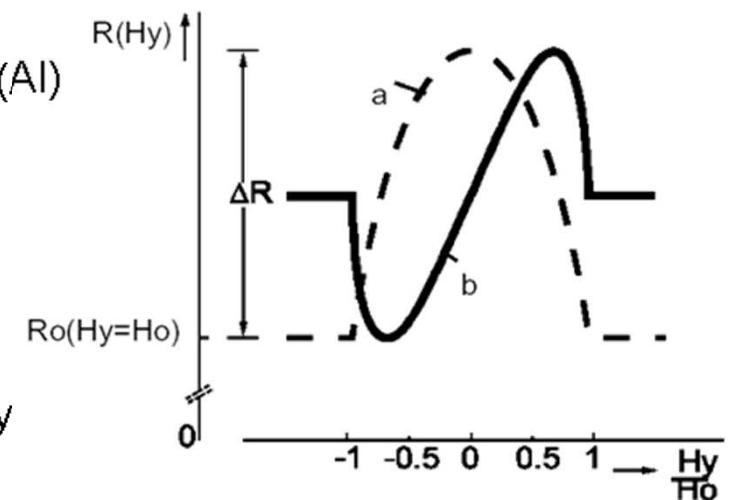
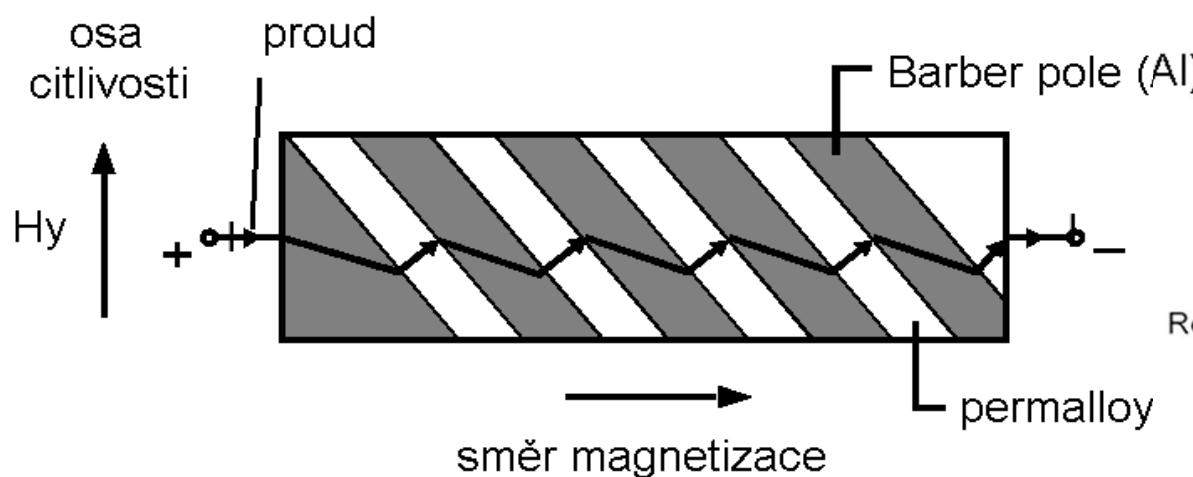
- Tzv. plošný Hallův jev





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

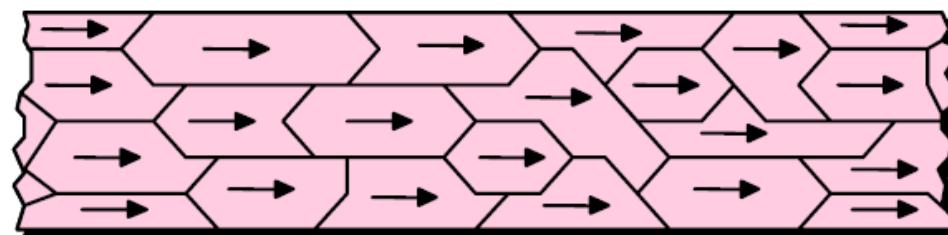
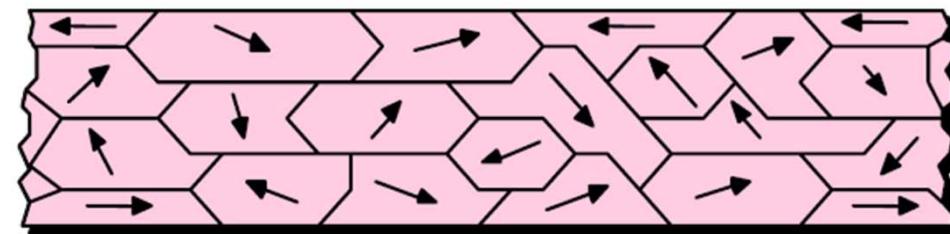
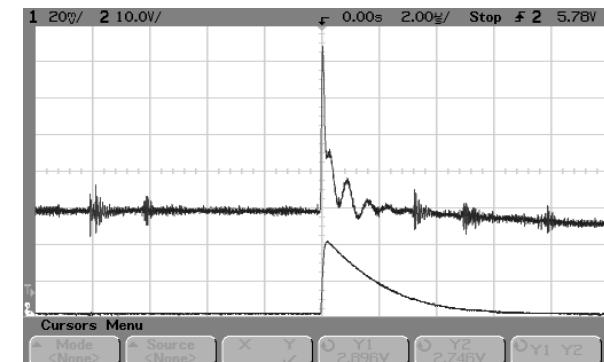
- Tzv. plošný Hallův jev





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

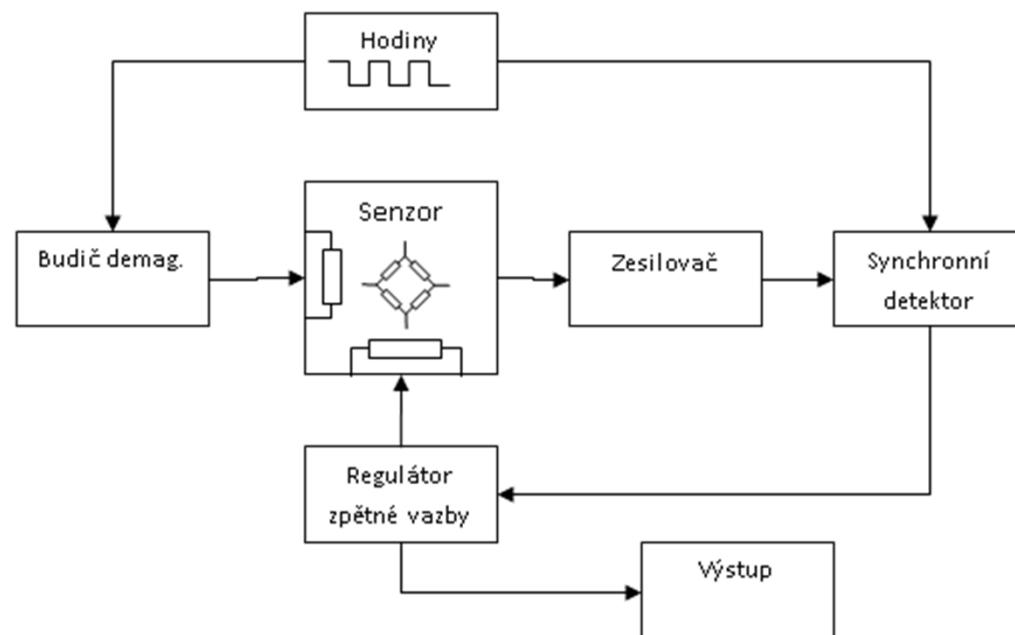
- Velká šířka pásma senzoru (DC - MHz)
- Nutnost periodické demagnetizace
- Možný vznik rušení (vyzařování)





## Anizotropní magneto-rezistor (AMR)

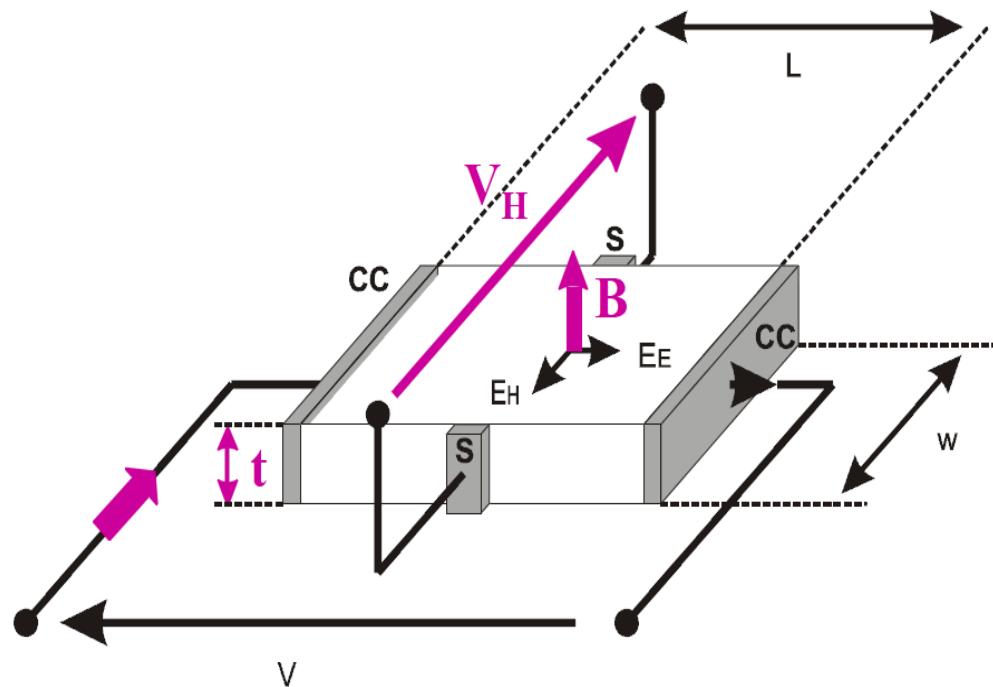
- Blokové Schéma





## Halova sonda

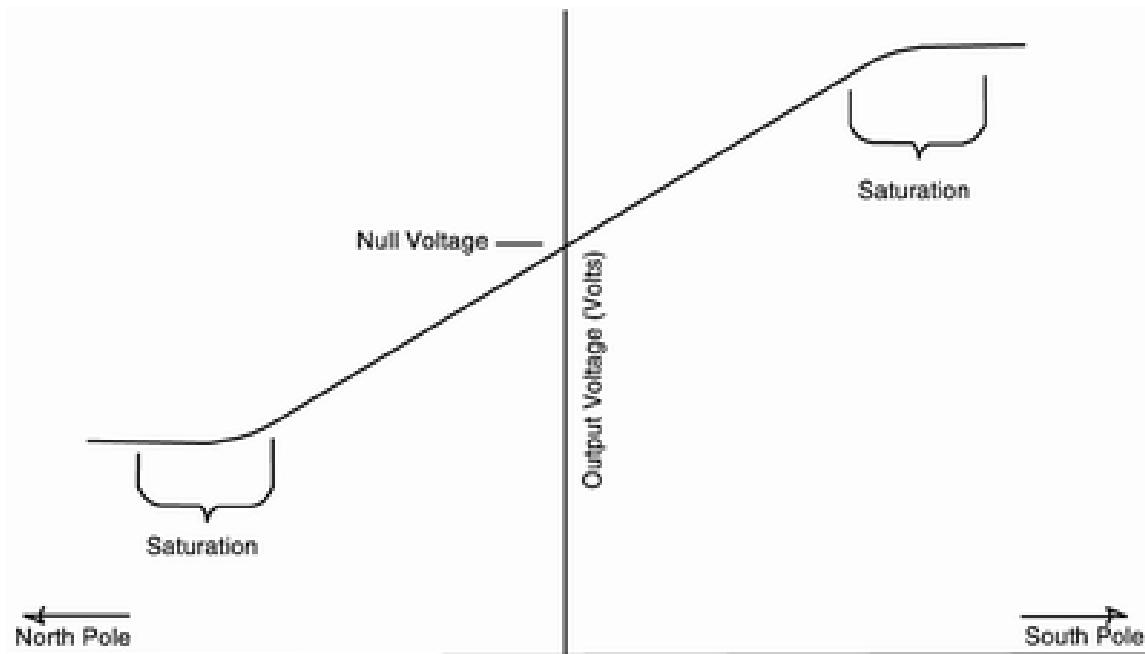
### Princip funkce





## Halova sonda

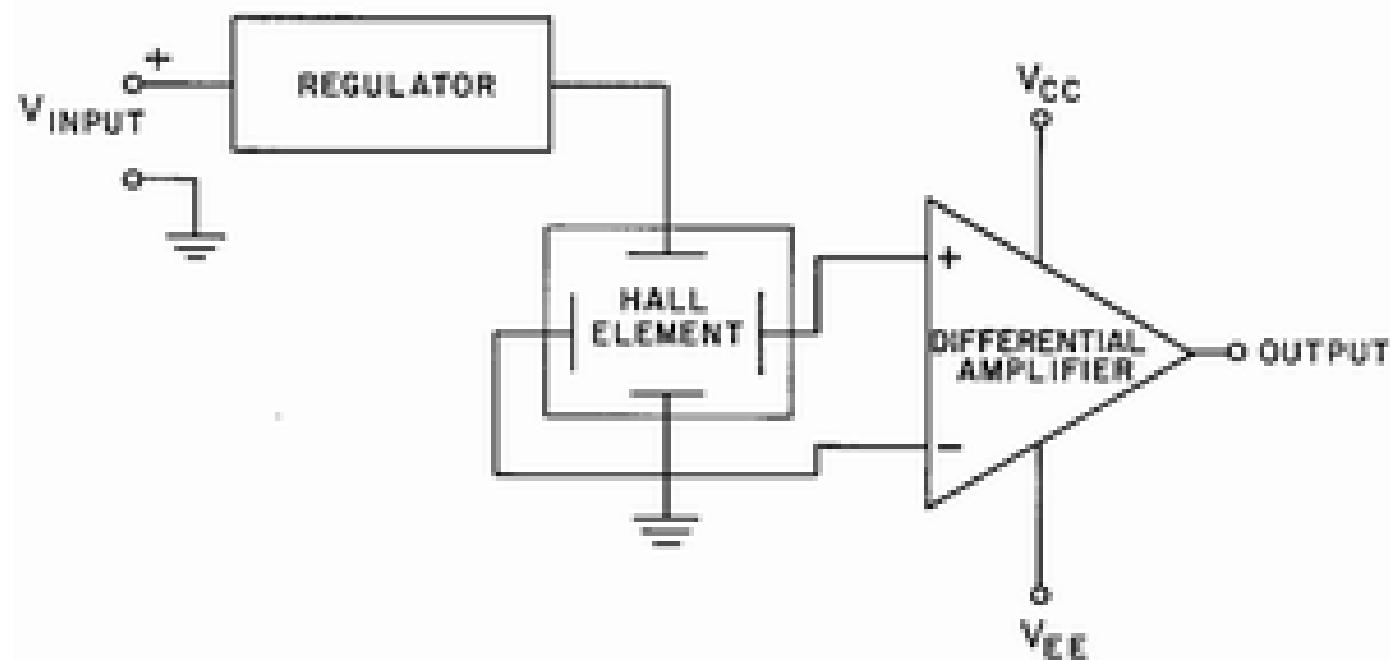
Závislost napětí na magnetickém poli





## Halova sonda

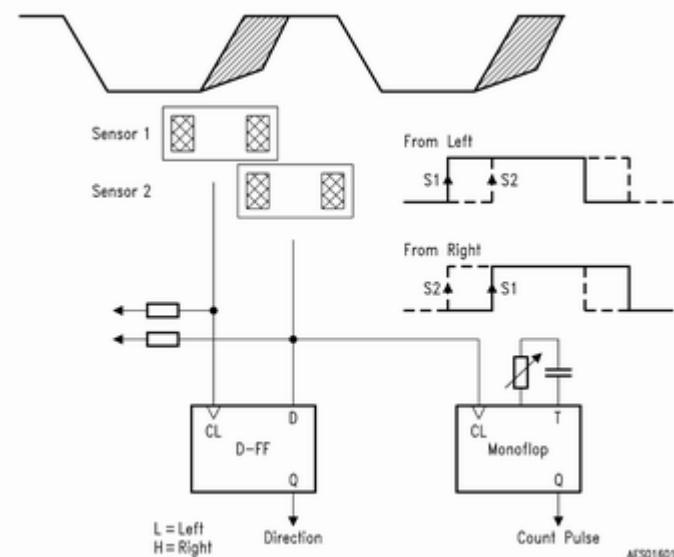
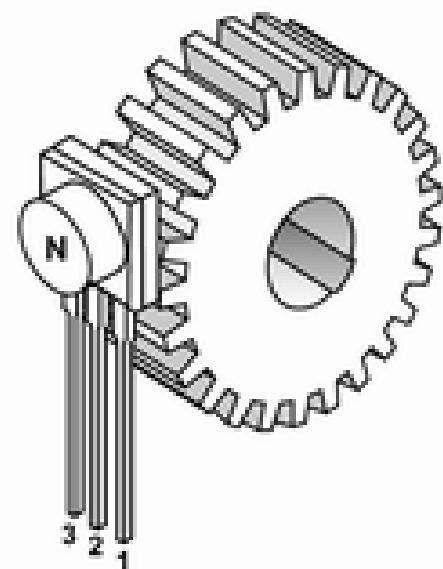
Základní zapojení





# Halova sonda

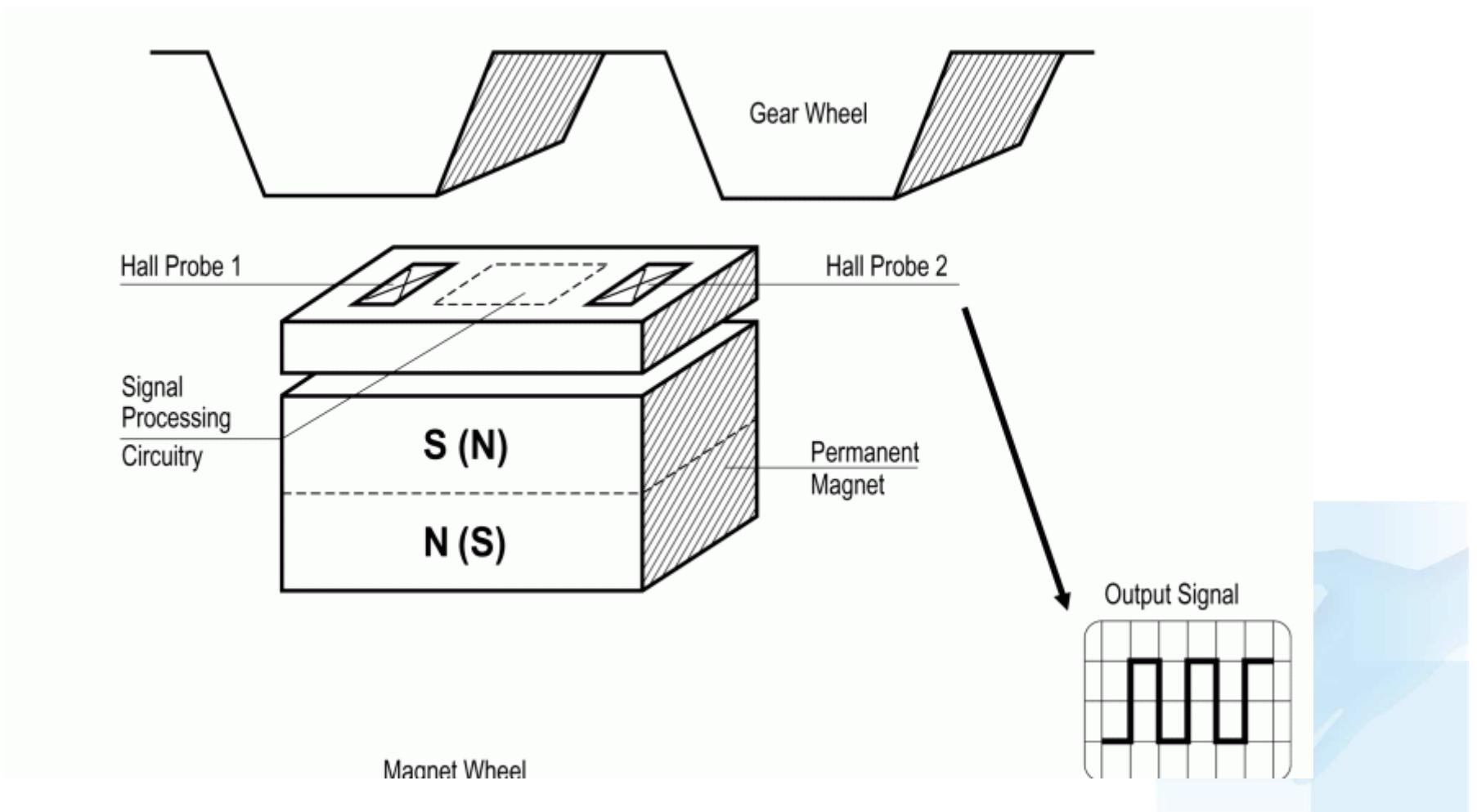
## Příklad aplikace





## Halova sonda

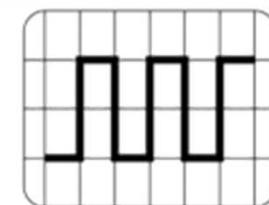
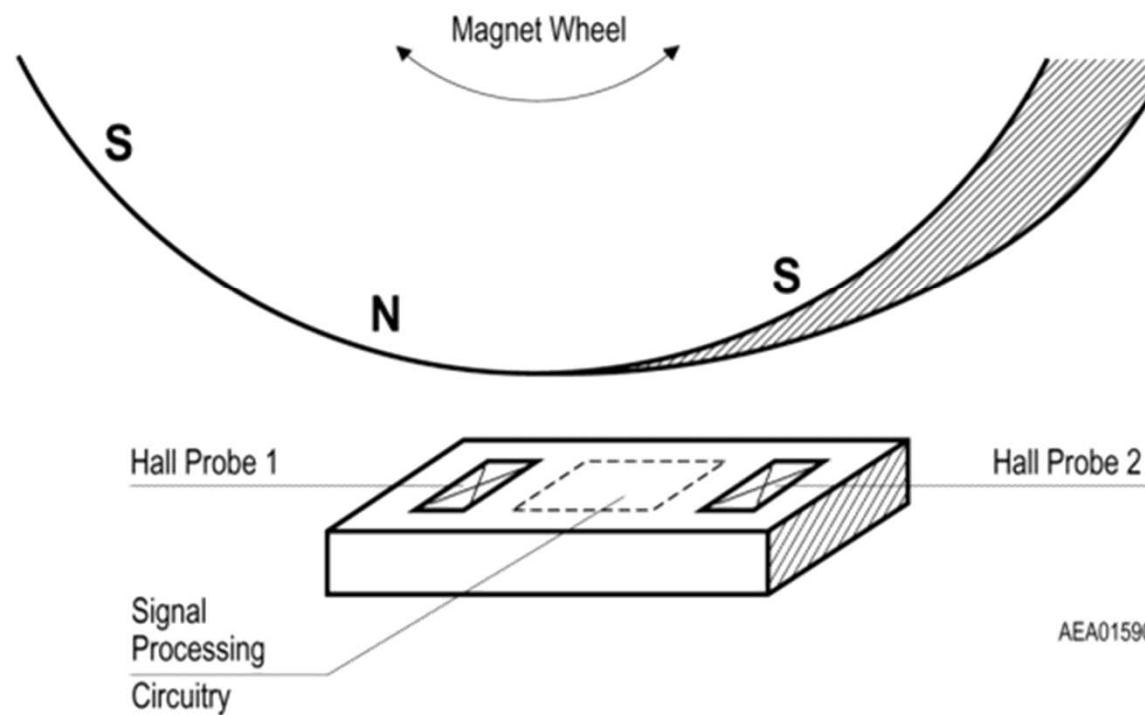
### Příklad aplikace





## Halova sonda

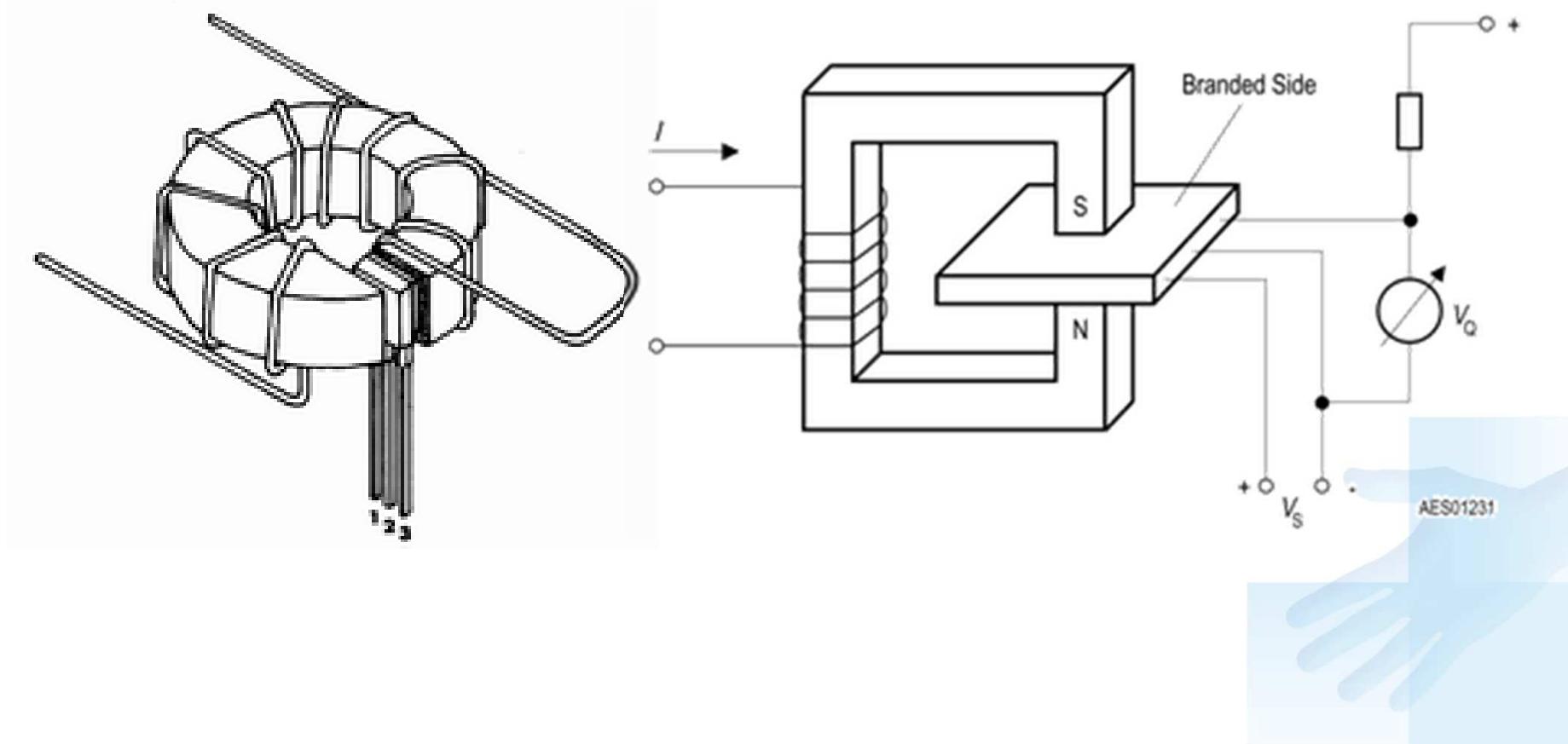
Příklad aplikace





## Halova sonda

Měření proudu

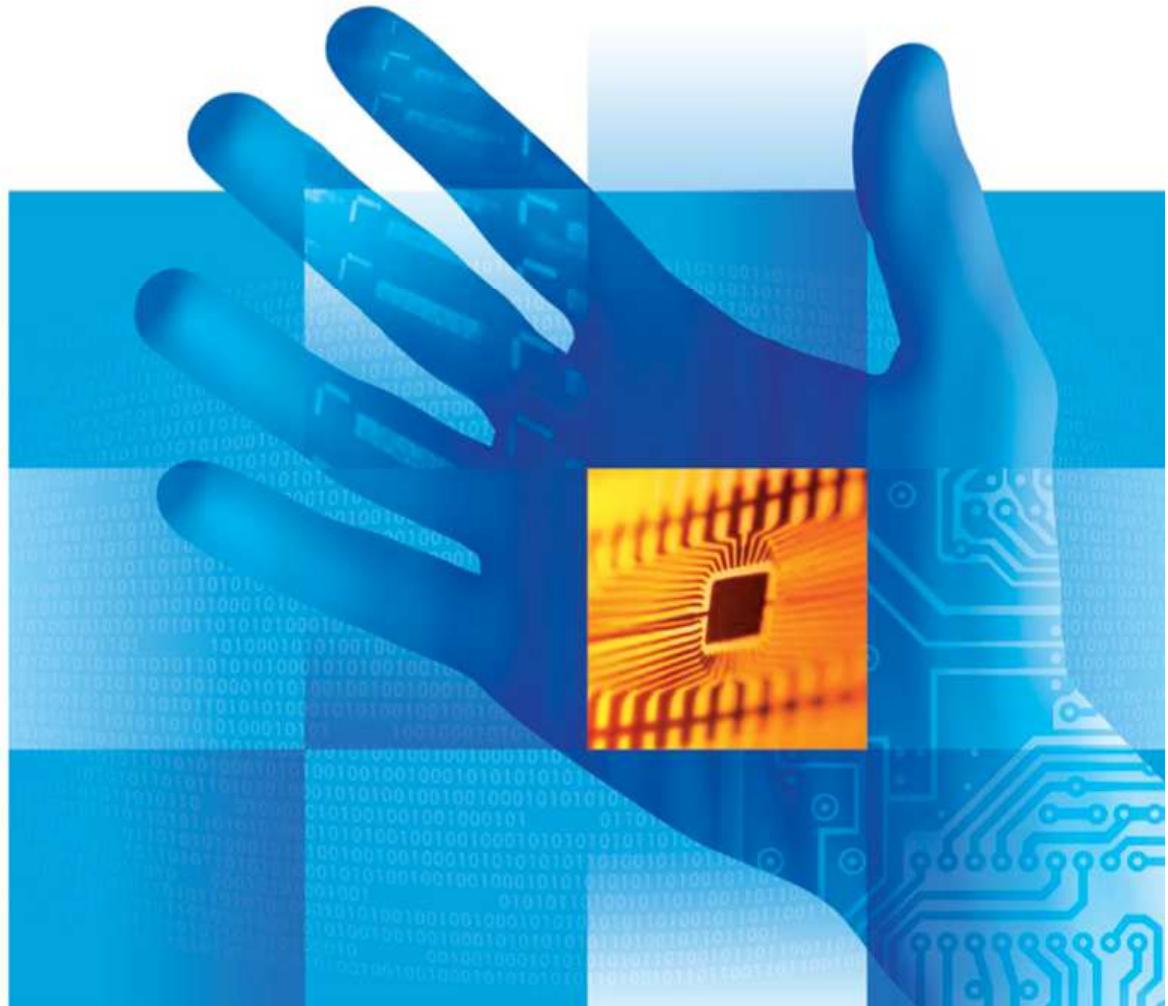




# Senzory a Měření

## 7-Senzory teploty

Katedra měřicí a řídicí techniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
VŠB-TUO



# MĚŘENÍ TEPLITOTY

- teplota je jednou z nejdůležitějších veličin ovlivňujících téměř všechny stavy a procesy v přírodě
- při měření teploty se měří obecně jiná veličina **A**, která je na teplotě závislá podle určitého vztahu  **$A = f(A)$** , který lze číselně vyjádřit
- k měření teploty se využívá celé řady funkčních principů

## Pro praxi je důležité:

- správné rozhodnutí o **výběru teploměru**
- **vhodné zabudování** teploměrného snímače
  - eliminace nebo potlačení rušivých vlivů na údaj snímače

## Rozdělení snímačů teploty:

- **snímače dotykové**
- **snímače bezdotykové**

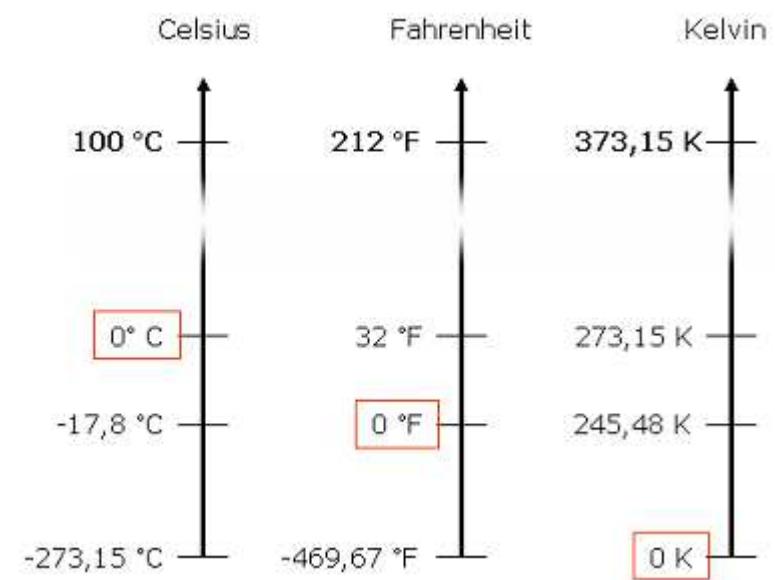
# Stupnice teploty

## Conversions to other scales

The conversion table shows formulas for the conversion between different temperature units.

Conversion table:

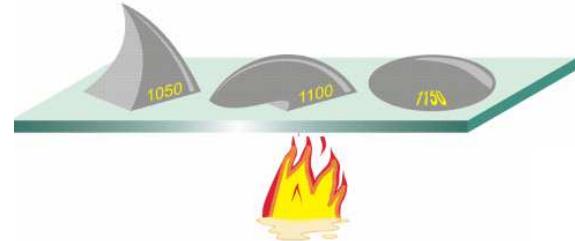
from ↓ to →	Celsius	Fahrenheit	Kelvin
Celsius		$(^{\circ}\text{C} \cdot 9/5) + 32$	$^{\circ}\text{C} + 273.15$
Fahrenheit	$(^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5/9$		$(^{\circ}\text{F} + 459.67) \cdot 5/9$
Kelvin	$^{\circ}\text{K} - 273.15$	$(^{\circ}\text{K} \cdot 1.8) - 459.67$	



# Přehled technických teploměrů

<i>Skupina teploměrů</i>	<i>Typ teploměru</i>	<i>Fyzikální princip</i>	<i>Teplotní rozsah [°C]</i>	
Dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	-5	+500
	tenzní	změna tenze par	-40	+400
	kapalinový	změna objemu	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
Elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrické jev	-200	+1 700
	odporové kovové	změna elektrického odporu	-250	+1 000
	odporové polovodičové	změna prahového napětí	-200	+400
Speciální teploměry	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1 300
	teploměrné barvy	změna barvy	+20	+1 000
	kapalné krystaly	změna orientace	0	+ 300
Bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého teplotního záření	-40	+5 000
	monochromatické pyrometry	zachycení úzkého svazku záření	+100	+3 000
	poměrové pyrometry	srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	+700	+2 000
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	-30	+1 200

# Speciální teploměry



- **teploměrná tělíska**

- využívá se keramické hmoty s definovaným bodem měknutí
- dochází k deformaci teploměrného tělíska ve tvaru šikmého jehlanu

- **teploměrné barvy**

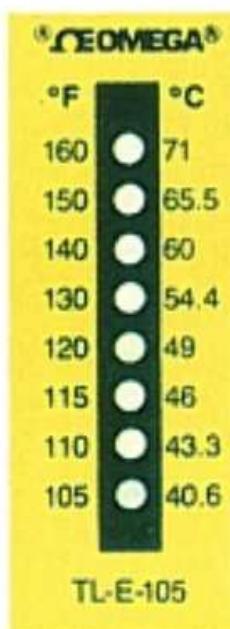
- na bázi **kapalných krystalů** (termochromní kapalné krystaly)
  - kapalné krystaly cholesterického typu, u nichž dochází k vratným změnám orientace se změnou teploty
- na bázi organických **molekulárních komplexů**
  - dochází ke změně barvy při tzv. teplotě zvratu



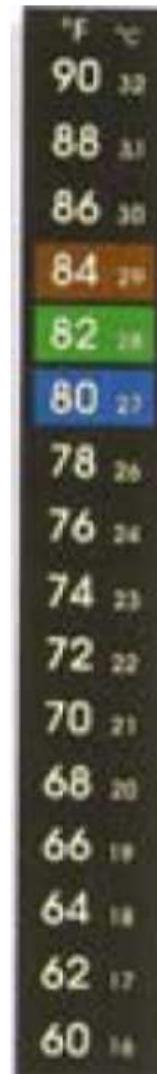
## Použití speciálních teploměrů:

- pro měření **povrchové teploty** těles
- k přípravě **termochromních tiskových barev** např. pro etikety (termocitlivá látka je uzavřena do polymerní mikrokapsle)
- pro jednorázové změření teploty
- nejsou vhodné jako čidla regulátorů v řídicích obvodech

# Ukázky aplikace termochromních barev samolepicí štítky



- nevratná změna barvy při překročení mezní teploty



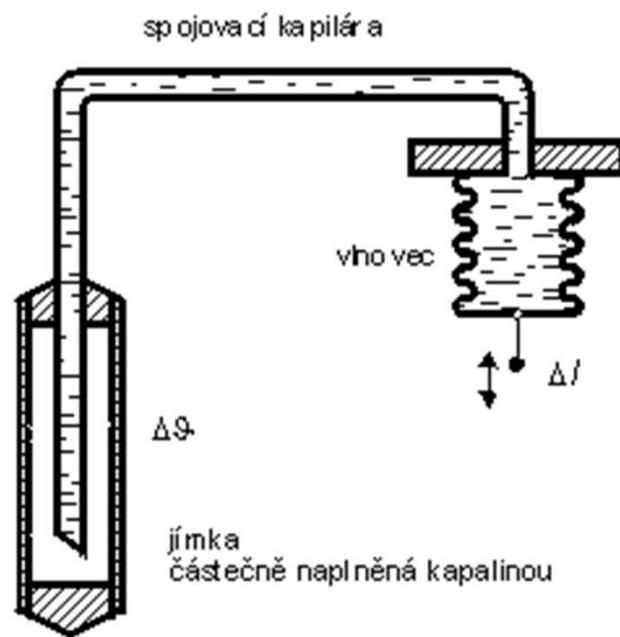
- vratná změna barvy při překročení mezní teploty
- využití na etiketách některých výrobků (např. lahvové pivo)

# Teploměry tenzní

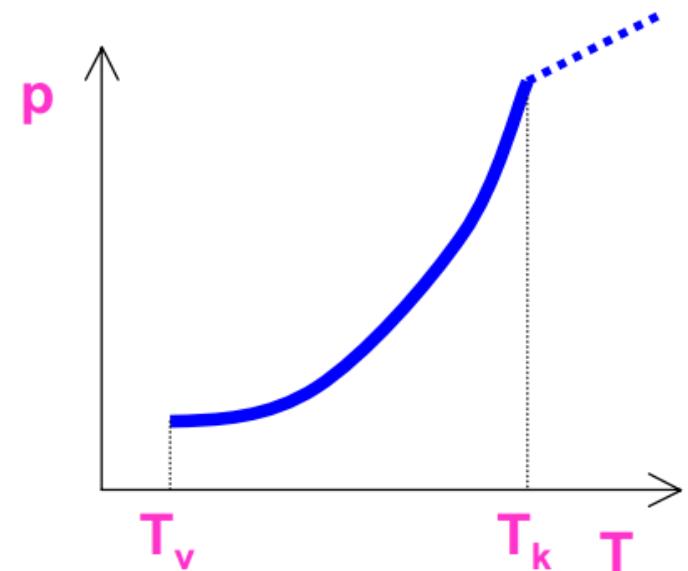
- využívají závislosti tenze par na teplotě, kterou je možno vyjádřit např. Antoineovou rovnicí:

$$\log p = A - \frac{B}{t + C}$$

## Provedení tenzního teploměru:



## Statická charakteristika:



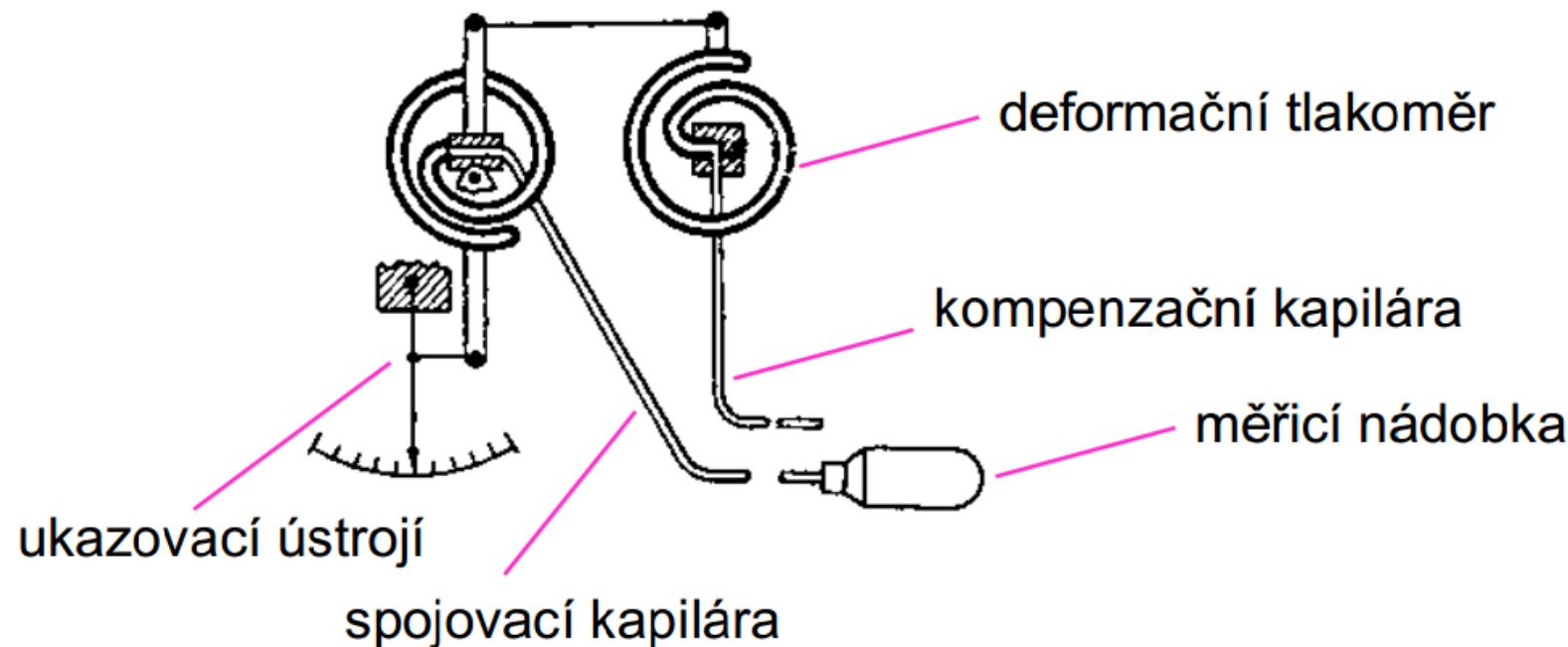
## Používané náplně:

propan (-40 až 90) °C  
ethylether (35 až 190) °C  
toluen (120 až 300) °C  
a další . . .

# Teploměry kapalinové

- měření změn objemu při změně teploty:  $V_t = V_0 (1 + \beta \cdot t)$
- běžně používané jsou skleněné teploměry, nejčastěji plněné rtutí

**Provedení kapalinového teploměru pro provozní použití:**



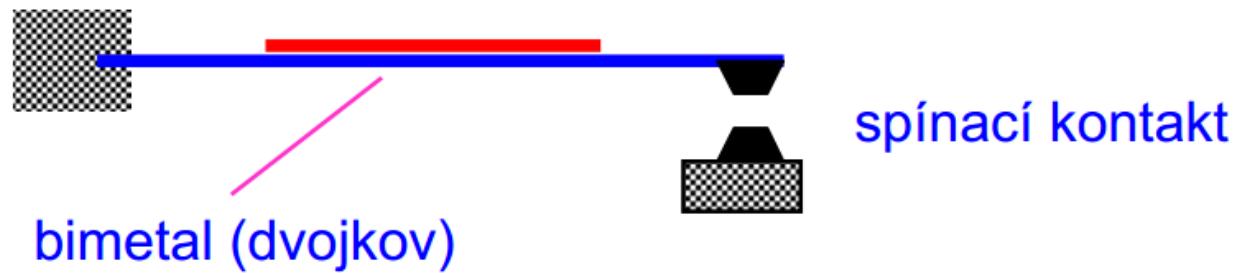
**Používané náplně:**

rtuť (-30 až 500) °C, xylen (-40 až 400) °C, methanol (-40 až 150) °C aj.

# Dvojkovové senzory teploty

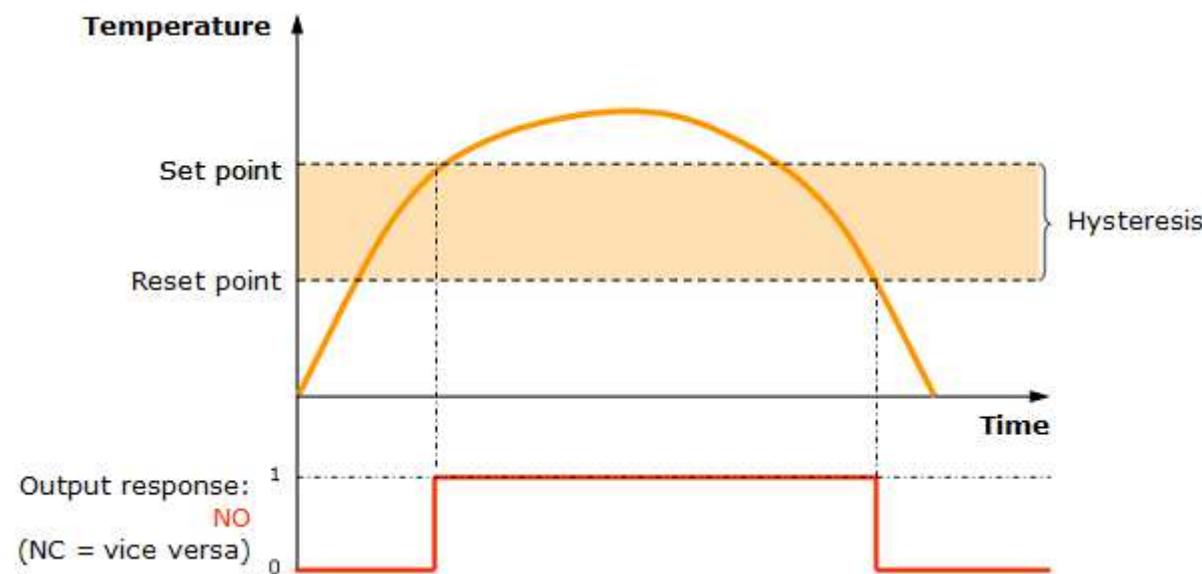
- teploměrným čidlem je **bimetal** (dvojkov)
- bimetalický pásek je zhotovený ze dvojice pevně spojených kovových materiálů s rozdílným teplotním součinitelem roztažnosti

Provedení bimetalového teploměru pro spínací účely:



- pro zvýšení citlivosti bývá bimetalový pásek stočen do spirály nebo šroubovice
- bimetalových senzorů se nejčastěji využívá pro dvoupolohovou regulaci teploty

# Hystereze senzoru s kontaktním výstupem



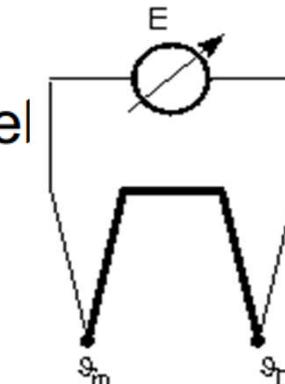
# **Elektrické teploměry**

- **termoelektrické snímače teploty**
  - **odporové snímače teploty**
- 
- transformují teplotu na elektrický signál  
(napětí, proud, odpor)
  - nejčastěji používané typy senzorů
    - pro provozní měření teploty
    - pro čidla regulátorů při automatickém řízení teploty
    - pro moderní přenosné teploměry

# Termoelektrické senzory teploty

- termoelektrické senzory jsou založeny na **Seebeckovu jevu** (převod tepelné energie na elektrickou)
- termoelektrický článek** je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na obou koncích spolu vodivě spojeny
- jestliže teplota  $t_m$  měřicího spoje bude různá od teploty  $t_0$  srovnávacího spoje, vzniká **termoelektrické napětí** a obvodem prochází proud
- v zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$E = \alpha_{AB} t_m + \alpha_{BA} t_0 = \alpha_{AB} (t_m - t_0)$$



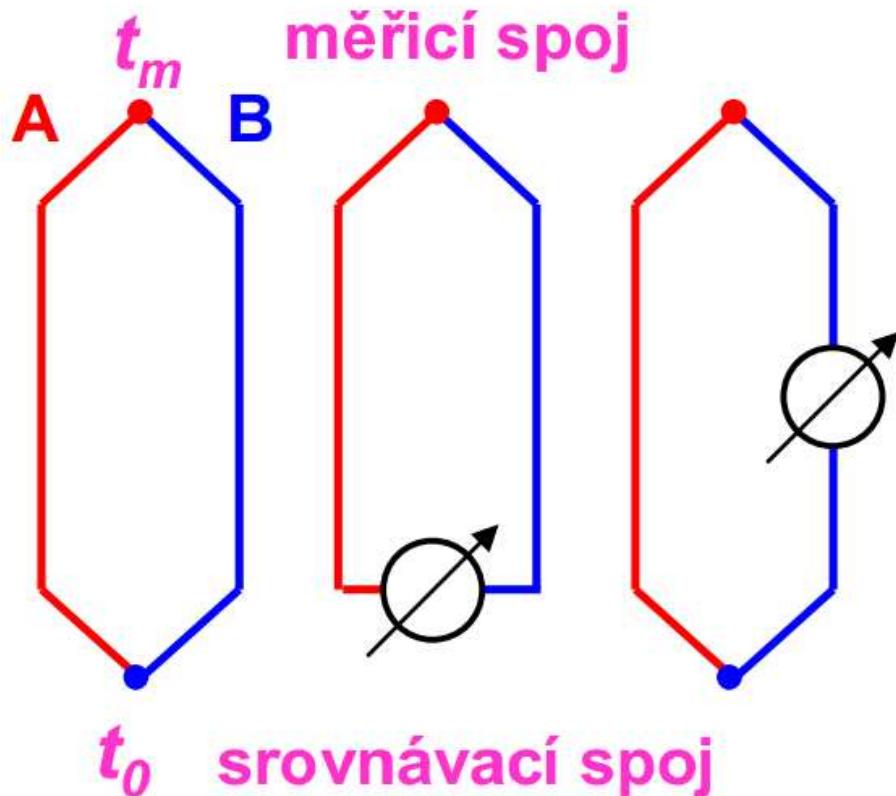
$\alpha_{AB}$  je koeficient závislý na materiálech použitých kovů a platí  $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$

Uvedený vztah platí jen pro úzké rozmezí teplot. Pro přesnější vyjádření se používá vztahu:

$$E = \sum_{i=0}^n a_i \Delta t^i$$

$n = 2$  až  $14$  podle požadované přesnosti

# Měřicí obvod termočlánku



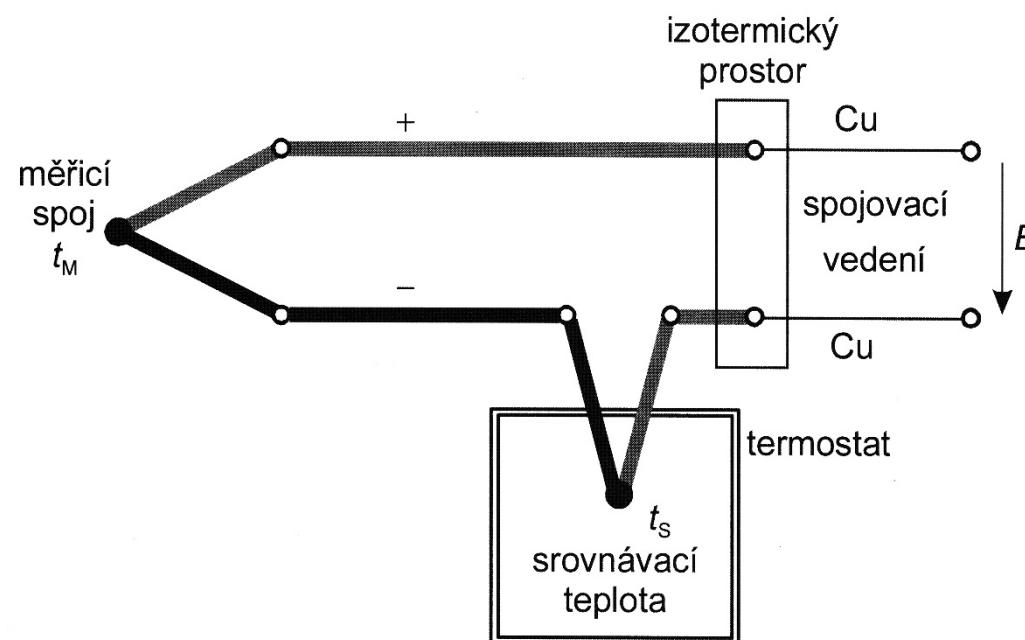
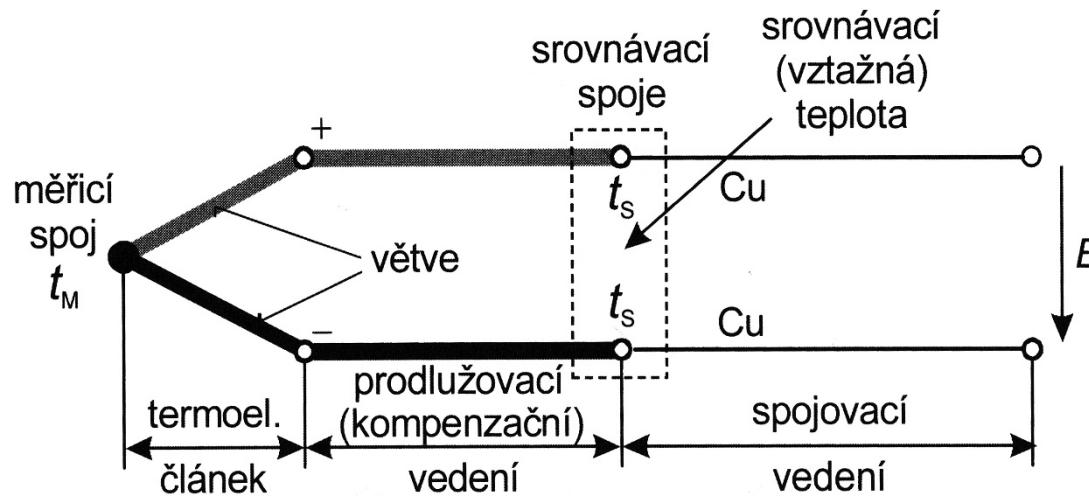
- dva spojené kovové vodiče **A** a **B** navzájem spolu spojené
  - **měřicí spoj**
  - **srovnávací spoj**
- pro správnou funkci snímače je nutné aby teplota  $t_0$  srovnávacího spoje byla konstantní, nebo aby vliv termoelektrického napětí tohoto spoje byl kompenzován

## Měření termoelektrického napětí:

- měřicí přístroj se zapojí tak, že se rozpojí srovnávací spoj
- měřicí přístroj se zapojí do jedné větve termočlánku

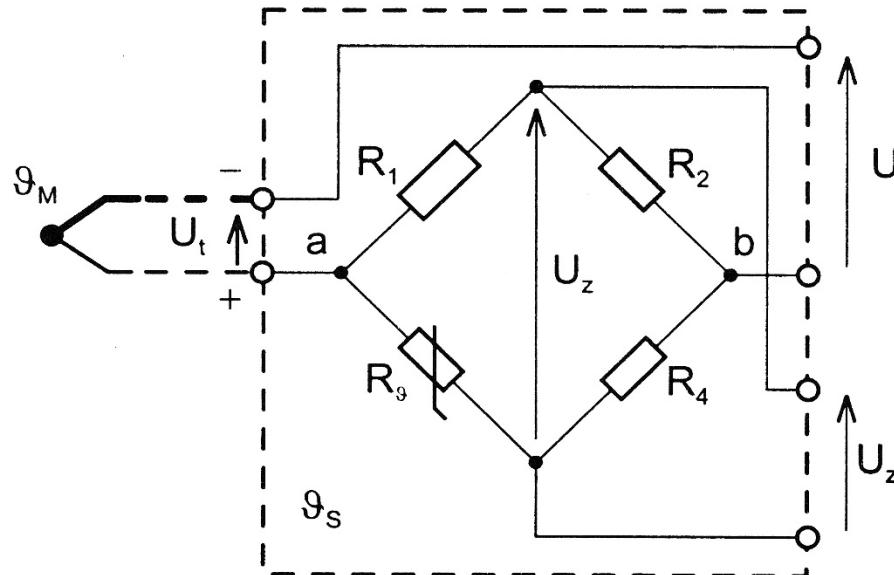


## Termočlánek – řešení srovnávacího konce





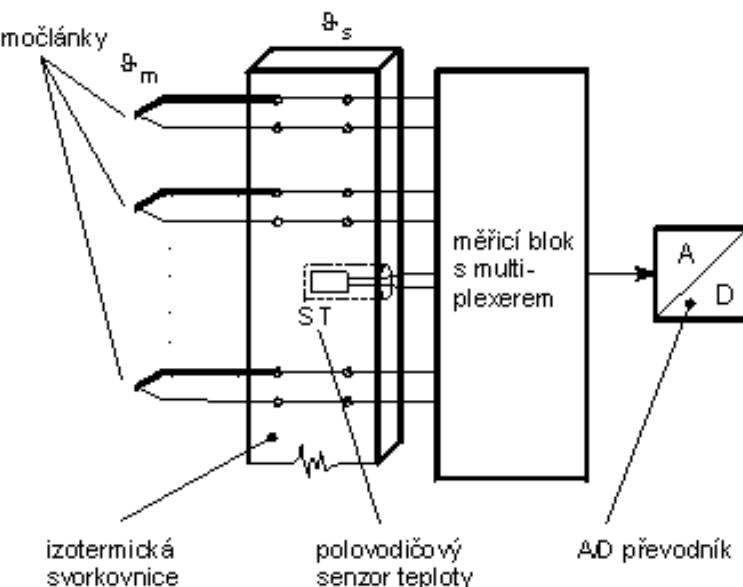
## Termočlánek – kompenzační krabice





## Termočlánek – řešení srovnávacího konce

- V současné době se kompenzační krabice ani termostaty srovnávacích konců termočlánků fyzicky (jako výrobky) nepoužívají, ale používá se princip kompenzační krabice:
- měří se teplota připojovacích svorek vyhodnocovacího přístroje (teplota okolí), podle které se vytváří korekční napětí přičítané (odečítané) k termoelektrickému napětí termočlánku.



# Přehled vlastností termočlánků

Materiál na výrobu termočlánků by měl vykazovat:

- co největší a lineární přírůstek termoelektrického napětí s teplotou
- stabilitu údaje při dlouhodobém provozu
- odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům

Páry materiálů pro vytvoření termočlánků jsou normalizovány.

Některé typy termočlánků jsou uvedeny v tabulce:

Označení a název termočlánku	T měď-měďník	J železo-měďník	K niklchrom-nikliník	S platinarhodium-platina
Použitelnost trvale krátkodobě	(-200 až +400) °C +600 °C	(-200 až +600) °C +900 °C	(-50 až +1000) °C +1300 °C	(0 až +1300) °C +1800 °C
Termoelektrické napětí (mV/100 °C)	4,25	5,37	4,8	0,64
Odolnost v oxidačním prostředí	malá	malá	velká	velká
Odolnost v redukčním prostředí		velká	malá	malá

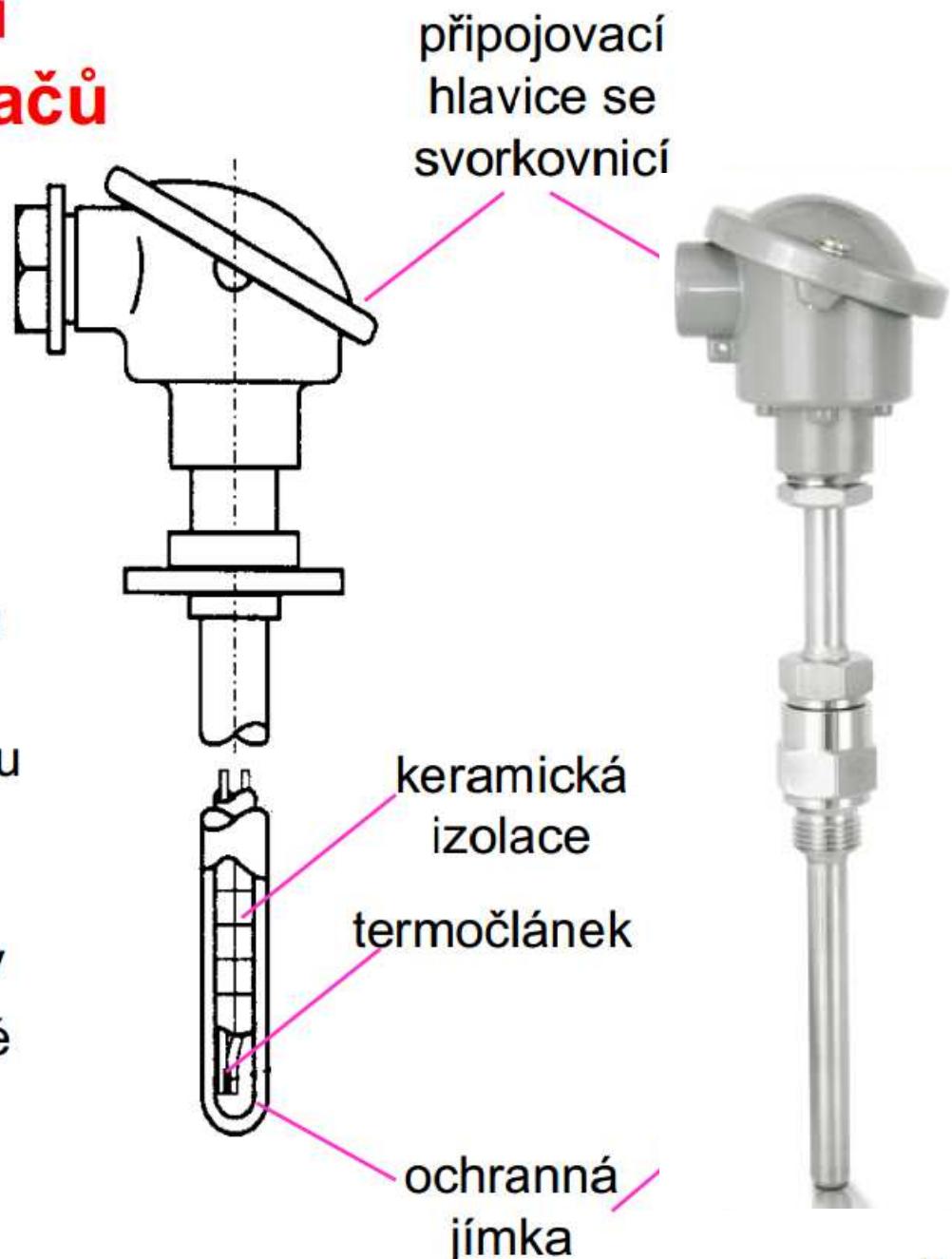
# Konstrukční uspořádání termoelektrických snímačů

## Termoelektrický snímač s ochrannou jímkou

⇒ snímač pro provozní aplikace

Termoelektrický článek je umístěn v ochranné armatuře

- zabraňuje jeho mechanickému poškození
- chrání před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy
- zhoršuje však jeho dynamické vlastnosti





# Senzory teploty

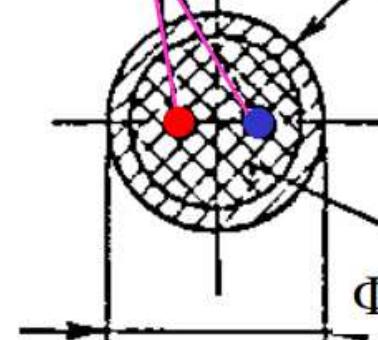


# Plášt'ový termočlánek

Termočlánkové dráty jsou uloženy v niklové nebo nerezové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3$

termočlánkové  
dráty

kovová kapilára

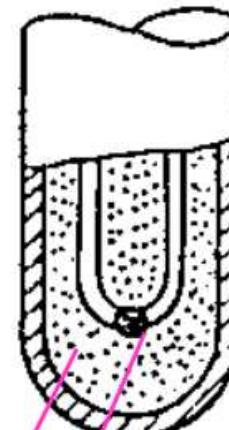


$\Phi$  0,5 mm

rukoujet'

## Přednosti plášt'ových termočlánků:

- snadné tvarové přizpůsobení  
    ⇒ možnost měření na těžko  
    přístupných místech
- malá tepelná kapacita
- velmi dobrý přestup tepla  
    ⇒ příznivé dynamické vlastnosti



termočlánek

keramický  
prášek



kovová  
kapilára

# Ukázky provedení termočlánkových snímačů



# Měřicí obvody pro termoelektrické senzory

## Požadavky na měřicí obvody:

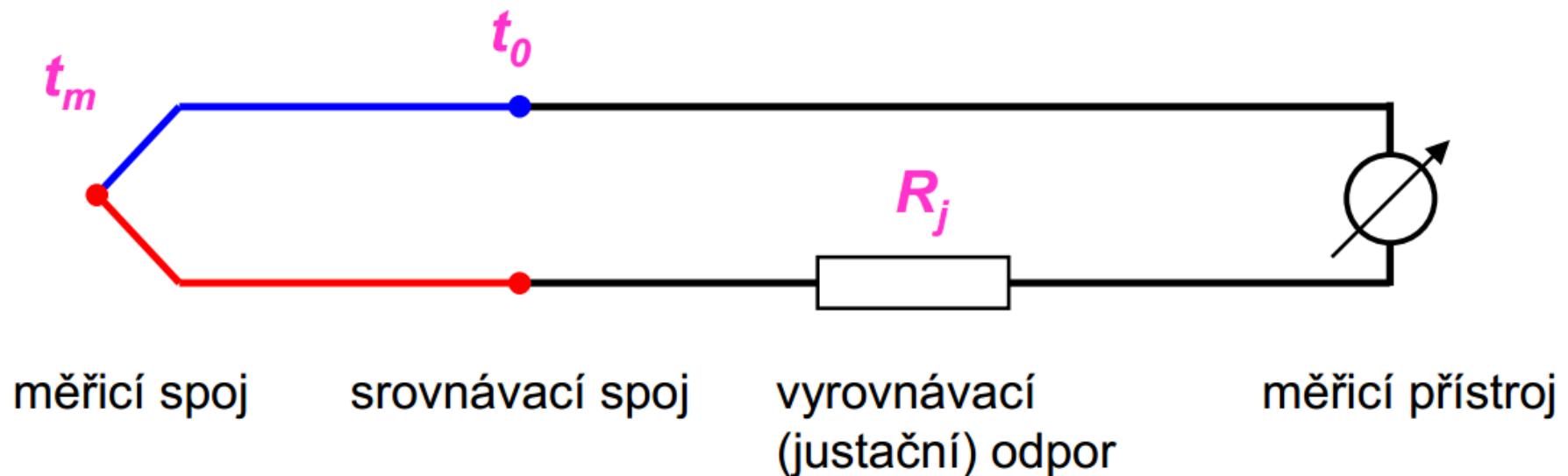
- minimalizace vlivu kolísání teploty srovnávacího spoje
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- potlačení rušivých signálů

## Potlačení vlivu teploty srovnávacího spoje:

- umístěním srovnávacího spoje **do termostatu**
  - v laboratoři při 0 °C
  - u provozních aplikací při 50 °C
- analogovými **kompenzačními obvody**
  - kompenzační krabice
- u číslicových měřicích systémů **číslicovou korekcí**

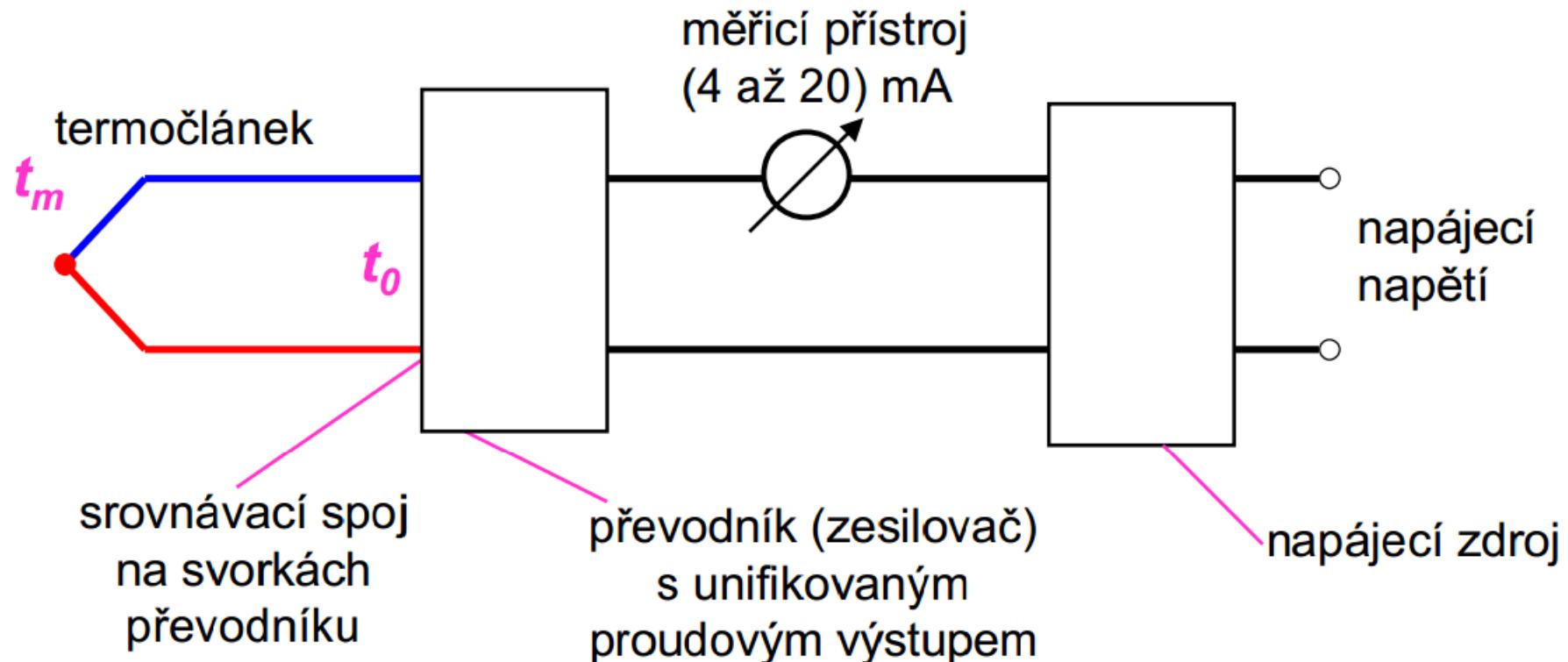
# Zapojení měřicích obvodů s termočlánky

## Přímé měření termoelektrického napětí milivoltmetrem



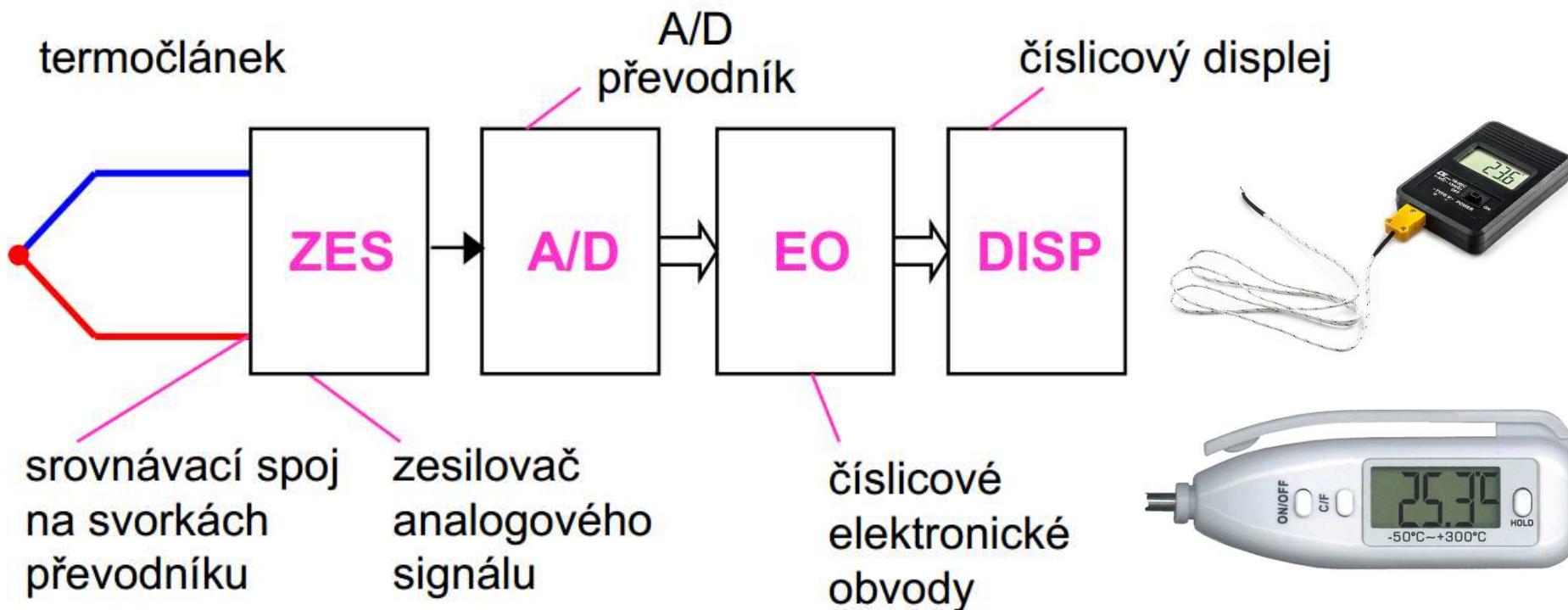
- vliv velikosti vnitřního odporu měřicího přístroje
- vliv odporu spojovacího vedení
- vliv kolísání teploty srovnávacího spoje
- prodloužení termočlánku do místa srovnávacího spoje pomocí kompenzačního vedení

# Měření teploty termoelektrickým senzorem s použitím dvouvodičového převodníku



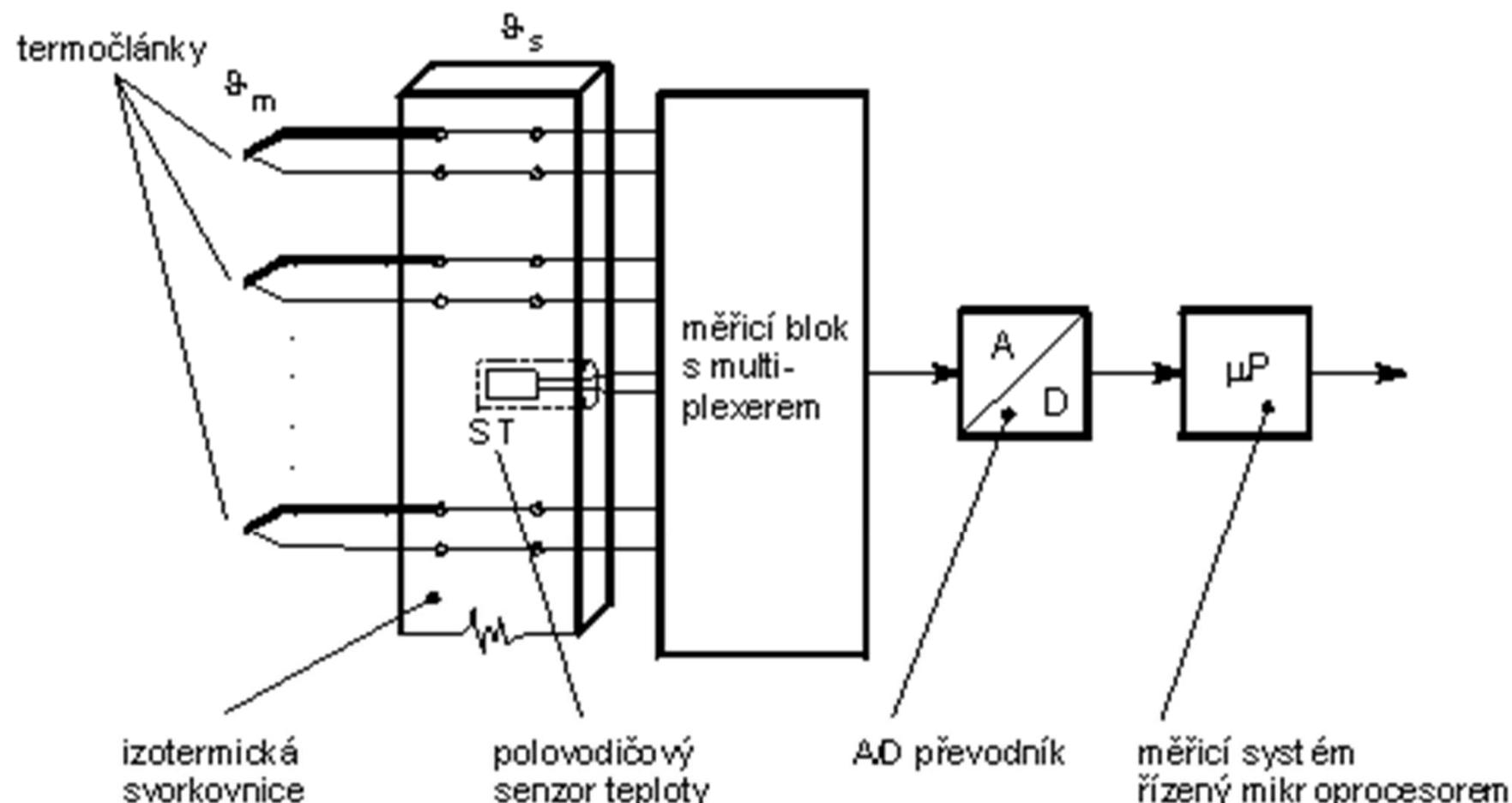
- velikost napájecího proudu převodníku je funkcí hodnoty měřené veličiny
- při počáteční hodnotě teploty je hodnota výstupního signálu 4 mA
- s rostoucí teplotou se zvyšuje velikost proudového výstupu až k maximální hodnotě 20 mA
- tohoto zapojení se používá při provozním měření teploty

# Teploměr s číslicovým výstupem



- teplota srovnávacího spoje se měří polovodičovým senzorem teploty
- číslicový elektronický obvod zajišťuje korekci údaje při změnách teploty srovnávacího spoje
- číslicové obvody zajišťují rovněž linearizaci statické charakteristiky teploměru

# Měření teploty vícemístným měřicím systémem



- mnohapolohový přepínač
- zajišťuje sériové zpracování informací z jednotlivých měřicích míst

# Odporové snímače teploty

- kovové odporové teploměry
- polovodičové odporové teploměry



čů

# Kovové odporové teploměry

- elektrický **odpor kovových vodičů vzrůstá s teplotou**
- pro čisté kovy je možno závislost vyjádřit polynomem;  
v technické praxi vystačíme s polynomem 2. stupně:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0) + \beta (t - t_0)^2]$$

- pro menší teplotní rozsah ( $\Delta t < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) lze použít lineárního vztahu:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$$

- kde  $\alpha$  je teplotní součinitel definovaný v pracovním bodě  $t_0$

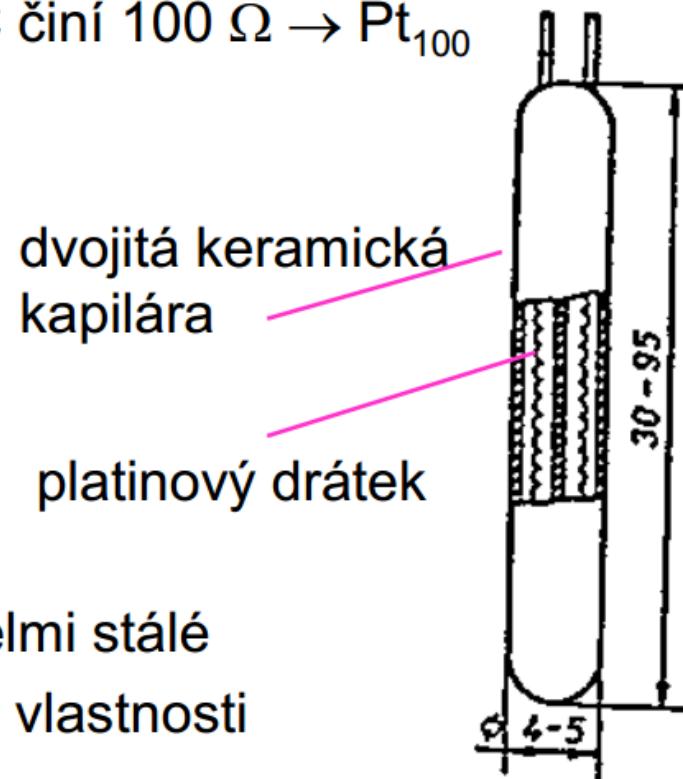
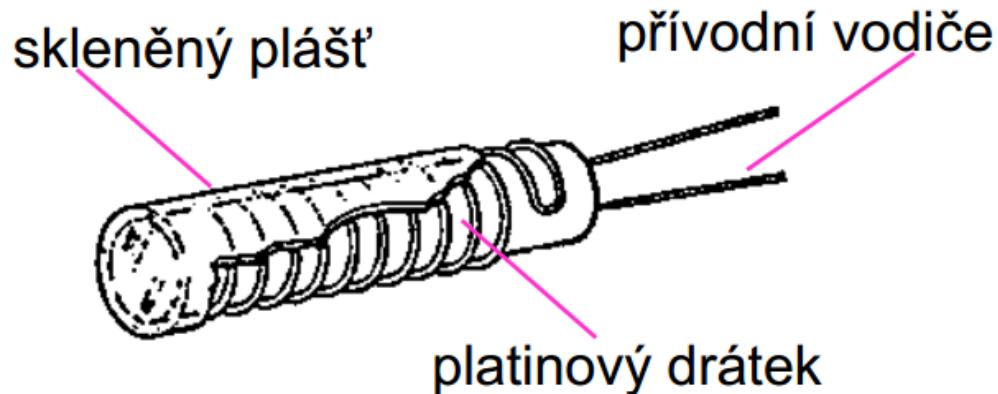
Pro realizaci odporových teploměrů se používají především čisté kovy, jejichž teplotní součinitel má být stálý a pokud možno co největší:

- používanými materiály jsou platina, nikl, měď
- nejčastěji používaným materiélem je **platina**
  - může být vyrobena ve standardně čistém stavu
  - je **fyzikálně a chemicky** stálá

# Provedení kovových odporových senzorů

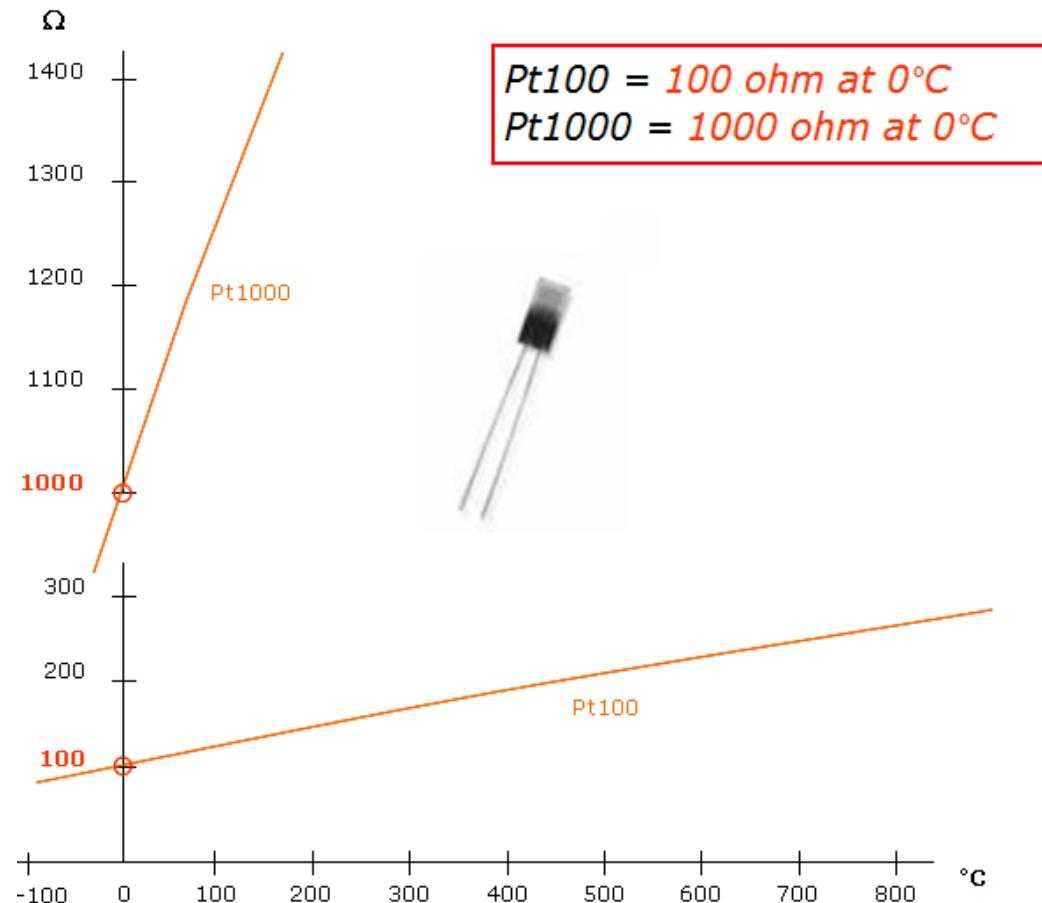
## • drátkové měřicí odpory

- čidlo senzoru je tvořeno spirálovitě stočeným tenkým platinovým drátkem (průměr 0,05 mm), který je zataven do keramického nebo skleněného tělíska
- v jiném uspořádání je drátek navinut na slídové či pertinaxové podložce
- jmenovitá hodnota odporu při 0 °C činí  $100 \Omega \rightarrow Pt_{100}$



- drátkové měřicí odpory jsou časově velmi stálé
- nevýhodou jsou nepříznivé dynamické vlastnosti (velká tepelná kapacita)

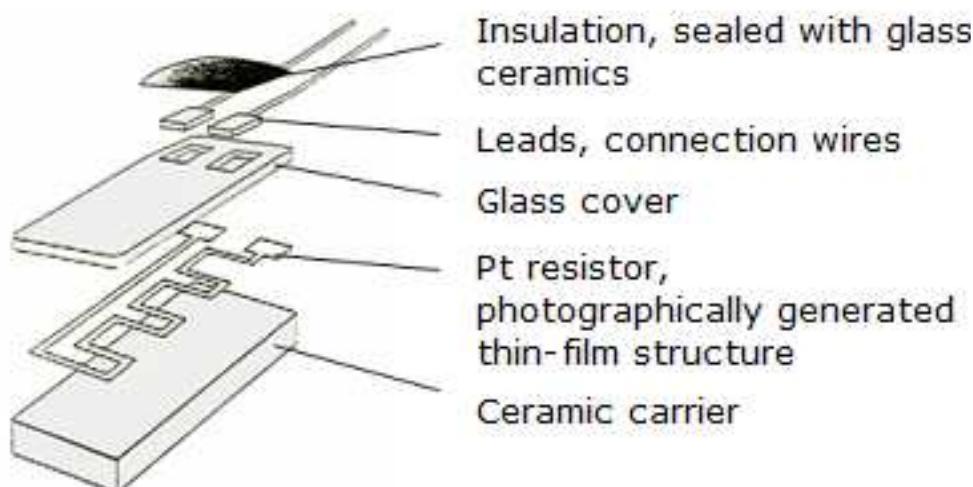
# Pt100 a Pt1000



	Tolerance class	Temperature range	Tolerance	Example 0 °C	Example 100 °C
DIN EN 60751	Class A	-200..600°C	$\pm 0.15 \text{ K} + 0.002 \text{ K}/\text{per } ^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.15 \text{ K}$	$\pm 0.35 \text{ K}$
	Class B	-200..850°C	$\pm 0.3 \text{ K} + 0.005 \text{ K}/\text{per } ^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3 \text{ K}$	$\pm 0.8 \text{ K}$

- **plošné měřicí odpory**

- měřicí odpory vyráběné tenkovrstvou technologií, při níž se platinový odpor vytvoří fotolitografickou technikou ve formě jednoduchého meandru na ploché korundové destičce
- jmenovitý odpor čidla se nastaví pomocí laseru
- plošné měřicí odpory se vyrábí se jmenovitou hodnotou  $100\ \Omega$ ,  $500\ \Omega$ ,  $1000\ \Omega$ ,  $2000\ \Omega$



- perspektivní senzory vyráběné moderní technologií (levnější)
- vyšší hodnota jmenovitého odporu
- příznivé dynamické vlastnosti



# Pоловодицové odporové teploměry

- využívá se závislosti odporu polovodičů na teplotě
- v praxi se využívá několika typů polovodičových senzorů teploty:

## NTC - termistory (negastory)

- jsou vyráběny práškovou technologií z oxidů kovů ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{BaO}$  a dalších)
- vylisované senzory (nejčastěji ve tvaru perličky) se zpevňují slinováním za vysoké teploty
- vykazují záporný teplotní součinitel odporu
- závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá:

$$R = R_0 \cdot e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$



$R$ ,  $R_0$  - odpory termistoru při teplotách  $T$  a  $T_0$   
 $B$  - veličina úměrná aktivační energii

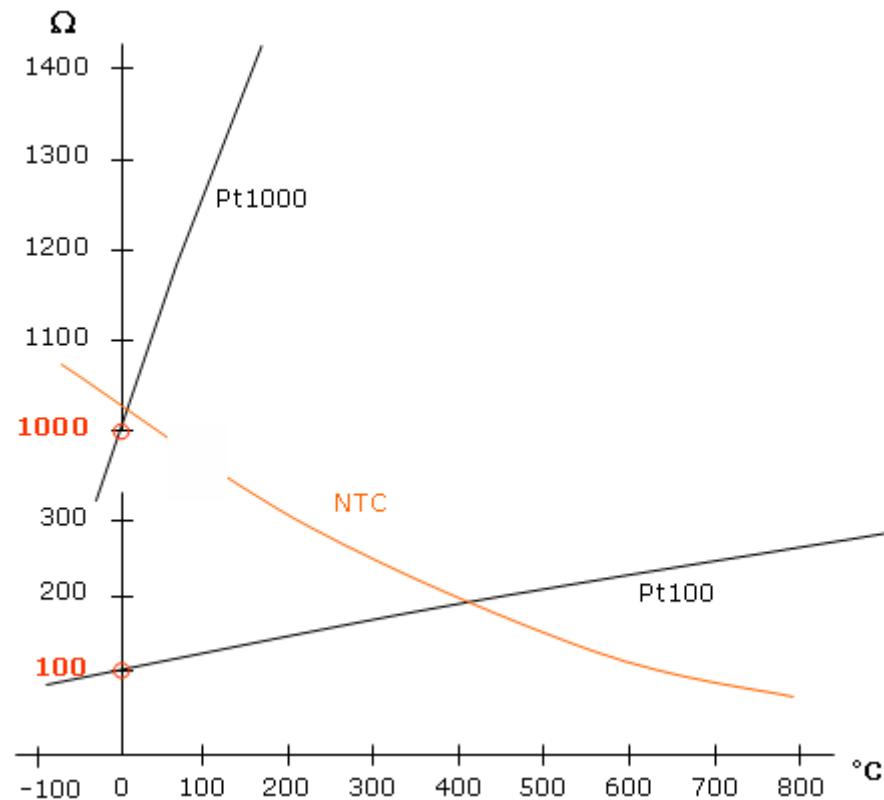
## PTC - termistory (pozistory)

- vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky např. BaTiO<sub>3</sub>
- vykazují **kladný teplotní součinitel odporu**
- v úzkém teplotním rozmezí odpor pozistoru prudce stoupá
- pro oblast nárůstu odporu platí vztah:

$$R = R_r \cdot e^{A \cdot T}$$

- pozistory se obvykle používají jako dvoustavové senzory
  - signalizace překročení mezní teploty
  - dvoupolohová regulace

# Porovnání teplotních závislostí



# Měřicí obvody pro odporové senzory teploty

Na měřicí obvody jsou kladený tyto požadavky:

- minimalizace **vlivu měřicího proudu**  
(proudu procházejícího senzorem)
- minimalizace **vlivu odporu přívodů** k senzoru
- analogová nebo číslcová **linearizace**

## Vliv měřicího proudu

- průchodem měřicího proudu odporovým senzorem teploty dochází k chybě měření vlivem oteplení senzoru
- chybu je možno vyjádřit vztahem:

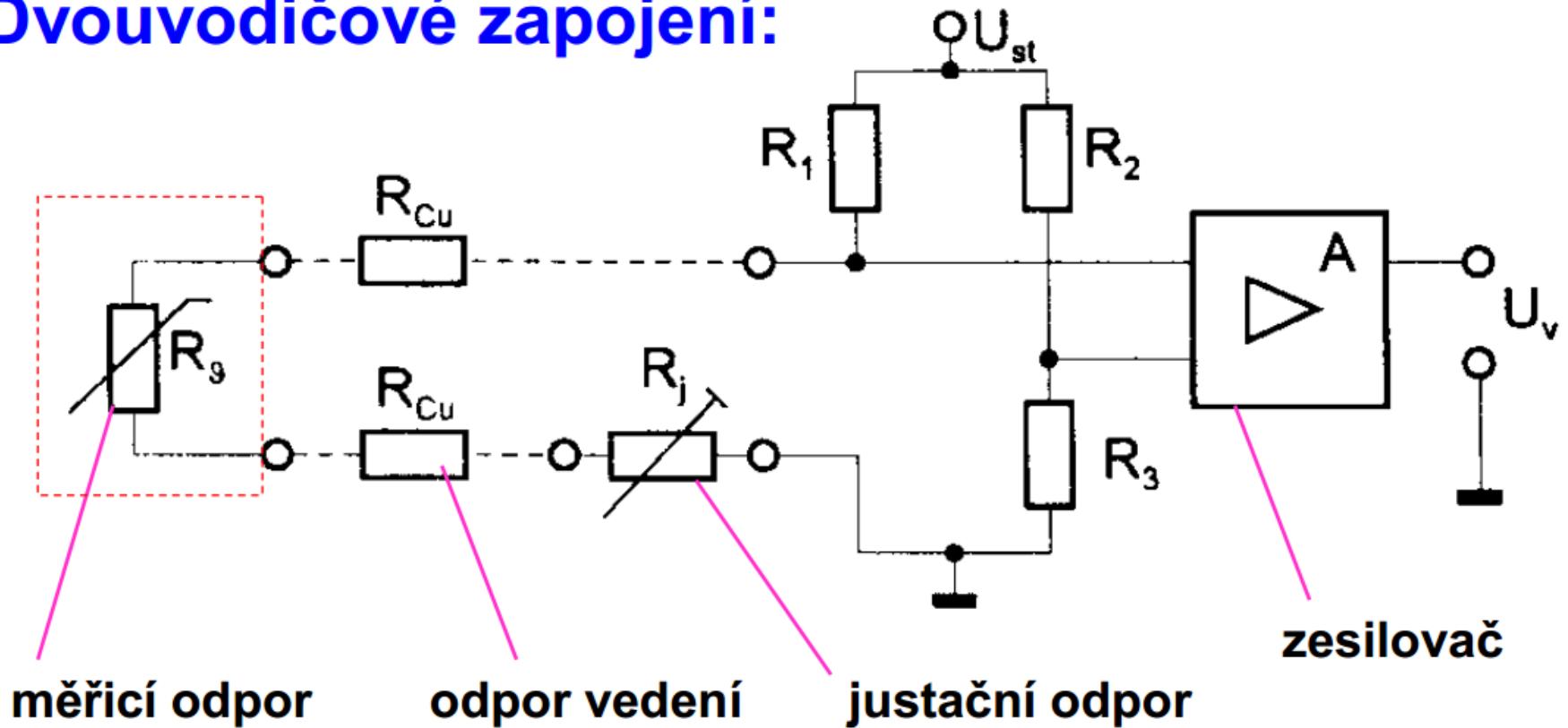
$$\Delta t = \frac{R \cdot I^2}{D} \quad D - \text{zatěžovací konstanta [W K}^{-1}\text{]}$$

- pomocí uvedeného vztahu a katalogové hodnoty D je možno vypočít maximální proud pro přípustnou chybu  $\Delta t$

# Vliv odporu přívodů

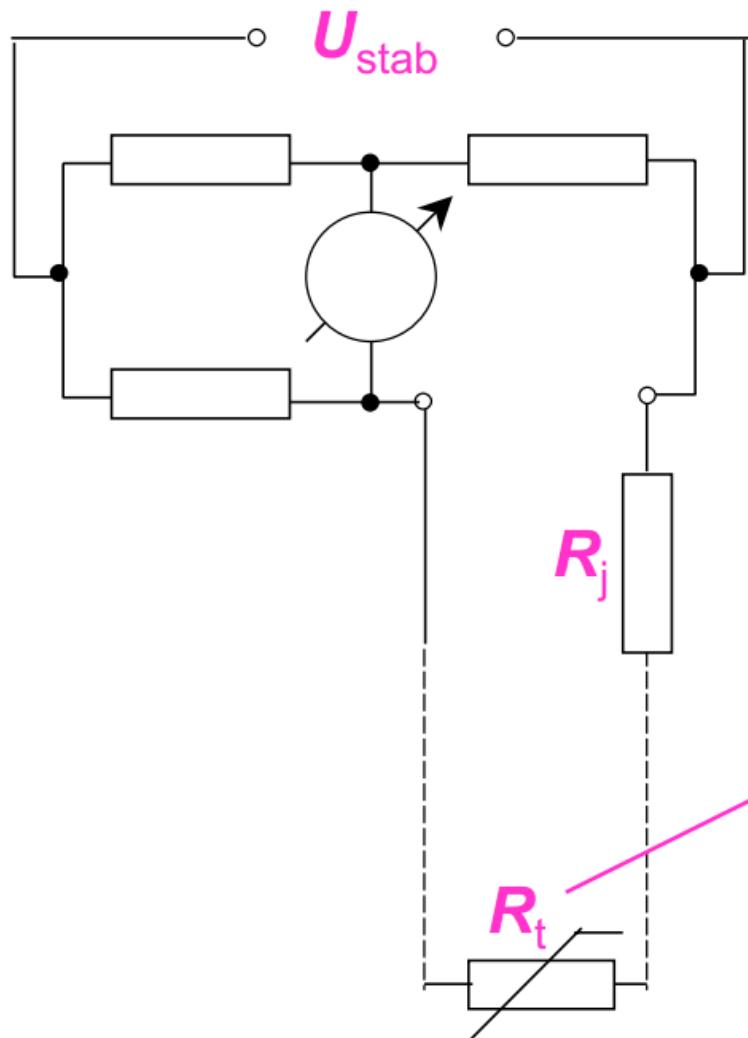
- definovaná hodnota odporu vedení  $R_v = 20 \Omega$
- vliv teploty na odpor spojovacího vedení
- dvouvodičové, třívodičové a čtyřvodičové zapojení odporového senzoru

## Dvouvodičové zapojení:



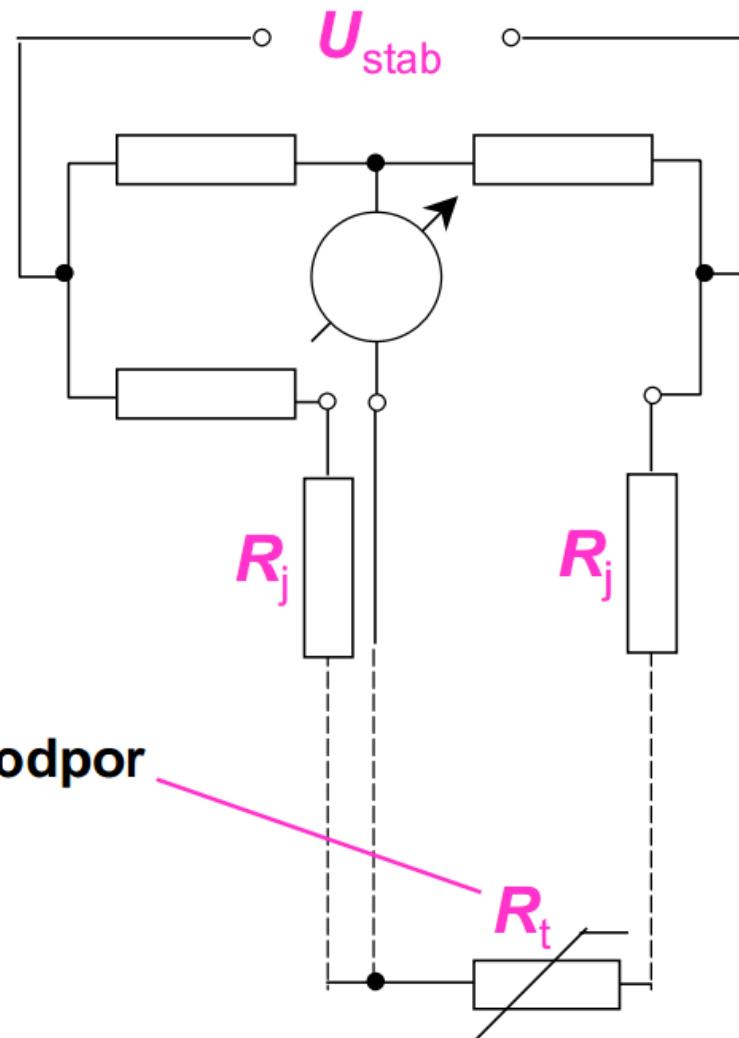
# Měřicí obvody pro odporové senzory teploty

## Dvouvodičové zapojení



- odporem  $R_j$  se nastavuje odpor spojovacího vedení

## Třívodičové zapojení



- zapojení kompenzuje vliv teploty na odpor spojovacího vedení

# Porovnání elektrických teploměrů

	<i>Termočlánek</i>	<i>Kovový teploměr</i>	<i>Termistor</i>
Výhody	aktivní snímač jednoduchý levný odolný široce použitelný široký teplotní rozsah	vysoká stabilita vysoká přesnost lepší linearita než u termočlánku	vysoká citlivost rychlá odezva dvouvodičové měření
Nevýhody	nelineární nízká úroveň signálu potřeba referenčního signálu nízká citlivost nízká stabilita	poměrně vysoká cena potřeba stabilizačního napájecího zdroje malá změna odporu nízká hodnota odporu zahřívání procházejícím proudem	nelineární omezený teplotní rozsah křehký potřeba stabilizovaného napěťového zdroje zahřívání procházejícím proudem

# Zabudování dotykových teploměrů

- vhodné umístění teplotních snímačů je jedním ze základních předpokladů správného měření teploty
- u snímače musí být zajištěn dokonalý styk s prostředím aby docházelo i k dobrému přestupu tepla
- ztráty tepla vedením se omezí dostatečným ponorem teploměru
- měření teploty kapalin v nádobách vyžaduje míchání
  - zvětšení součinitele přestupu tepla
  - dosažení homogenního teplotního pole

## Volba měřicího místa:

- snadná montáž, demontáž a údržba teploměru
- umístění čidla do teploměrné jímky chrání teploměr proti chemickým a mechanickým vlivům
  - dochází však ke zhoršení dynamických vlastností

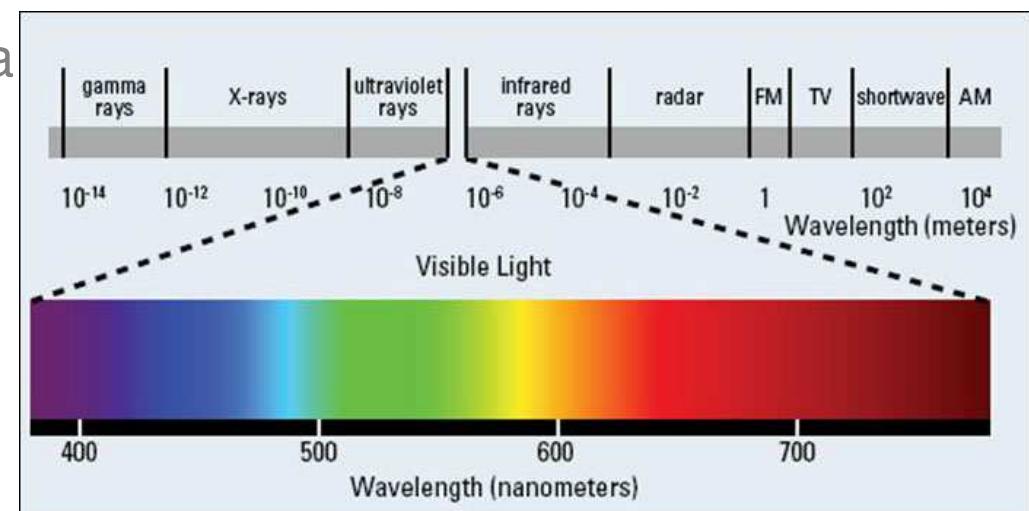


## Zabudování senzorů teploty



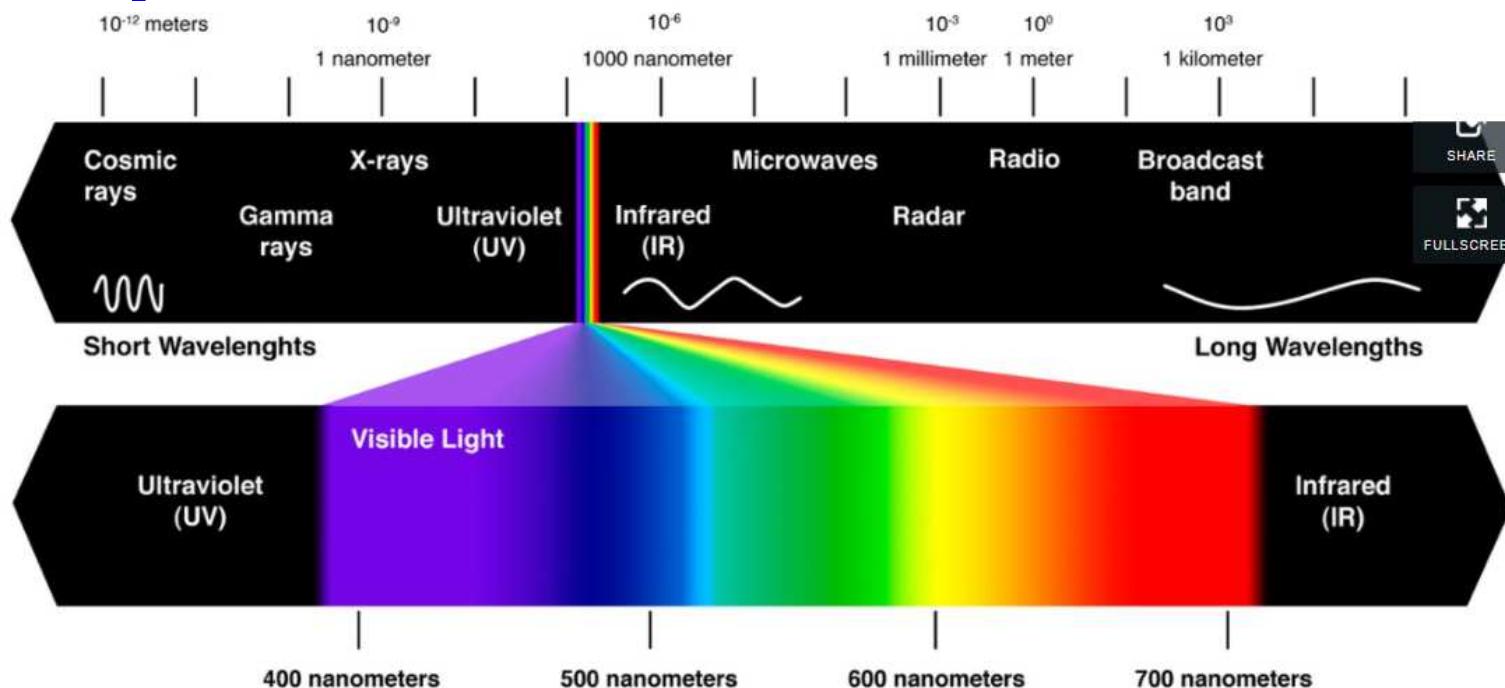
# Bezdotykové teploměry

- měření bezdotykovými teploměry je založeno na vyhodnocování **tepelného elektromagnetického záření** těles
- každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K vyzařuje tepelné elektromagnetické záření
- vysílané tepelné záření je složeno z různých vlnových délek
- pro bezdotykové měření teplot se využívá záření **od 0,4 µm do 25 µm vlnové délky**
- uvedený rozsah záření pokrývá **měření teploty od - 40 °C do 10 000 °C**
- tento rozsah záření spadá částečně do viditelného spektra (0,4 až 0,78) µm a dále do infračerveného spektra
- bezdotykové teploměry se označují jako **pyrometry** nebo **IČ-teploměry**



# Záření absolutně černého tělesa

- Při teplotách menších než 530 oC tělesa vyzařují pouze v infračervené oblasti a jejich záření není viditelné.
- Při teplotách nad 530C se ve spektru objevují i viditelné vlnové délky a s rostoucí teplotou roste intenzita tohoto záření a těleso září na stále kratších vlnových délkách.



# Teoretické základy bezdotykové pyrometrie

- intenzita vyzařování  $H$  [W m<sup>-2</sup>] nějakého tělesa je dána vztahem:

$$H = \frac{d\Phi}{dS}$$

$\Phi$  - zářivý tok [W]

$S$  - plocha povrchu zdroje záření [m<sup>2</sup>]

- dokonale černé těleso**
  - maximálně vyzařuje i maximálně pohlcuje záření
- Poměr intenzity vyzařování a pohltivosti** závisí pouze delta teplot, jsou si úměrné podle Kirchhoffova zákona
  - je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje intenzita vyzařování nad pohltivostí
- intenzita vyzařování dokonale černého tělesa  $H_0$  závisí jen na jeho absolutní teplotě a podle Stefan-Boltzmannova zákona platí:

$$H_0 = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-3} [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$$

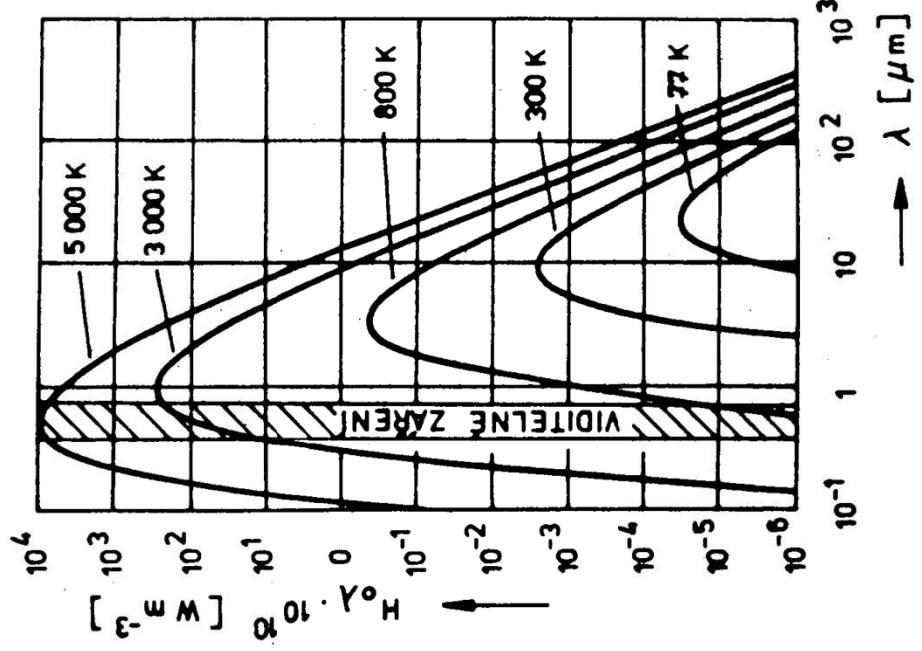
## Intenzita vyzářování má integrální charakter

- skládá se z přispěvků při jednotlivých vlnových délkách

$$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\lambda} d\lambda$$

$H_{0\lambda}$  - spektrální hustota intenzity vyzářování [ $\text{W m}^{-3}$ ]  
 $\lambda$  - vlnová délka záření [m]

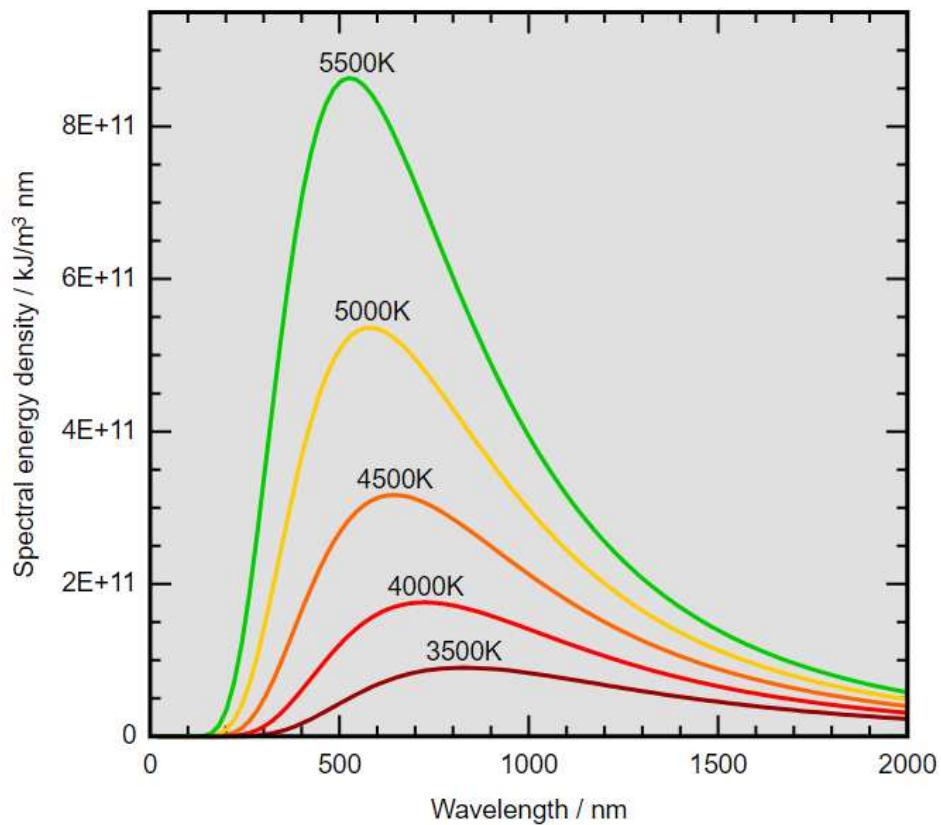
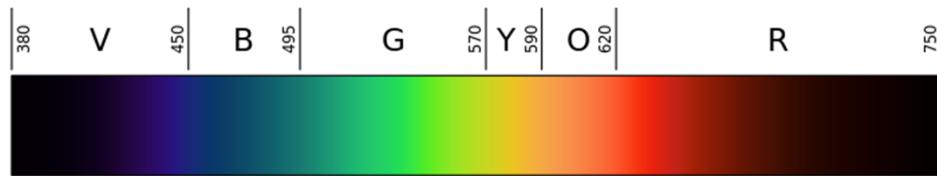
- závislost spektrální hustoty intenzity vyzářování na vlnové délce a na teplotě je dáná Planckovým vyzářovacím zákonem
- grafické znázornění Planckova zákona pro dokonale černé těleso ukazuje graf



- plocha pod křivkou pro danou teplotu odpovídá  $H_0$
- maximum vyzářování se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám

## Wienův posouvací zákon

- <http://www.termokamera.cz>



# Emisivita

- skutečné těleso vyzařuje i pohlcuje méně než dokonale černé těleso
- spektrální hustota intenzity vyzařování skutečného tělesa je dána vztahem:

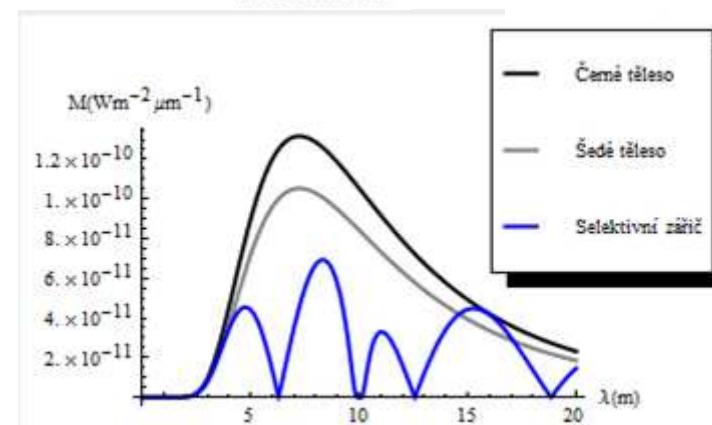
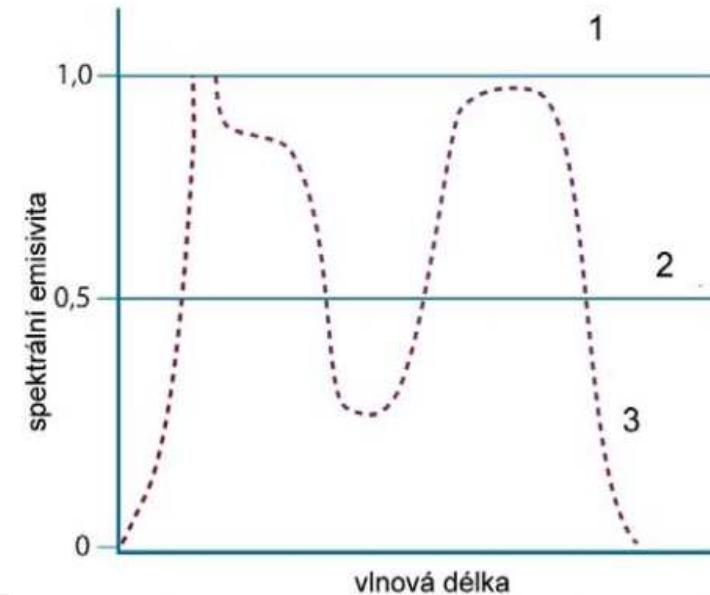
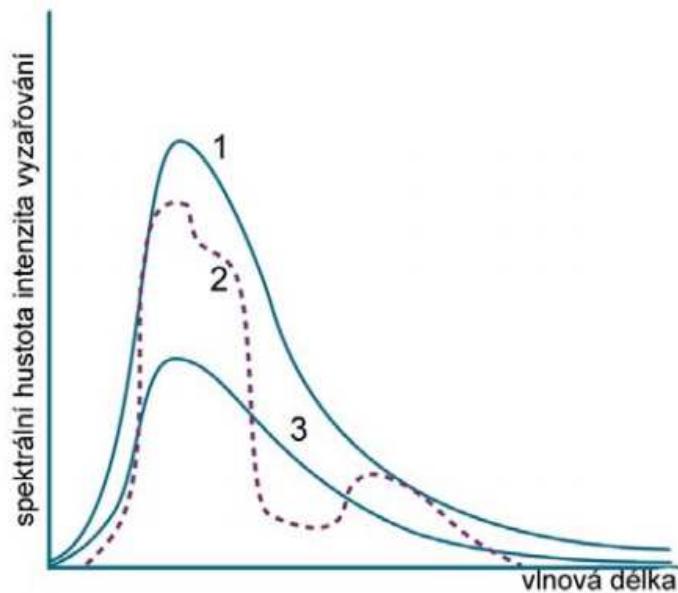
$$H_\lambda = \varepsilon_\lambda H_{0\lambda}$$

$\varepsilon_\lambda$  - emisivita resp. pohltivost pro vlnovou délku  $\lambda$

- **emisivita  $\varepsilon_\lambda$** 
  - poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii vyzařované dokonale černým tělesem při téže teplotě
- hodnota emisivity  $\varepsilon_\lambda$  je vždy **menší než 1**
- **selektivní zářiče**
  - tělesa, která mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu  $\varepsilon_\lambda$
- **šedé těleso**
  - emisivitu  $\varepsilon$  šedého tělesa můžeme považovat za konstantní v dosti
  - širokém rozsahu vlnových délek

## Druhy zářičů

1. černé těleso
2. šedé těleso
3. selektivní zářič

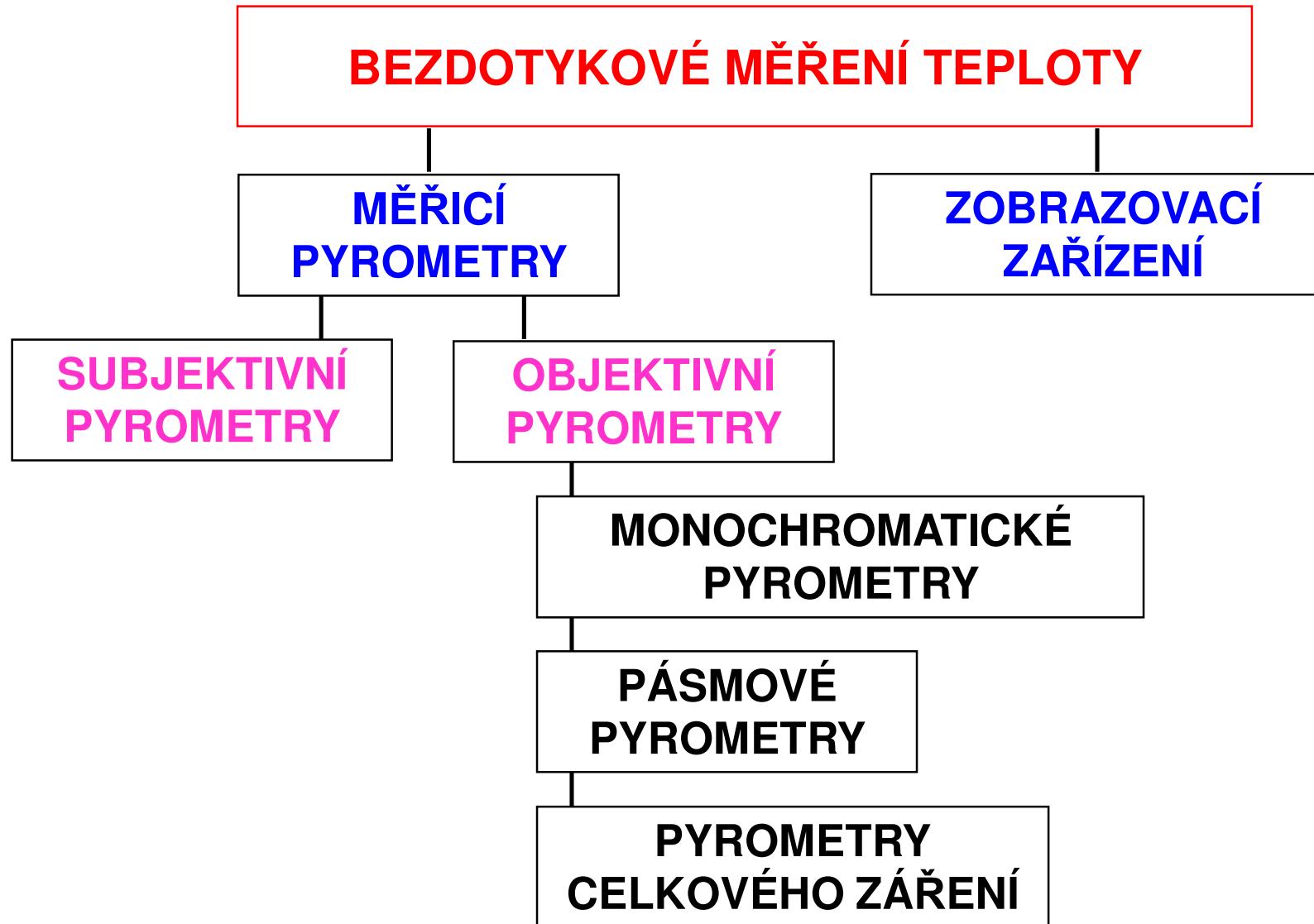


## Hodnoty emisivity pro vybrané povrchy

těleso	emisivita
černé těleso	1
černý matový lak	0,99
voda	0,95
cihly	0,85
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
lesklý ocelový plech	0,25

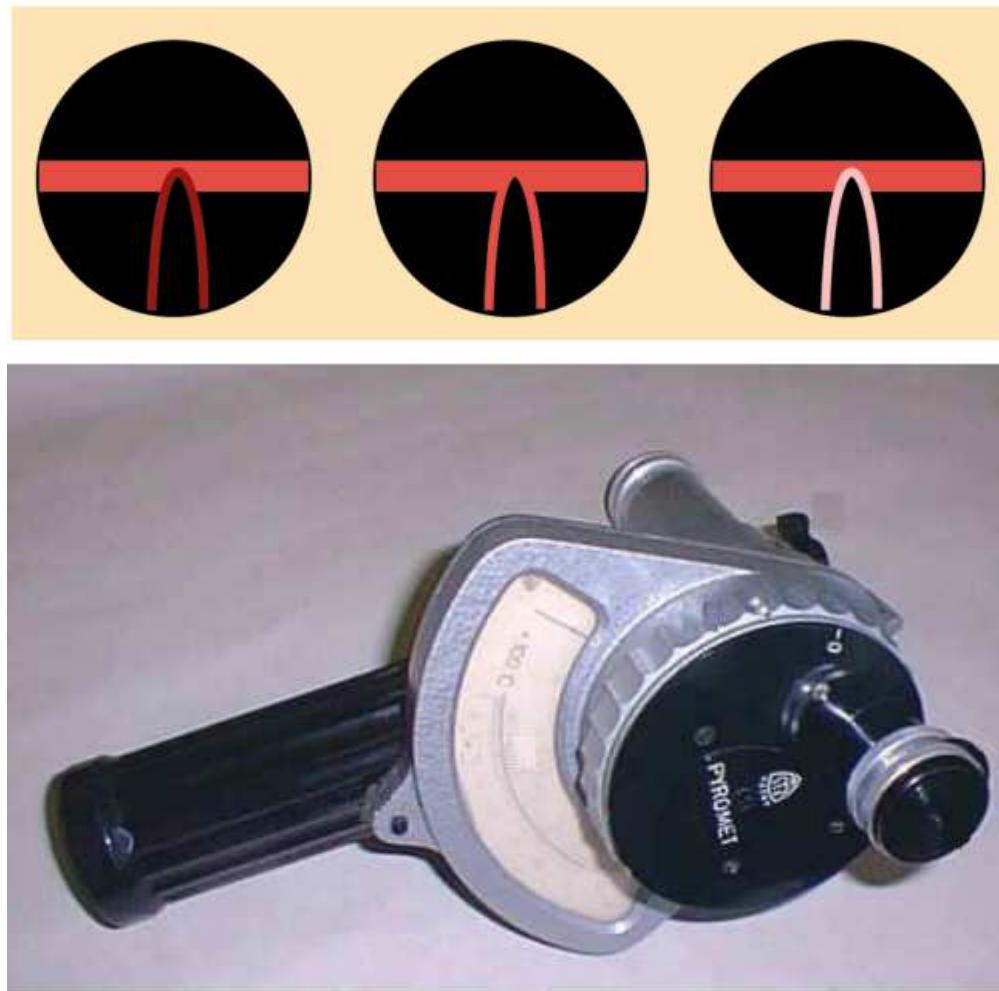
Při aplikaci bezdotykových teploměrů pro měření teploty povrchu těles je **znalost hodnoty emisivity nezbytná**.

# Rozdělení bezdotykových teploměrů



## Jasové pyrometry

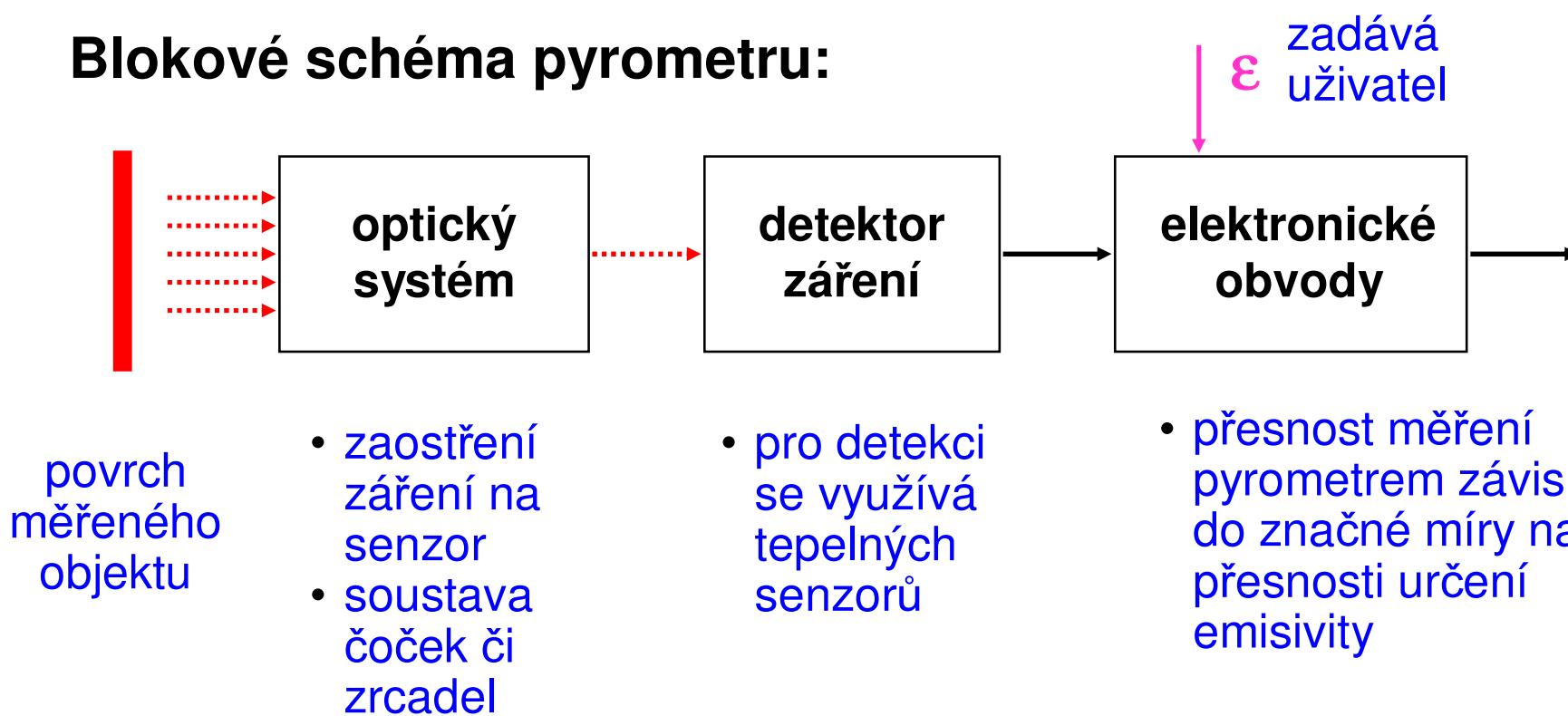
Jasové pyrometry porovnávají záření se srovnávacím zdrojem záření.  
Tímto zdrojem může být pyrometrická wolframová žárovka.



# Pyrometry celkového záření

- vyhodnocují teplotu podle Stefan-Boltzmannova zákona pro šedé těleso:  
$$H = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$
- pracují teoreticky v celém spektru vlnových délek od  $\lambda = 0$  do  $\lambda = \infty$
- v praxi dochází ke spektrálnímu omezení vlivem optiky

## Blokové schéma pyrometru:



# Tepelné senzory IČ-záření

## Termočlánkové baterie

- baterie termočlánků obsahuje až 30 měřicích spojů na ploše  $4 \text{ mm}^2$

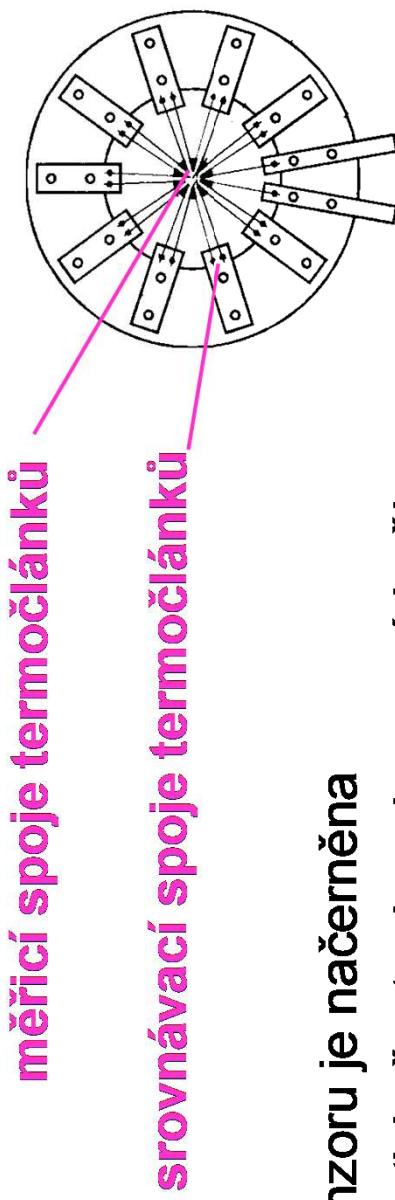
## Bolometry

- načerněné tenkovrstvě odporové senzory teploty

## Pyroelektrické senzory

- založeny na pyroelektrickém jevu

**Provedení senzoru s termočlánkovou baterií:**



měřicí spoje termočlánků

srovnávací spoje termočlánků

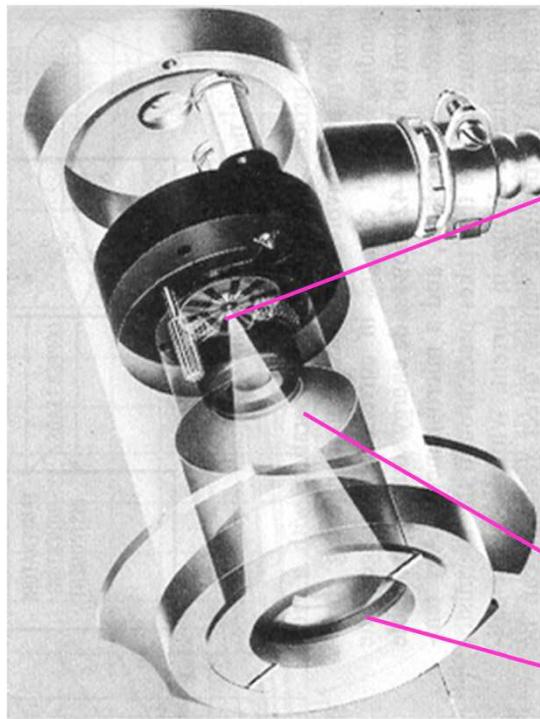
- citlivá část senzoru je načerněna
- senzor se umisťuje často do vakuované baňky

# Provedení přenosných pyrometrů

zaměřovací systém  
s laserem nebo dalekohledem



detecteur záření  
(baterie termočlánků)



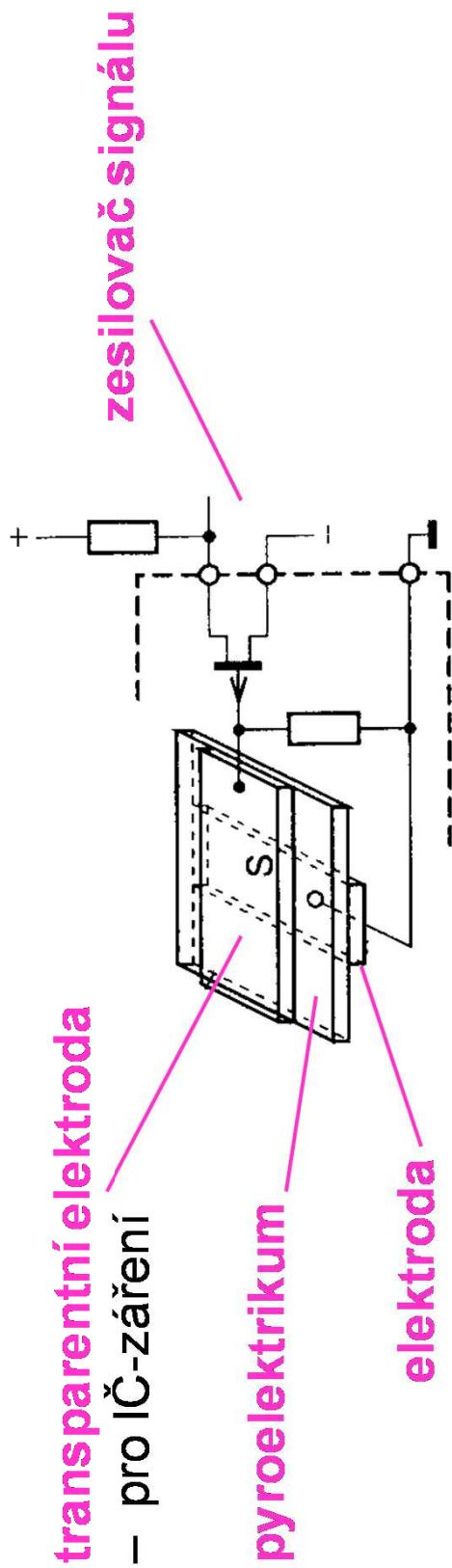
optický systém

- vstupní okénko pyrometru bývá chráněno tenkou polyetylénovou folií, která propouští IČ-záření
- elektronické obvody jsou řízené  $\mu$ P
- měřicí rozsah -20 °C až 1500 °C

# Pyroelektrické senzory

- založeny na **pyroelektrickém jevu**
  - změna spontánní polarizace pyroelektrika při změně teploty
- **pyroelektrika:**
  - např. keramické látky na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého

## Schématické uspořádání pyroelektrického senzoru :



- senzor představuje kondenzátor, na jehož elektrodách se při změně polarizace v pyroelektriku naindukuje náboj
  - při aplikaci pyroelektrického senzoru musí být tepelné záření cyklicky přerušováno

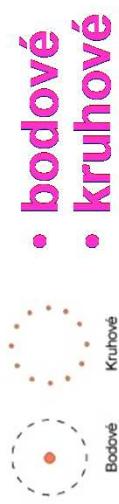
# Zaměření měřeného objektu

- plocha měřeného objektu musí zcela vyplňovat zorné pole pyrometru
- tato plocha roste se čtvercem vzdálenosti
- nesplnění tohoto požadavku vede k chybným výsledkům měření (měří se průměrná teplota pozorované oblasti, tj. objektu a jeho okolí)
- měření je nezávislé na vzdálenosti přístroje od měřeného objektu, pokud obraz objektu kryje obrys přijímače záření
- kontrola se provádí vizuálně okulárem nebo podle diagramu na přístroji či pomocí laserového zaměřovače

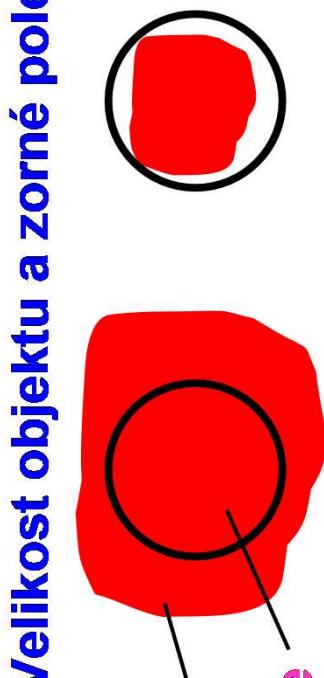
## Zorné pole IČ-teploměru:



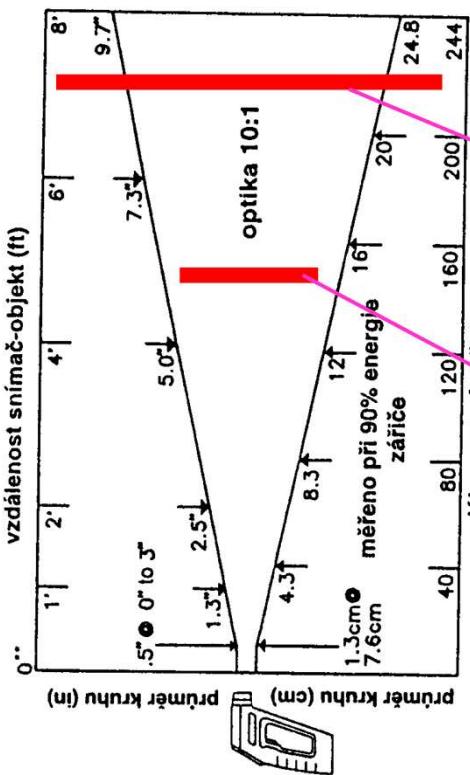
## Laserové zaměřování:



## Velikost objektu a zorné pole:



chybně správně



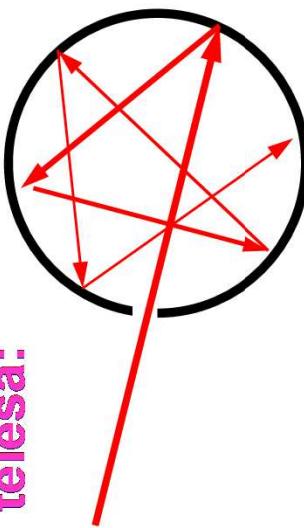
chybně správně

chybně 11

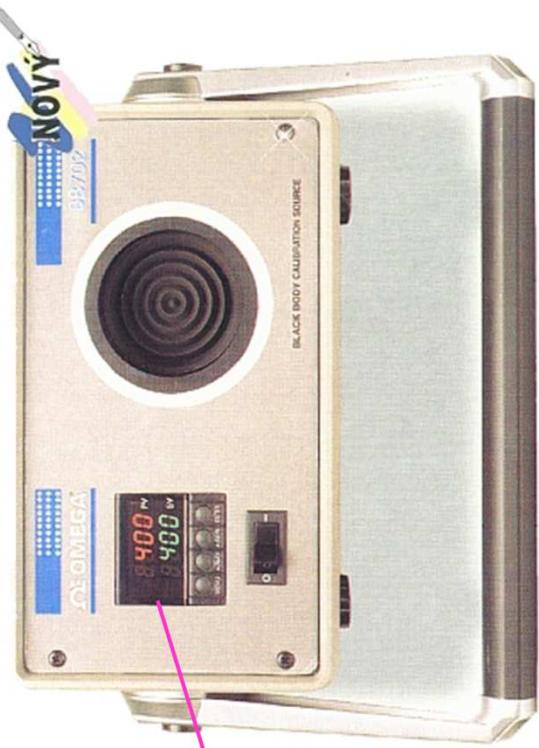
# Kalibrace pyrometrů

- kalibrace se provádí pomocí **černého tělesa**
- reálné černé těleso má hodnotu emisivity  $0,99 > \varepsilon > 0,98$

**Princip černého tělesa:**



**Provedení černého tělesa:**



- zařízení poskytuje stabilní teploty i pod  $0^{\circ}\text{C}$
- vybavení rozhraním RS 232 umožňuje počítačové řízení při nastavování teploty (automatické testování)
- rozsahy teplot u vyráběných zařízení:  
od  $-20^{\circ}\text{C}$  až přes  $1000^{\circ}\text{C}$

# Pásmové pyrometry

- měří teplotu prostřednictvím záření v **úzkém pásmu vlnových délek**
- šíře pásma vlnových délek je od 10 nm do jednotek  $\mu\text{m}$
- pásmo vlnových délek závisí na citlivost použité optiky a senzoru záření
- jako senzorů záření se využívají **kvantové senzory IČ-záření**

## Kvantové senzory:

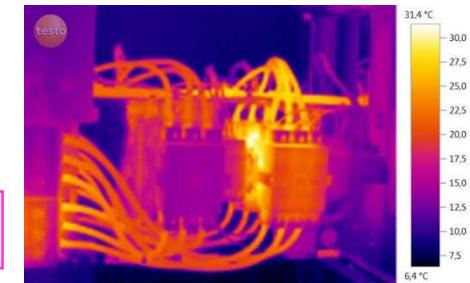
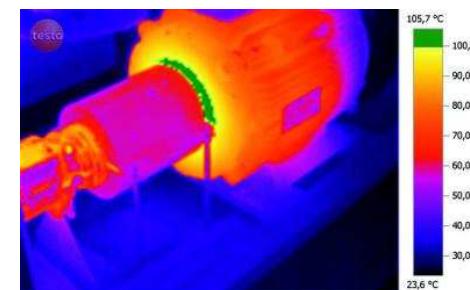
- využívají fyzikálních jevů vznikajících při interakci fotonů dopadajících na strukturu senzoru
- **fotodioda**
  - vznik fotoelektrického napětí (proudu)
  - PN-přechod na Si-diodě
- **fotoodpor**
  - změna elektrické vodivosti (odporu)
  - fotoodpory na bázi PbS, InSb, PbSe

Pásmové pyrometry vykazují příznivější dynamické vlastnosti a vyšší citlivost než pyrometry s tepelnými senzory

# Termovizní systémy

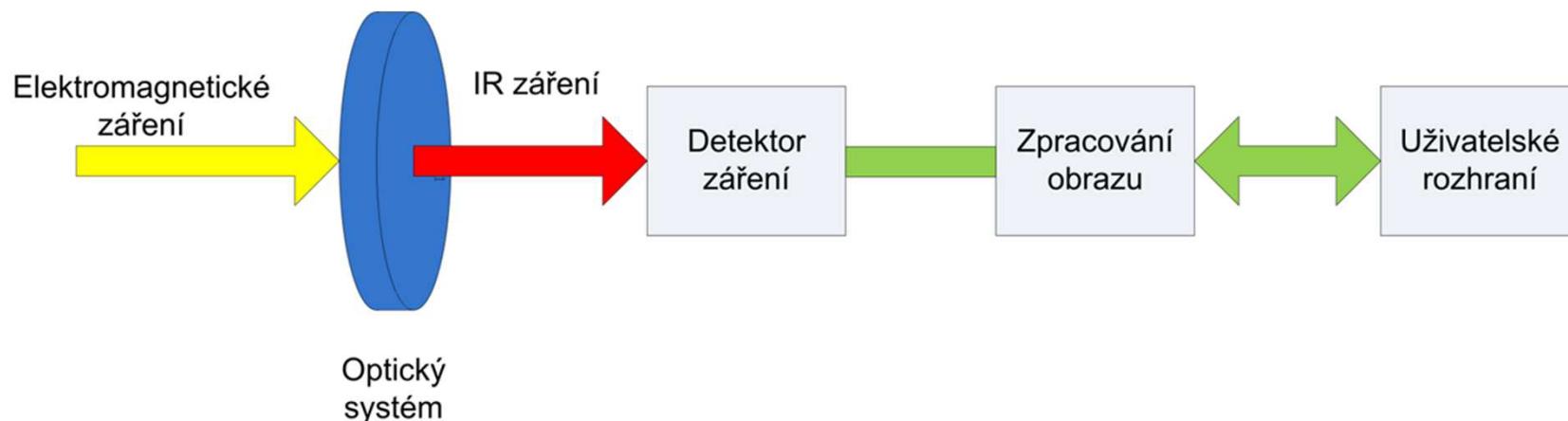
- slouží pro měření rozložení teploty na povrchu těles - **snímání teplotních polí**
- termovizní systémy pracují většinou s rozkladem obrazu pozorovaného pole
- **rozklad obrazu:**
  - **opticko-mechanický**
    - obraz se rozloží do řádek a bodů pomocí vertikálně kmitajícího zrcadla a horizontálně rotujícího hranolu či zrcadla
    - pro detekci záření se užívá kvantového detektoru (např. InSb)
  - **elektronický**
    - využívá řádkových pyroelektrických senzorů
- **viditelný obraz teplotního pole** je možno sledovat na displeji či obrazovce vyhodnocovacího zařízení
- problematické je zadání emisivity

**Měřicí rozsah je -30 °C až 1200 °C, rozlišení až 0,2 °C**



# Termovize

- Optika
  - téměř výhradně spojka z **germánie** bez možnosti optického zoomu. Zákony optiky jsou stejné jako třeba u skleněné čočky, liší se pouze použitý materiál.
- Tepelný detektor
  - **mikrobolometr**, který mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření (dopadajícím se zářením se ohřívá). Tzv. mikrobolometrické pole 2D pole (o délce hrany nejobvykleji 1 až 2 cm), je dnes nejčastějším typem detektoru u 95 % termokam. širokopásm.
  - **Fotonové detektory** pracují, na principu počítání fotonů, tj. kvant elektronového záření. Jsou výrazně citlivější, než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení. Zdroj: [www.termokamera.cz](http://www.termokamera.cz)



# Termovize

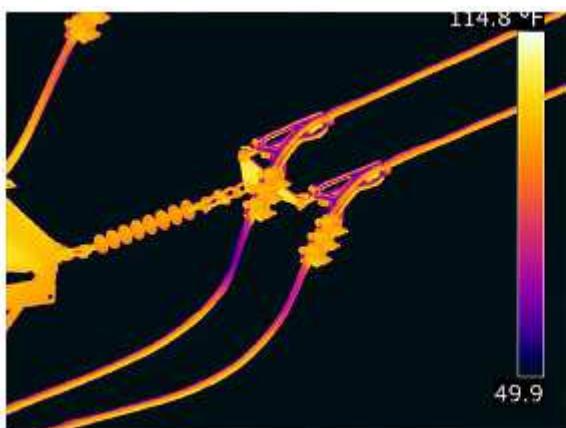
- FLIR E4 (rozlišení 80x60px, teplotní citlivost 0,15 °C)
- FLIR E8 s vysokou teplotní citlivostí 0,06 °C a rozlišením 320×240.

Typ	FLIR E40	FLIR E50	FLIR E60
Rozlišení senzoru	160 x 120 px	240 x 180 px	320 x240 px
Teplotní citlivost	< 0.07°C	< 0.05°C	< 0.05°C
Teplotní rozsah	-20°C...+650°C	-20°C...+650°C	-20°C...+650°C
Zorné pole	25° x 19°	25° x 19°	25° x 19°



# Termovize

- FLIR T1K – termokamera s HD rozlišením



# Aplikační možnosti bezdotykových teploměrů

## Stabilní přístroje

- pro kontinuální monitorování a řízení
- pevné zaměření na určitý bod
- ve spojení s vhodným mechanickým zařízením mohou monitorovat širší oblast



## Přenosné přístroje

- pro přepravu a řízení
- bateriové napájení
- nejsou uzpůsobeny pro zapojení do regulačního obvodu



# Použití pyrometrů

- měření **rozložení teplot** na povrchu objektů
  - měření rozložení teplot na technologickém zařízení
  - rozložení teplot na elektronických obvodech
  - sledování teplot na povrchu biologických objektů
- měření teplot **pohybujících se objektů**
  - měření teploty potravinářských výrobků (pekárny)
  - měření teploty rotujících objektů, běžicích pásů apod.
- měření **rychlých změn teploty**
  - bezdotykové teploměry mají velmi příznivé dynamické vlastnosti  
 $T_{90}$  leží v rozmezí 100 ms až 1 s
- **diagnostická a inspekční měření**
  - prevence vzniku poruchových a havarijních stavů (teplotní změny na elektrických obvodech, na tepelných zařízeních ap.)
  - diagnostika v lékařství (teplotní pole na povrchu těla)

# Přednosti a nedostatky bezdotykového měření teploty

## Výhody:

- zanedbatelný vliv měřicího zařízení na měřený objekt
- možnost měření rotujících a pohybujících se těles
- možnost měření rychlých teplotních změn
- možnost snímání rozložení teplot na celém povrchu objektu (termovize)

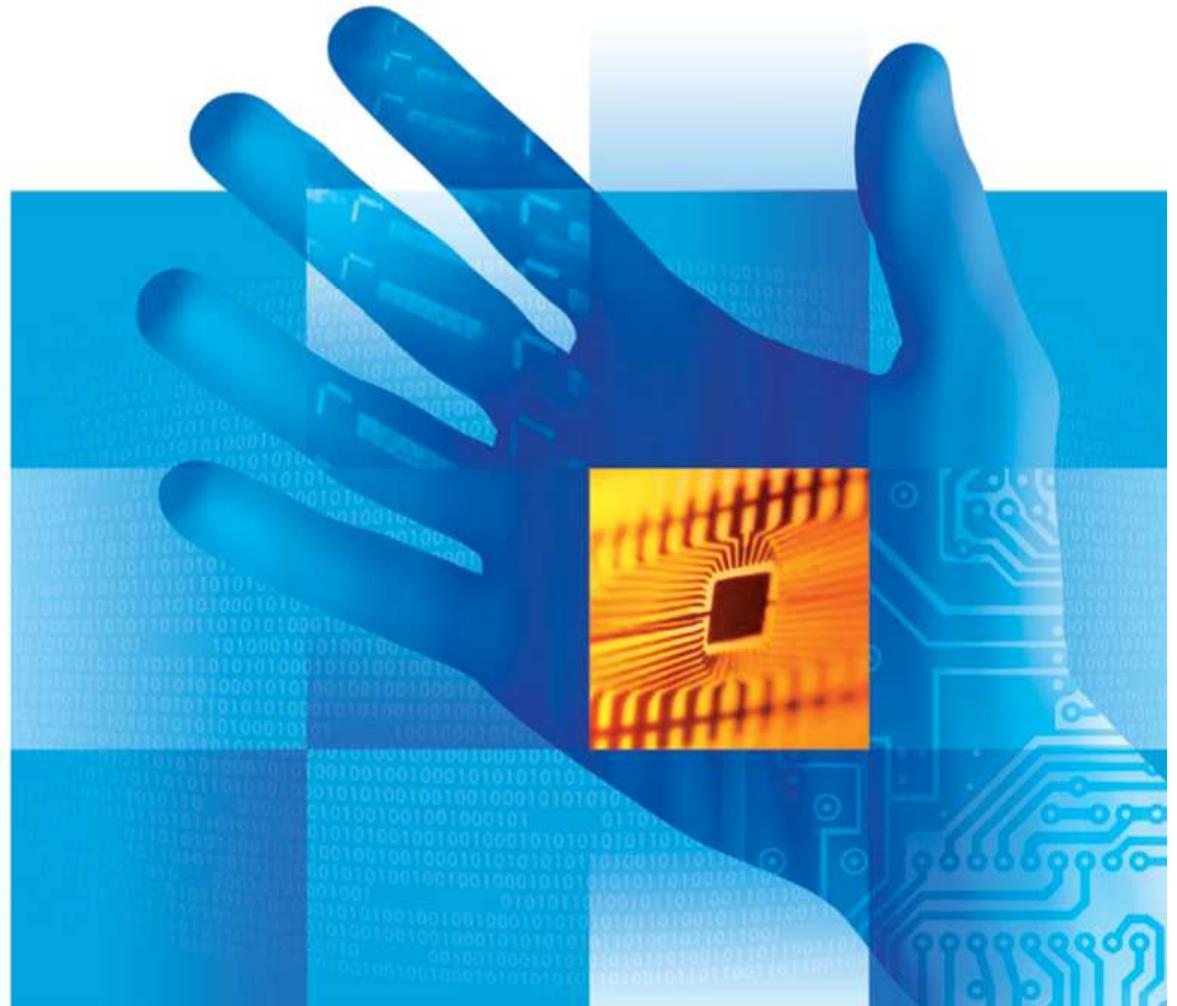
## Nevýhody:

- chyba způsobená nejistotou stanovení emisivity měřeného objektu
- chyba způsobená prostupností prostředí (absorbce tepelného záření v prostředí mezi měřeným objektem a pyrometrem - sklo,  $\text{CO}_2$ , vodní páry, dým)
- chyba způsobená odraženým zářením z okolního prostředí



Katedra měřicí a řídicí techniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
VŠB-TUO

# Senzory a Měření 8-SMART a MEMS snímače





## SMART ("Inteligentní") senzor?

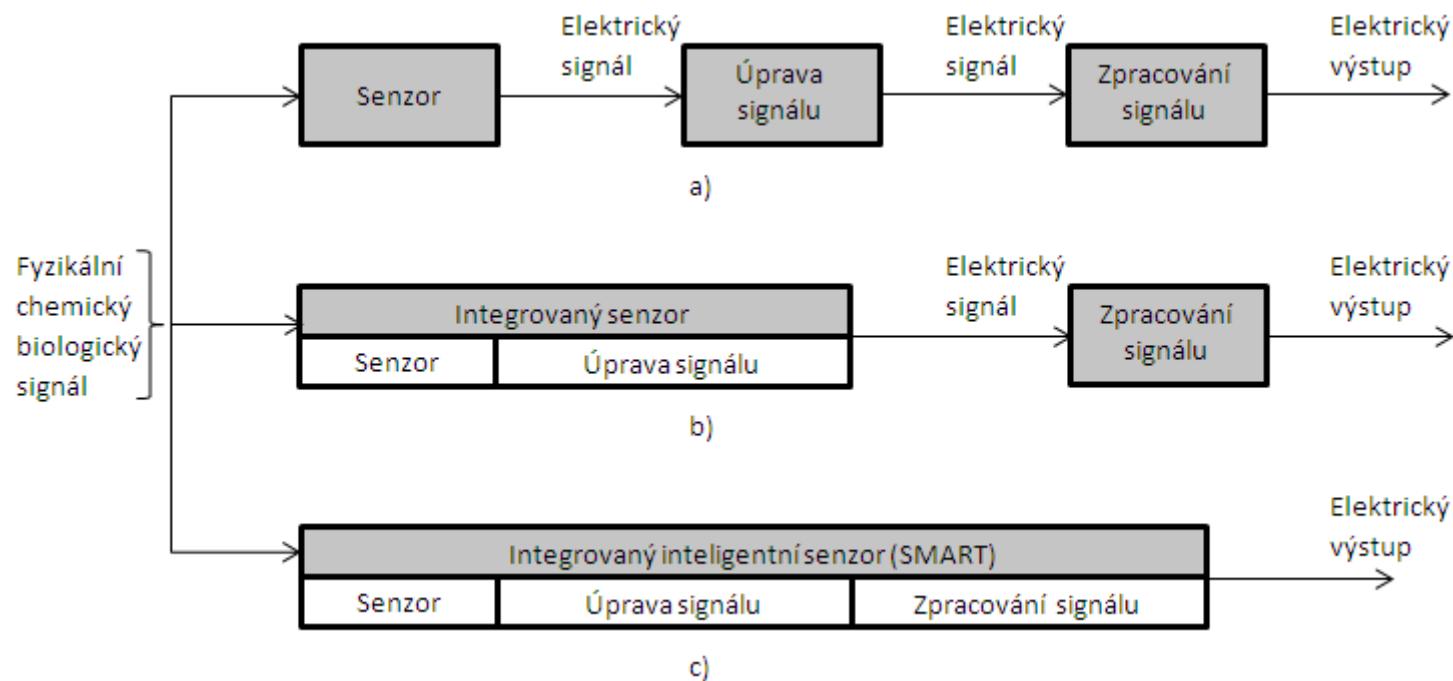
Základní otázky:

- Co si představit pod pojmem Smart senzor?
- Kde lze využít Smart senzor?
- Jaké jsou výhody těchto senzorů?
- Co vše mohou měřit?





## Smart senzory

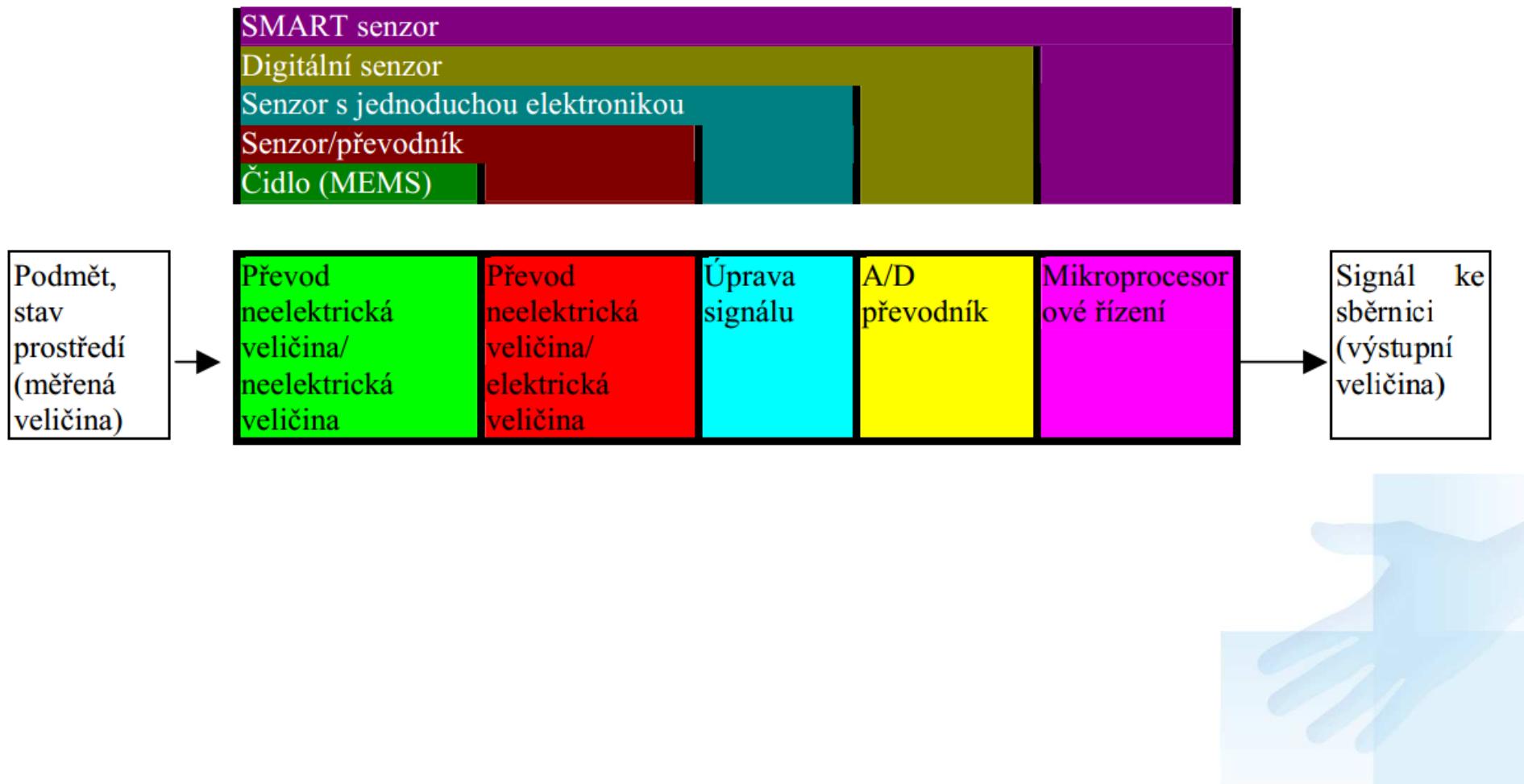


Stupeň integrace snímače





# Smart senzory

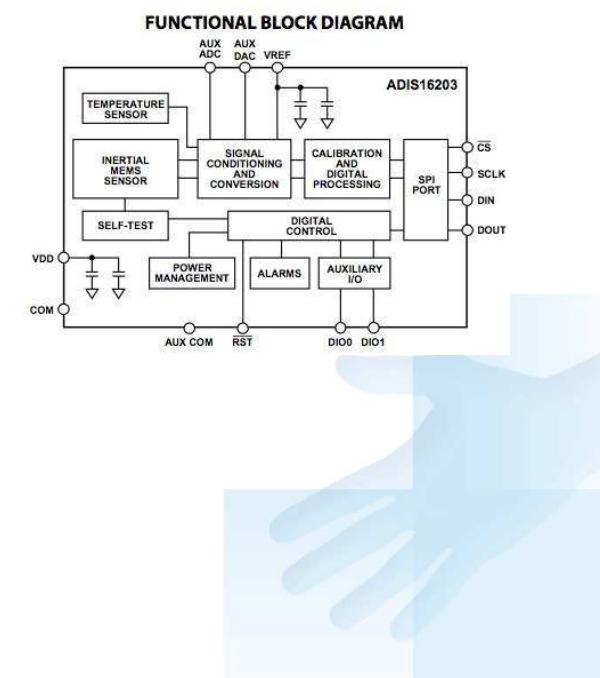
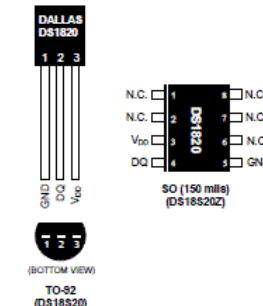
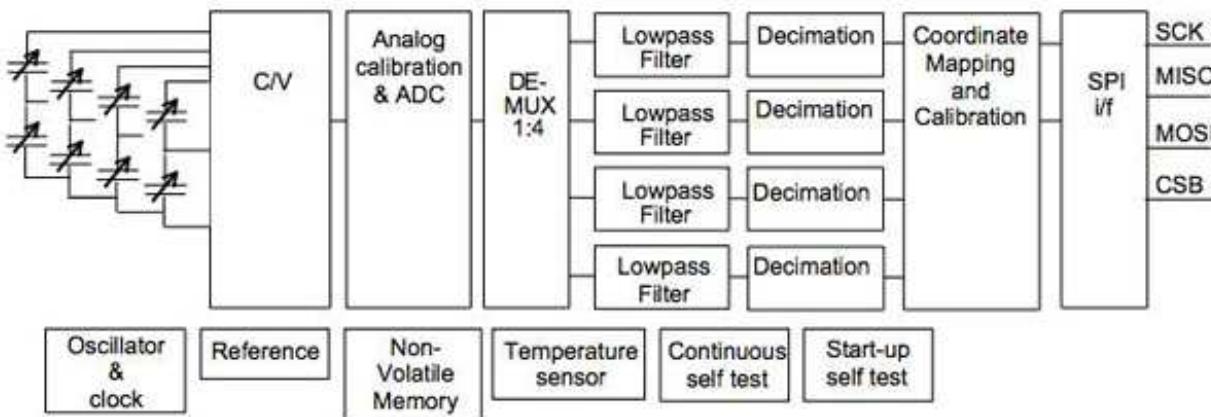




# Smart senzory

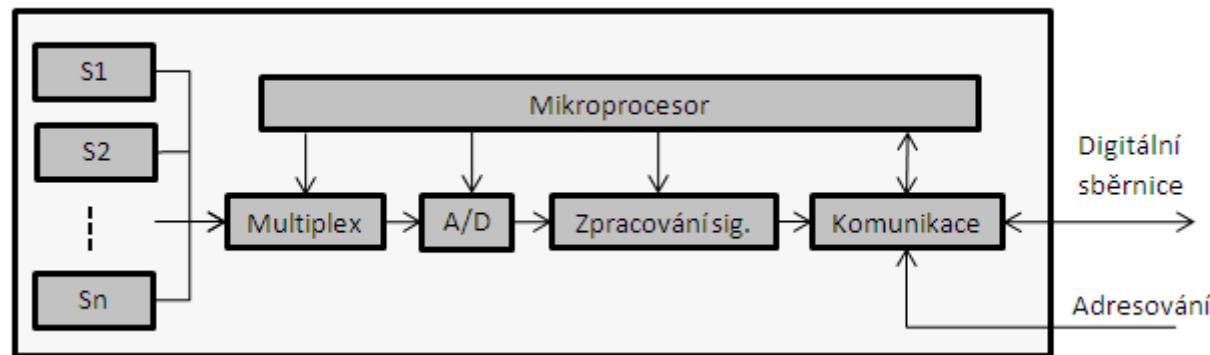
Struktura Smart senzoru:

- Snímací element
- Zesilovač signálu
- Převod dat (A/D převodník)
- Korekce, kompenzace
- Zpracování informace
- Komunikace
- Autodiagnostika, autokalibrace





# Struktura Smart senzoru

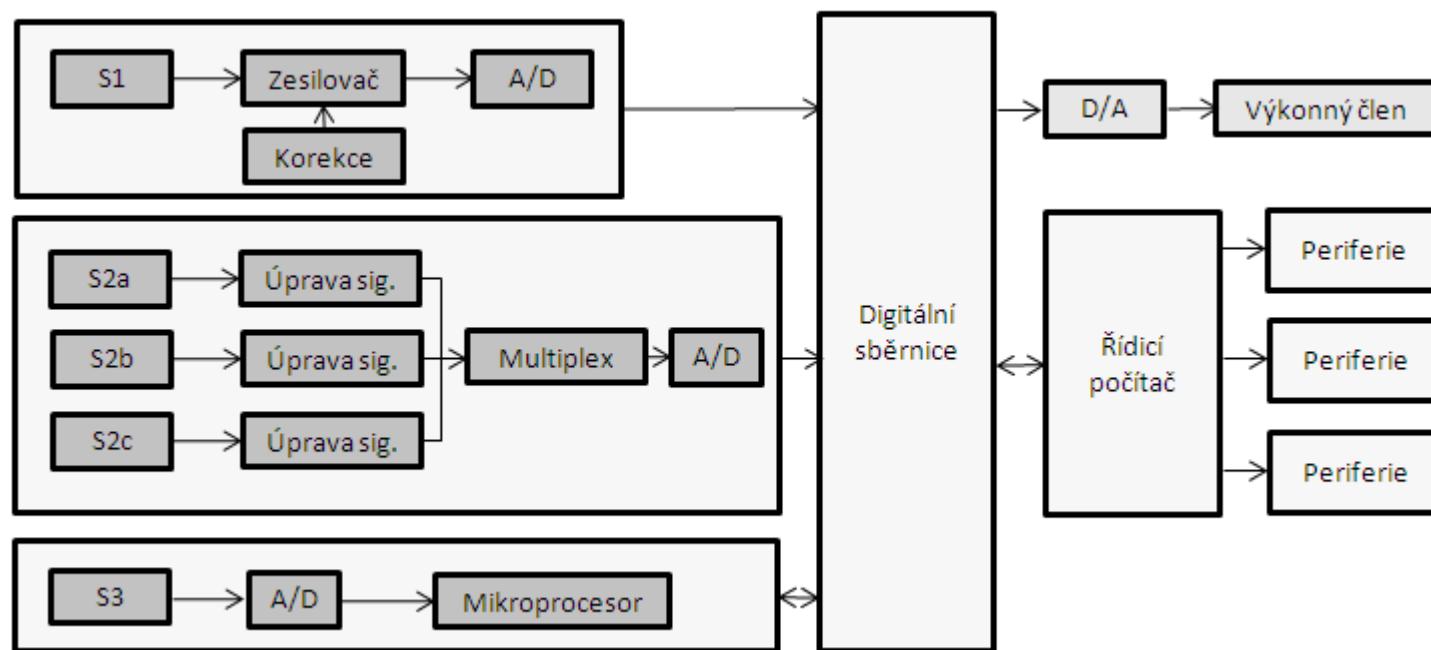


Struktura Smart senzoru





# Komunikace Smart senzoru s okolím

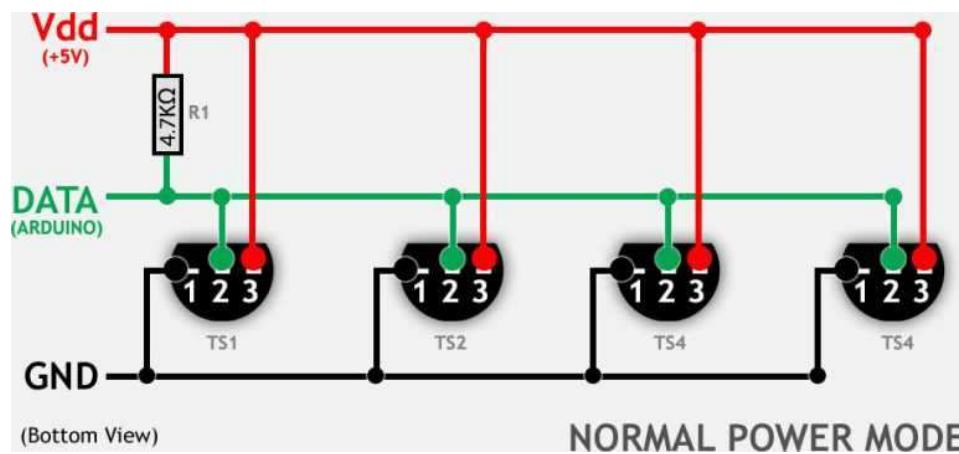
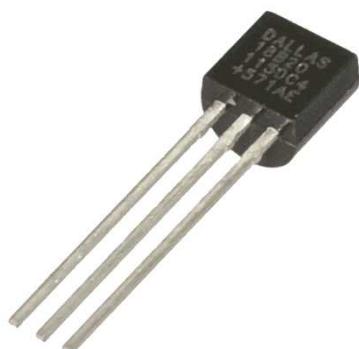
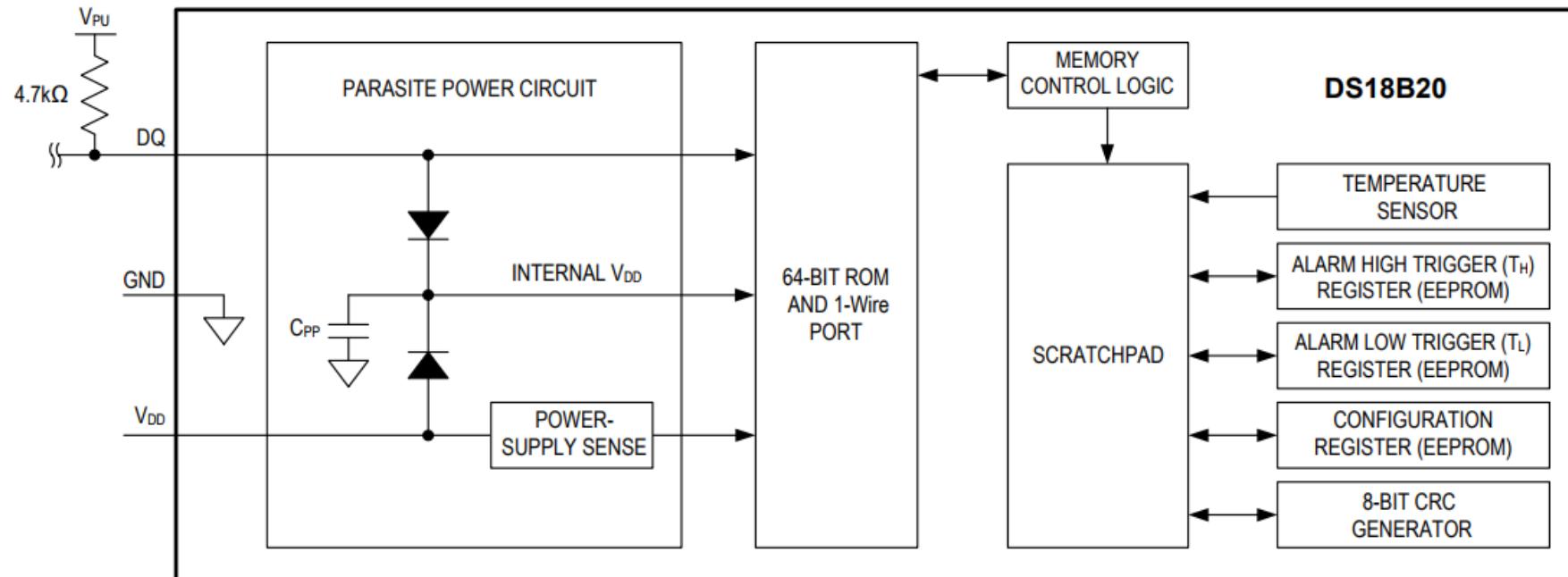


Komunikace Smart senzoru s okolím





# Teplotní čidlo s číslicovým výstupem DS18B20





## Smart senzory - Výhody

1. Malé rozměry řešení
2. Integrace do čipu
3. Nízká cena
4. Velká mechanická odolnost
5. Nižší nároky na konstruktéry





## Smart senzory - Nevýhody

1. Uzavřené řešení
2. Nedá se modifikovat
3. Menší citlivost
4. Nižší přesnost

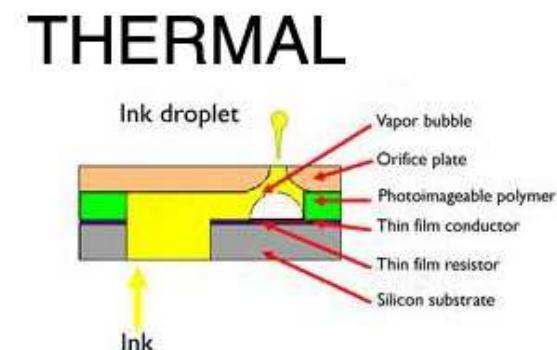
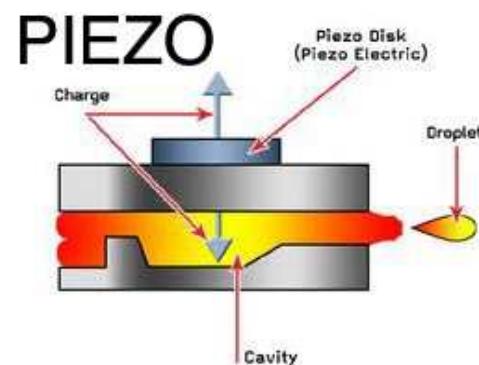
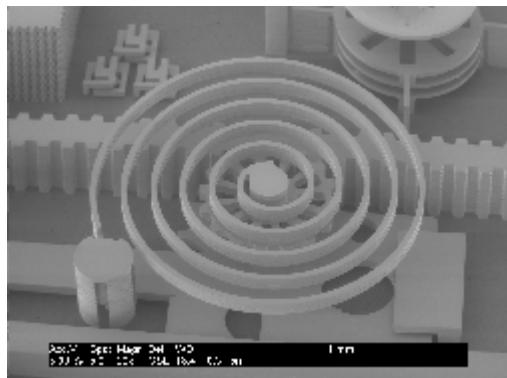




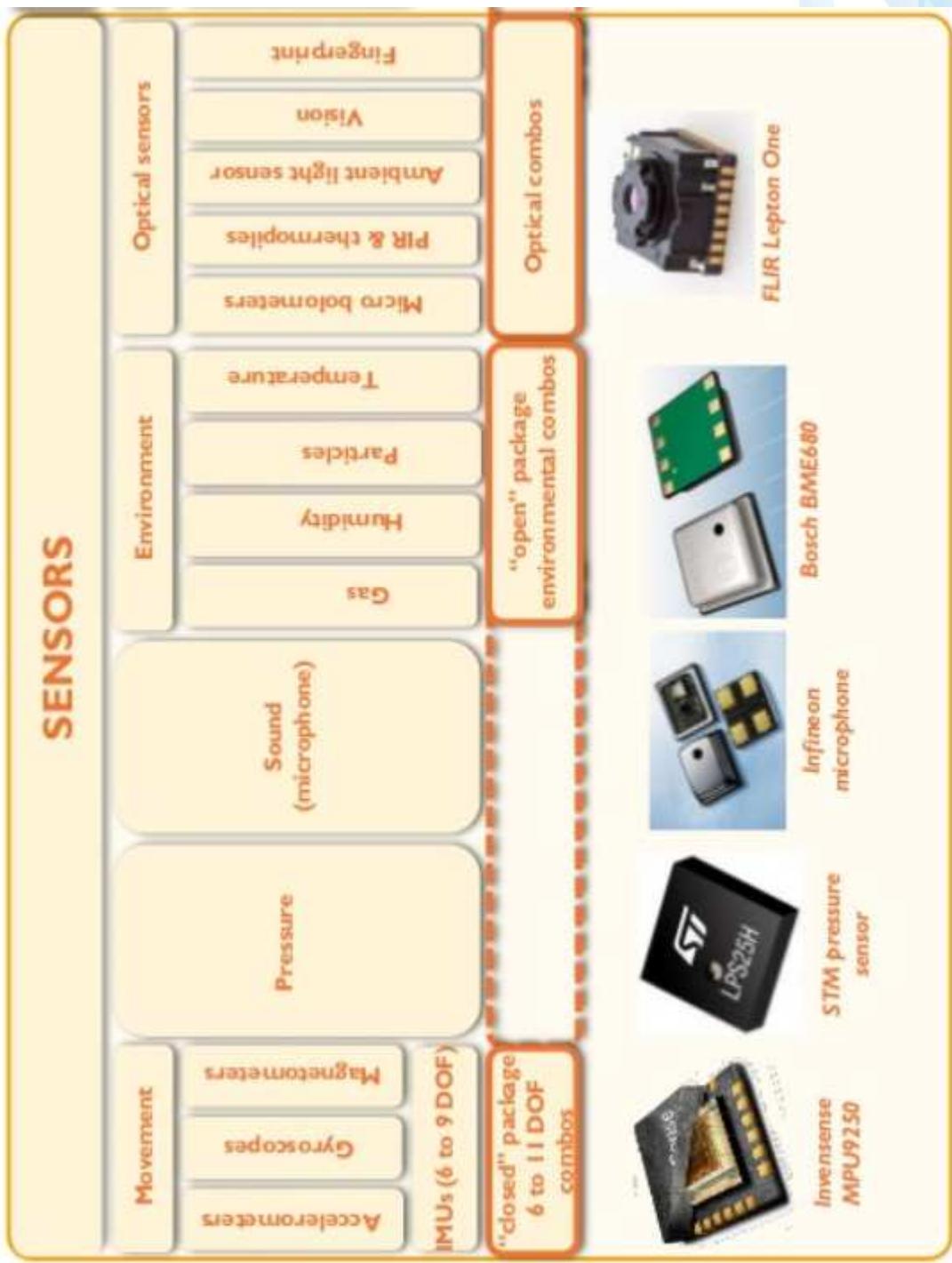
# MEMS technologie – snímače - aktuátory

## Základní vlastnosti

- MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems
- Podskupina Smart sensorů
- Spojení mikromechanických a elektronických prvků na jednom čipu
- Integrace mechanických elementů, senzorů, akčních členů, řídící a vyhodnocovací elektroniky **na jeden křemíkový substrát** prostřednictvím různých výrobních technologií.

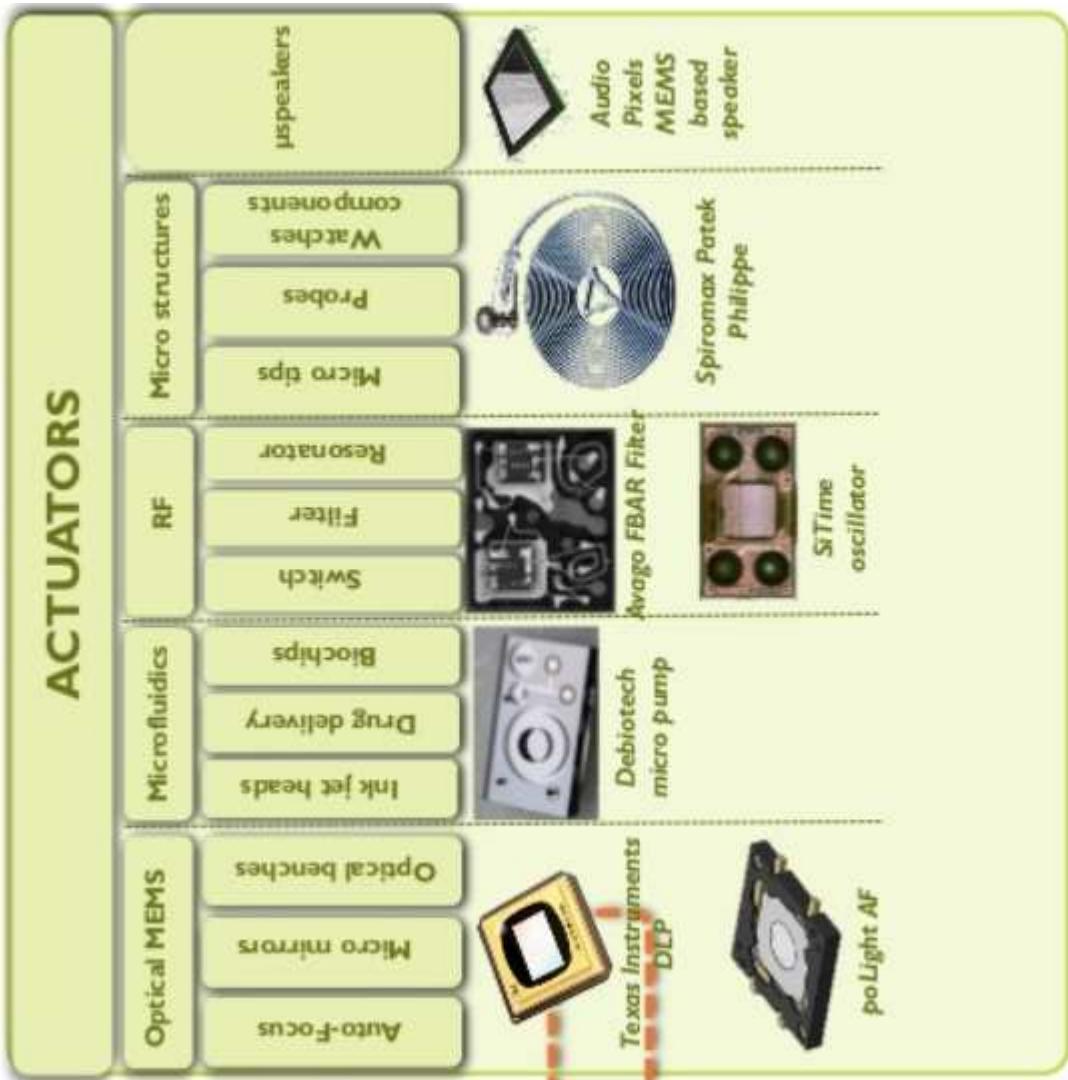


# SENSORS





## ACTUATORS





# MEMS snímače

## INERTIAL



Accelerometer



Gyroscope



Magnetometer



IMU

## ENVIRONMENTAL



Gas / Particle



Pressure



Temp/Humidity



Microphone

## OPTICAL



Visible



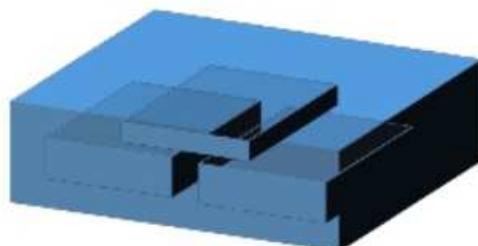
Proximity/ambient



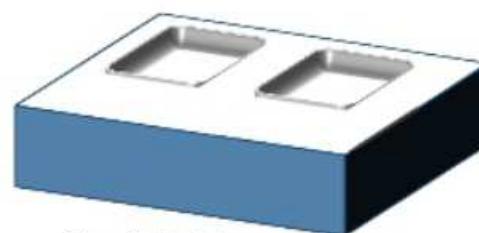
3D vision



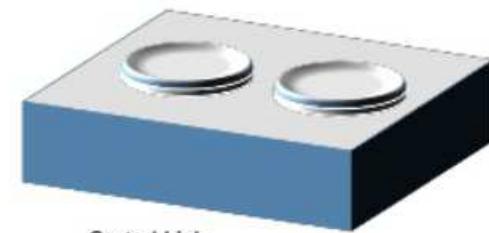
Multi spectral



Closed Package Hub



Open Cavity Hub

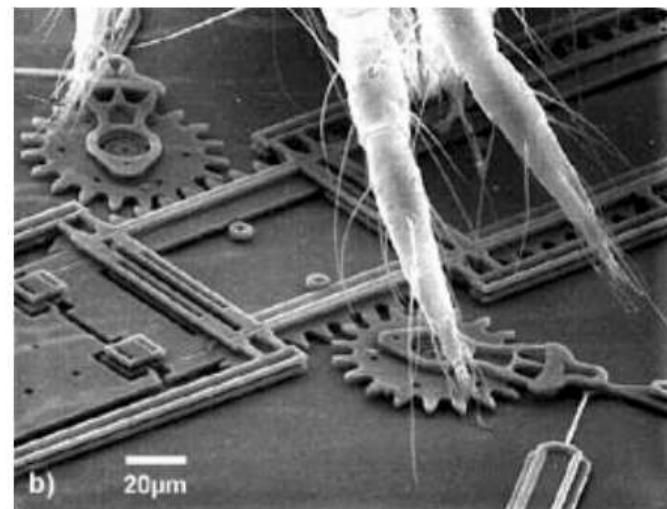
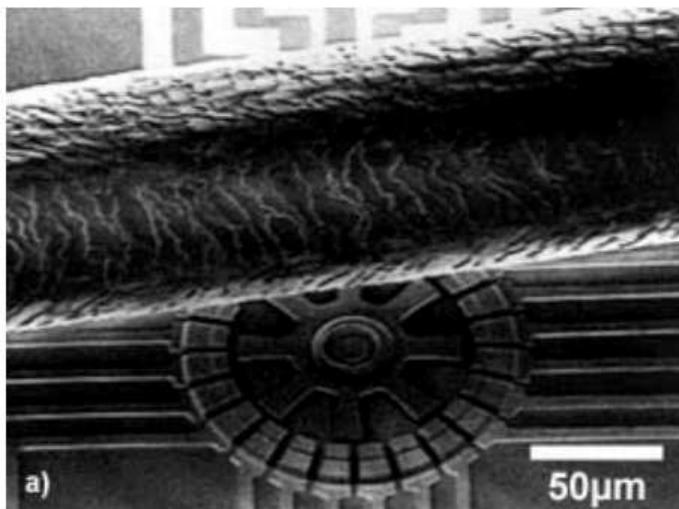


Optical Hub



## MEMS snímače výhody

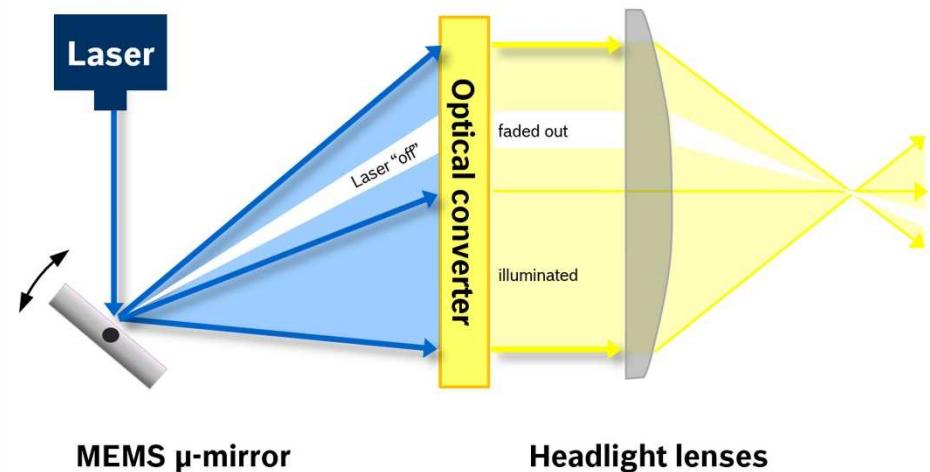
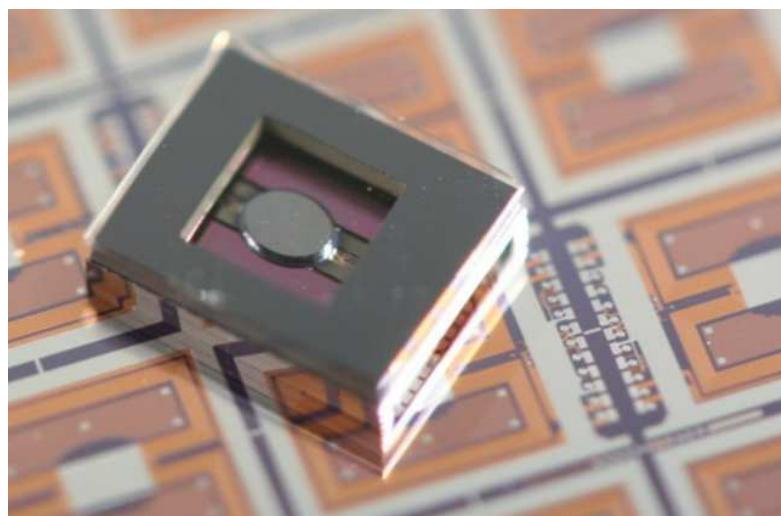
- miniaturizace - roboti ve velikosti menší než špendlíková hlavička - možnost přístupu do dříve nepřístupných prostor
- minimální spotřeba el. energie
- vyšší odolnost proti mechanickému namáhání
- kompaktnost celého systému
- nízké náklady na hromadnou výrobu ve velkých sériích





## MEMS snímače nevýhody

- Vysoké vývojové náklady
- Drahá výroba v malém množství
- Systémy jsou "na jedno použití" - nemožnost opravy
- Nízká cena a snadná dostupnost umožňují neautorizovanou konstrukci a výrobu zboží dvojího užití





## MEMS snímače

### Oblast využití

- Mikroelektromechanické systémy.
- BioMEMS / Mikrofluidika
- RF MEMS
- Mikrooptika

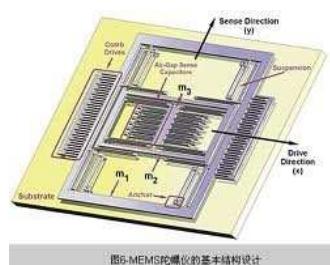
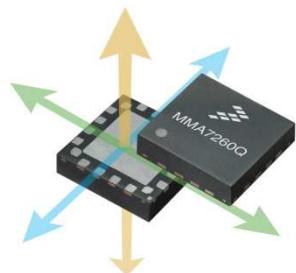




# MEMS snímače

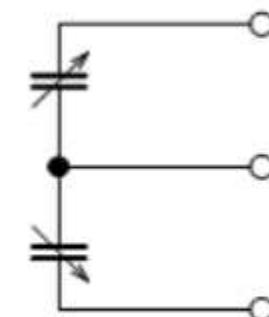
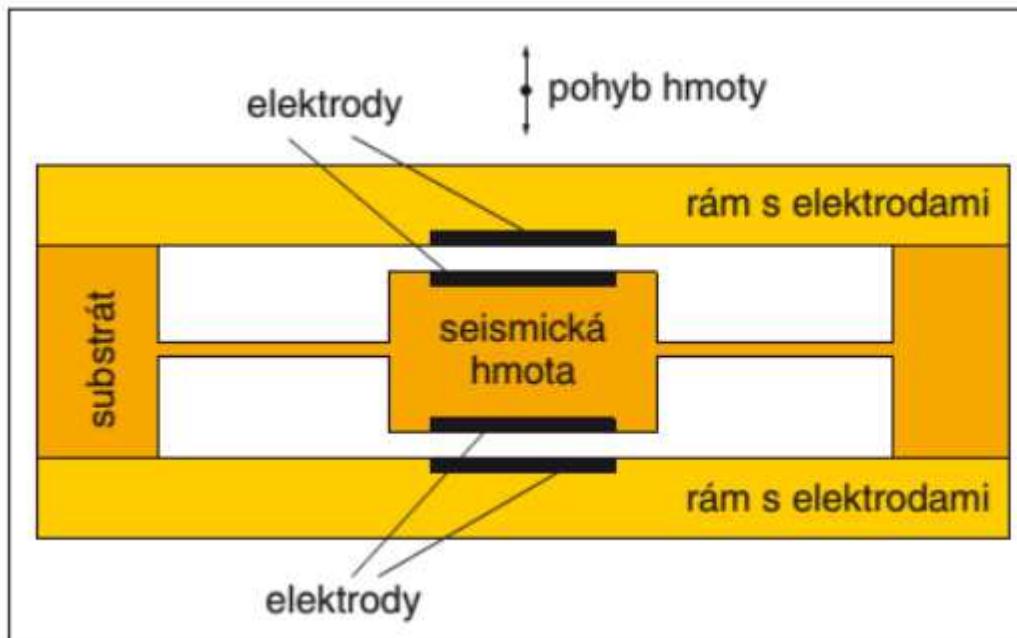
Mikroelektromechanické systémy.

- senzory setrvačnosti
  - akcelerometry
  - gyroskopy
- senzory tlaku
- akční členy
- přepínače relé,
- vstřikovače inkoustových tiskáren, trysky



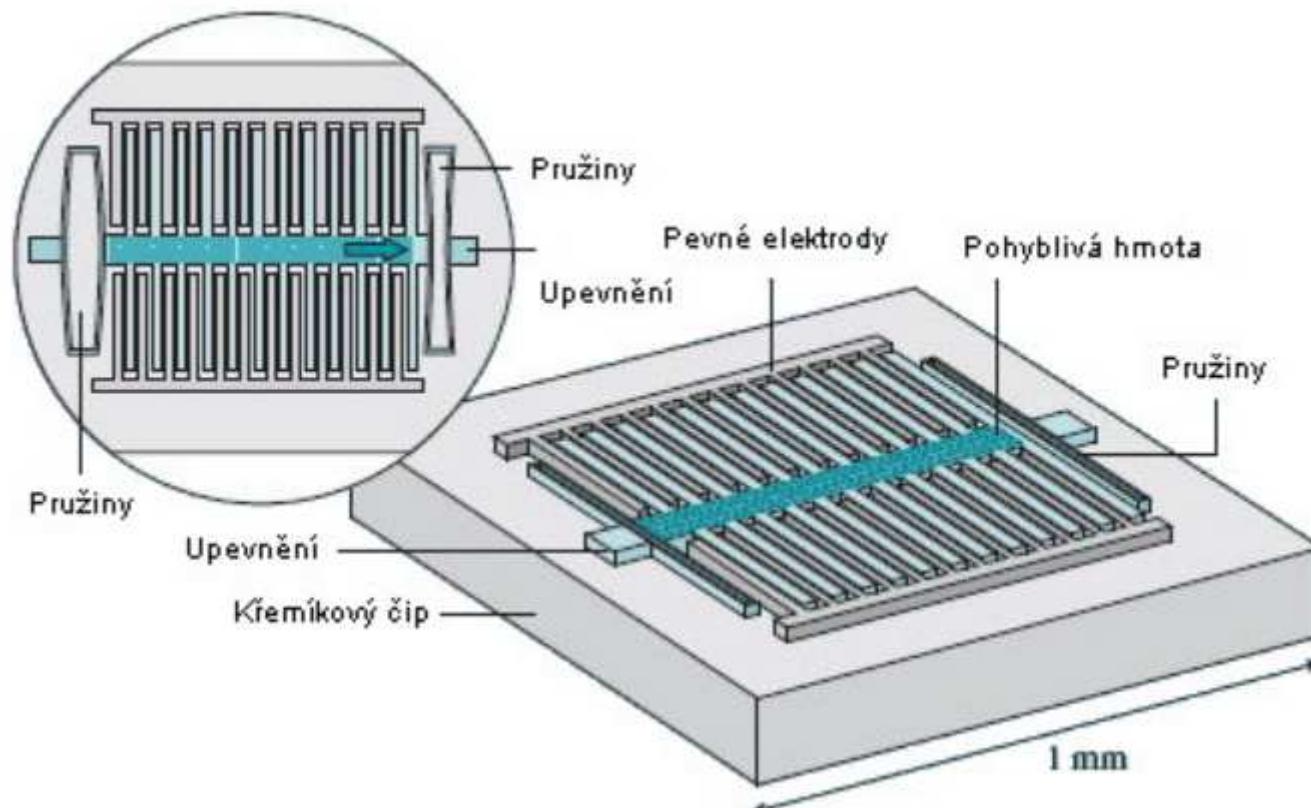


# MEMS kapacitní akcelerometr



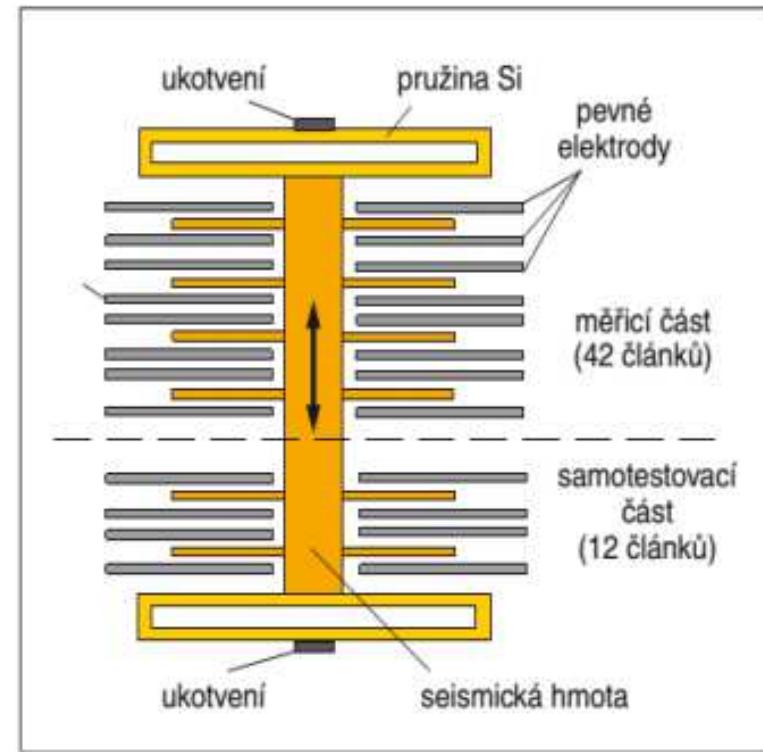
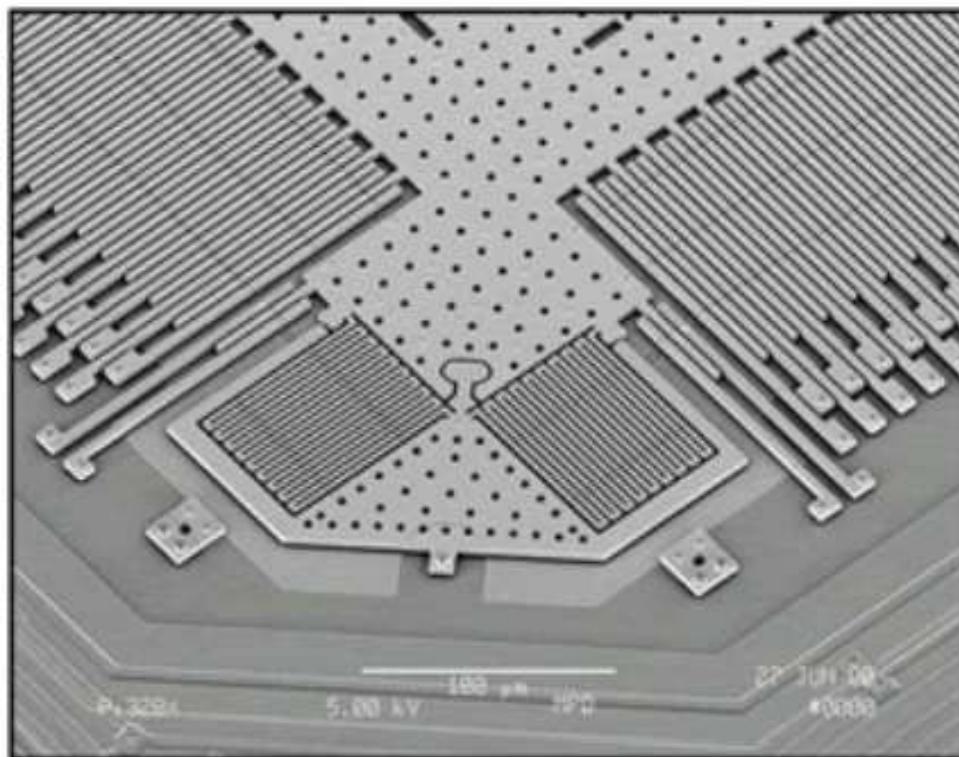


# MEMS kapacitní akcelerometr



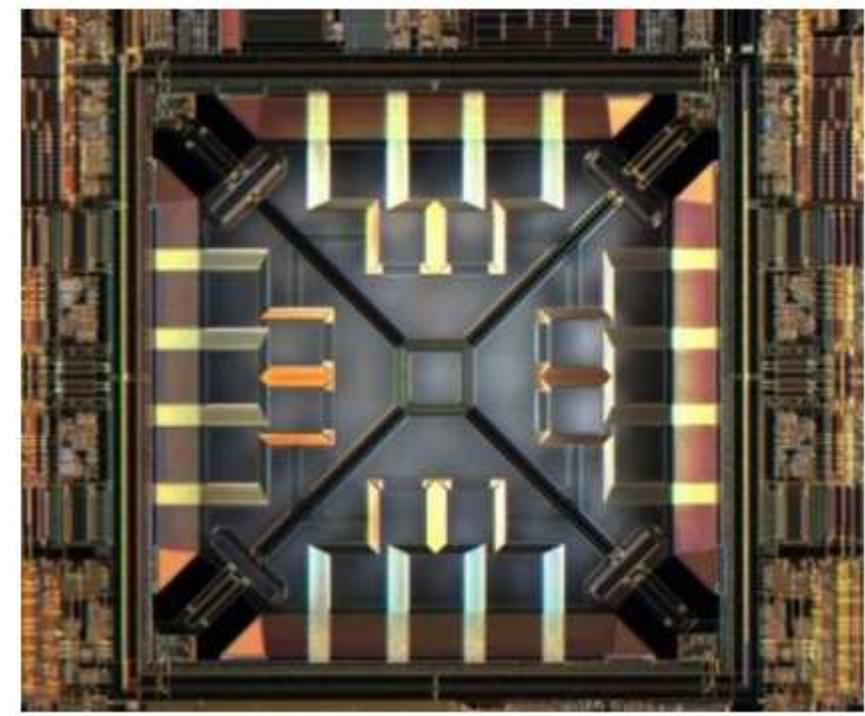
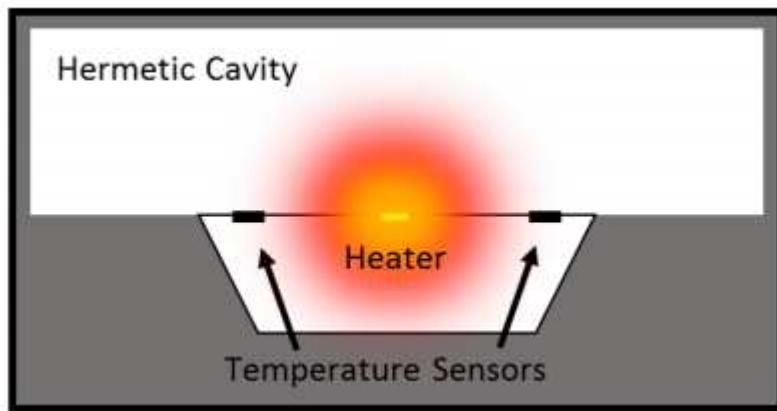


# MEMS kapacitní akcelerometr



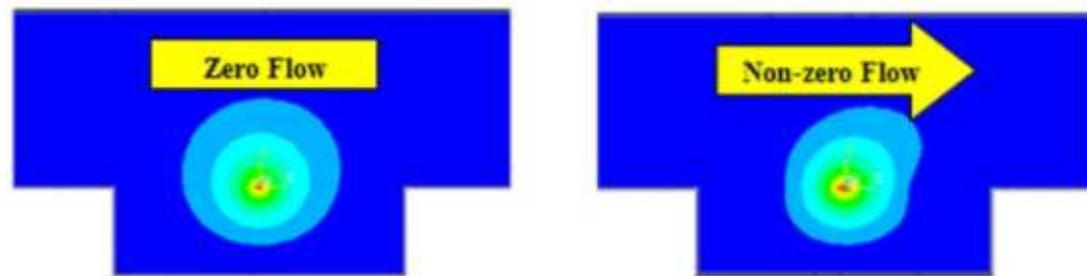
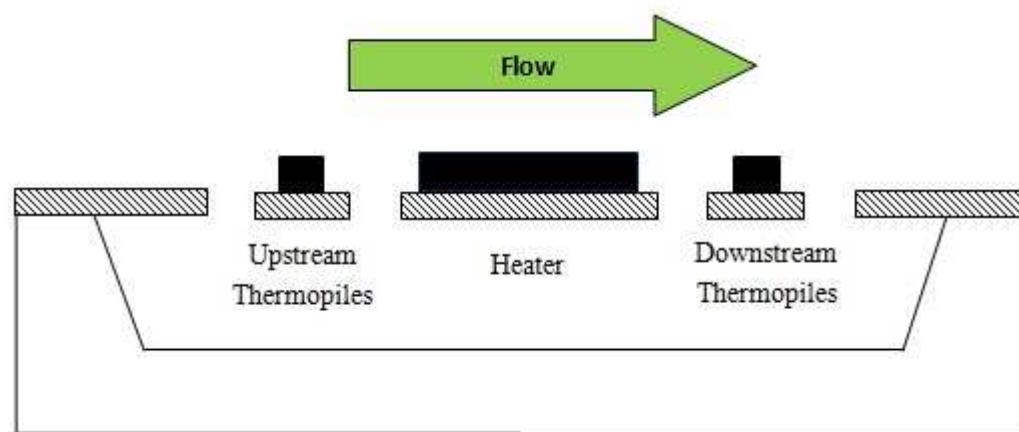


# MEMS tepelný akcelerometr



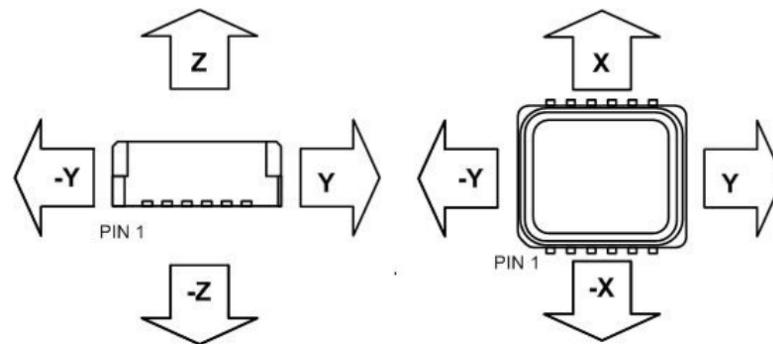
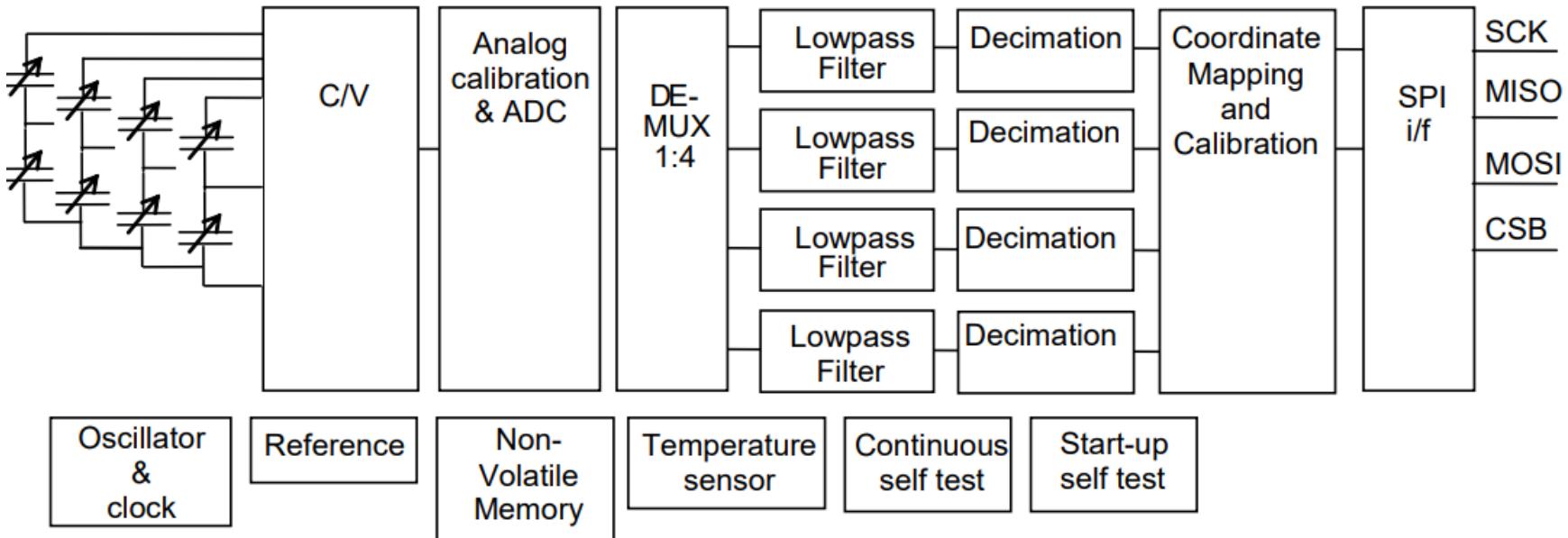


# MEMS průtokoměr plynů





# 3-osý akcelerometr SCA3100

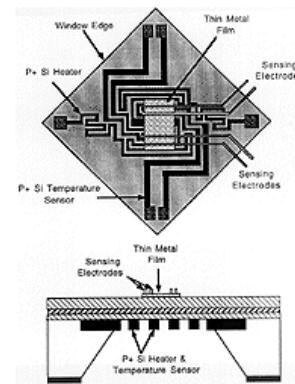
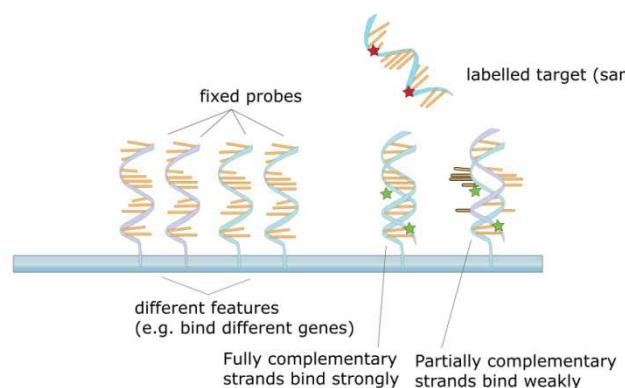




# MEMS snímače

## BioMEMS / Mikrofluidika

- identifikace DNA
- Polymerase Chain Reaction (PCR) microsystems
- senzory vůně a pachů
- detektory a analyzátoře složení plynů a kapalin

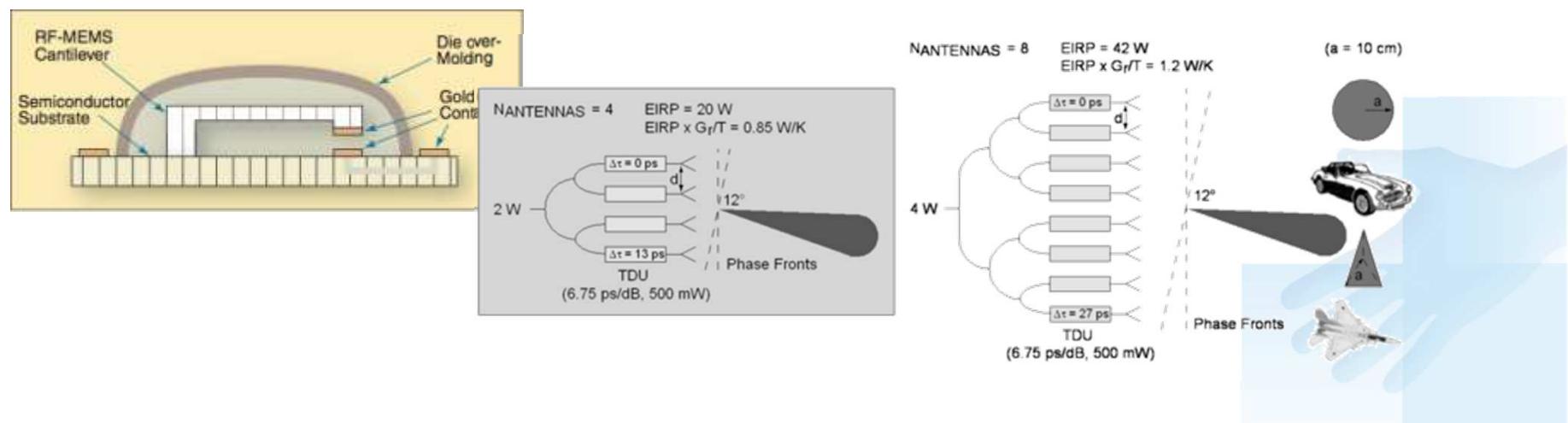




# MEMS snímače

## RF MEMS

- mikrovlnné/vysokofrekvenční generátory
- rezonátory, oscilátory
- filtry
- spínače, přeladitelné kondenzátory...

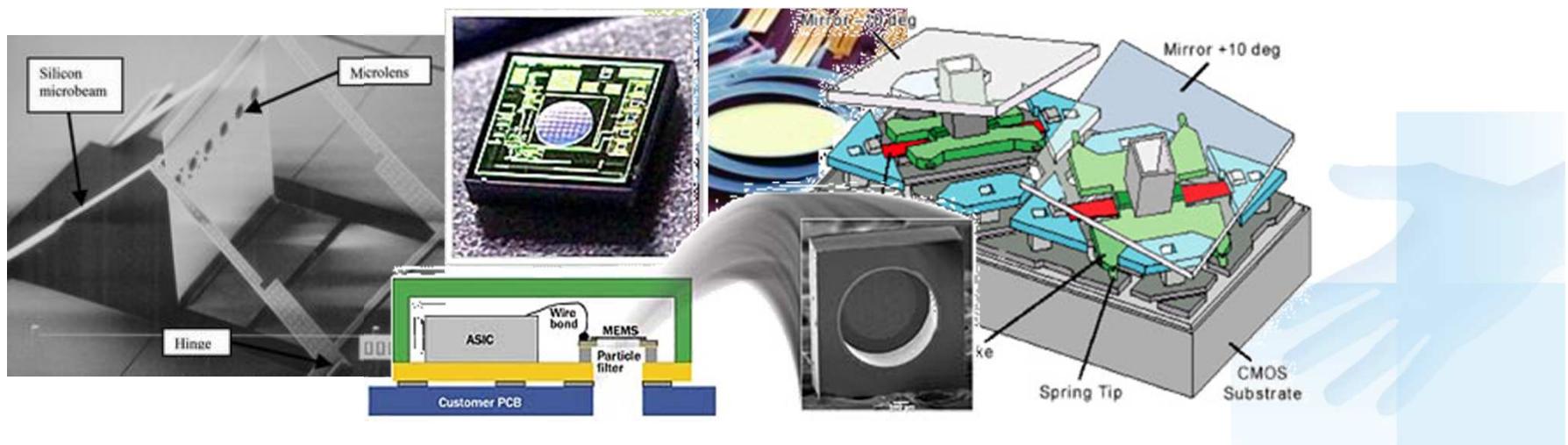




# MEMS snímače

## Mikrooptika

- optické mikrofony
- směrovače a přepínače paprsků, modulace paprsku světla, čočky, mřížky
- rozdělování a spojování paprsků
- interferometry apod.

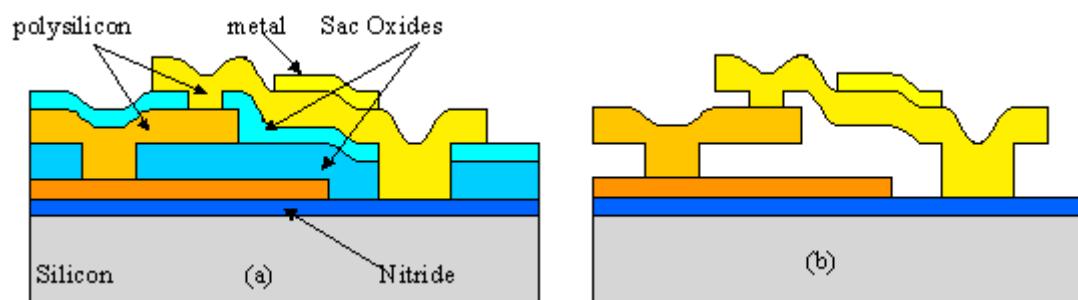




## MEMS - Technologie výroby

Při výrobě MEMS se využívají 3 základní kameny, které jsou schopné deponovat tenký film materiálu na substrát, který umožňuje použít vymaskování požadovaného tvaru a profilu a jeho vytvarování. K tomu se nejčastěji využívá následujících metod:

- depozice (Deposition), ukládání
- litografie (Lithography)
- selektivní leptání (Etching processes)





# MEMS snímače Technologie výroby

## Technologie výroby

Integrated Thin Film Resistor & Bias Line



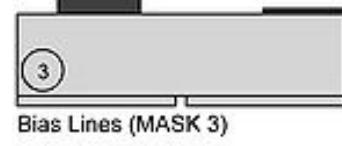
Resistor Layer (MASK 1)

RF MEMS Varactor

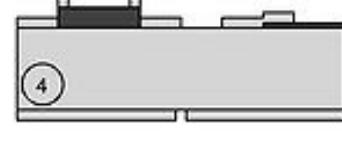
Fused Silica ( $\epsilon_r = 3.78$ ,  
 $h = 10 \text{ mil}$ ,  $\tan \delta = 0.0002$ )



Slot Layer (MASK 2) Au

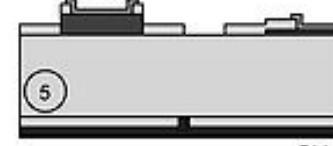


Bias Lines (MASK 3)



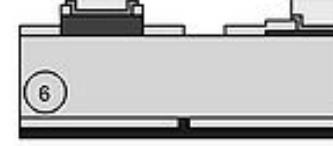
Electrode Layer (MASK 4)

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



Dielectric Layer (MASK 5)

PMMA



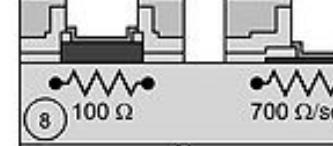
Sacrificial Spacer (MASK 6)

100 Ω



Electroplating (MASK 7)

CMEMS



Beam Definition (MASK 8)  
Release & CPD



Michigan Nanofabrication Facility  
Class 100 Clean Room



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství, FEI, VŠB-TU Ostrava

Senzory a měření  
9-Výška hladiny

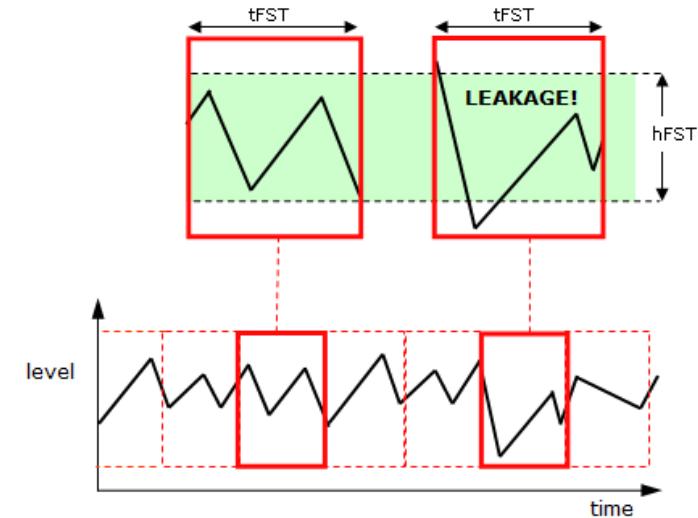
<http://cbe.vsb.cz>

# Měření hladiny

- Často se hovoří o měření výšky hladiny, ale v praxi se jedná o zjišťování množství látky (objemu) v nádrži.
- Objem je možné vypočítat při znalosti tvaru nádoby:
  - Pokud se měří v nádobách, u kterých se průřez s výškou nemění, je vyčíslení snadné
  - Obtížnější je to např. v ležatých zásobnících, kde je potřeba počítat také s vyklenutím dna, případně vestavbami v nádrži
- Látky jejichž hladina se měří se značně odlišují svým charakterem:
  - Čistá voda, hořlaviny, viskózní látky, lepkavé látky, korozivní kapaliny, suspenze s abrazivními účinky
  - Tekoucí prášky, vlhké či spékající se látky
- Prostředí pro snímače je různorodé:
  - Od vakua až po velké tlaky, široké rozmezí teplot

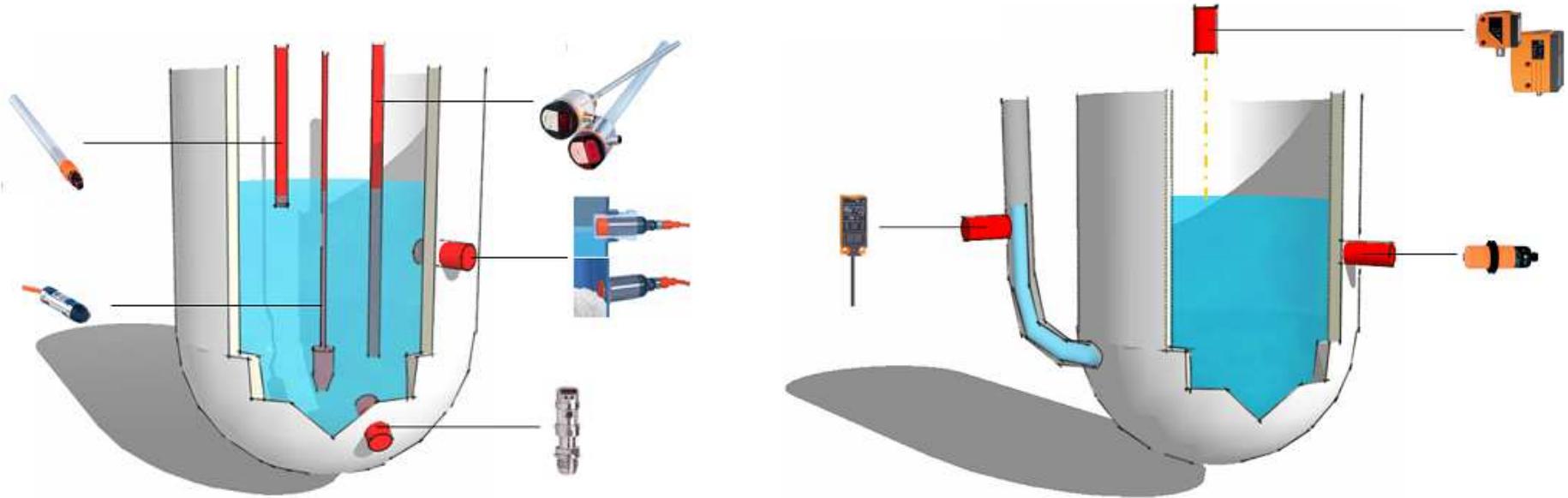
# Spojité měření vs. měření dosažení hladiny

- Spojité měření hladiny v rámci určitého rozsahu
- Někdy je dostatečné detektovat dvojstavově dosažení (či opak) určité výšky hladiny „point level“



# Volba metody a tedy senzoru

- Volba je ovlivněna mnoha faktory
  - Tlak – otevřené či uzavřené nádoby
  - Teplota
  - Korozivní účinky měřeného média
  - Rozsah, citlivost a přesnost
  - Spojité měření či jen indikace určitých mezních stavů
  - Kontakt s médiem či bez kontaktu (obr.)



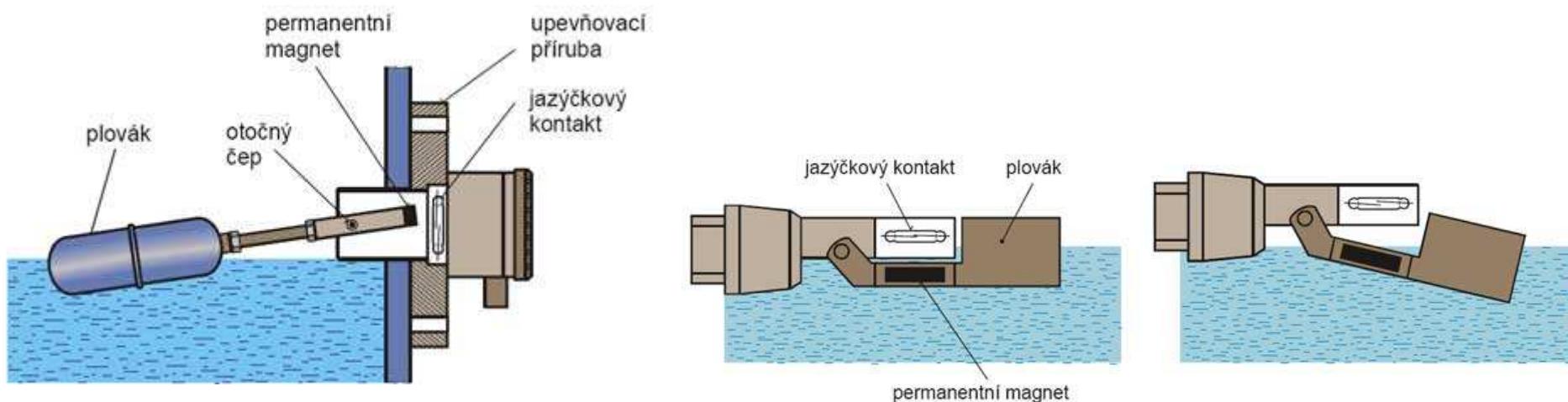
# Mechanické hladinoměry

Skupina	Typ snímačů	Princip měření	Možnosti použití
mechanické	plovákové	snímání polohy plováku	vhodné zejména pro čisté a neviskózní kapaliny
	vztlakové	měření a kompenzace vztlakové síly ponorného tělesa	vhodné zejména pro čisté a neviskózní kapaliny, včetně měření polohy mezi hladinou kapalin; údaj závisí na hustotě měřeného média
	elektromechanické	periodické spouštění závaží k hladině	spojité měření výšky násypu sypkých látok
	vibrační	vyhodnocení útlumu vibrací indikačního prvku	vhodné pro limitní měření polohy hladiny kapalin i sypkých látok; nezávisí na elektrických vlastnostech měřeného média, na turbulenci hladiny ani na velikosti částic; nevyžaduje kalibraci
	vrtulkové	vyhodnocení útlumu otáčení indikačního prvku	vhodný pro limitní měření sypkých hmot (prachy, granuláty); nevadí prašné prostředí; nevyžaduje kalibraci

- Historicky nejstarším měřidlem je tyčové měřidlo
- Průhledové hladinoměry
  - Skleněné trubice či průzory (zanáší se rzí a úsadami)
  - Jednoduché, ale neposkytuje signál pro přenos
- Hladinoměry založené na měření hmotnosti celého zásobníku
  - Nádrž se váží vhodným siloměrným členem - tenzometr

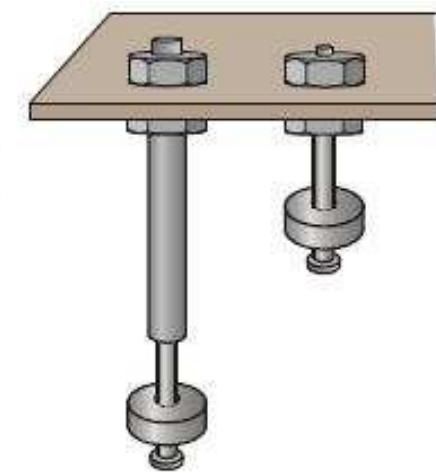
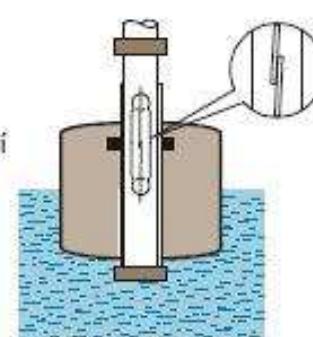
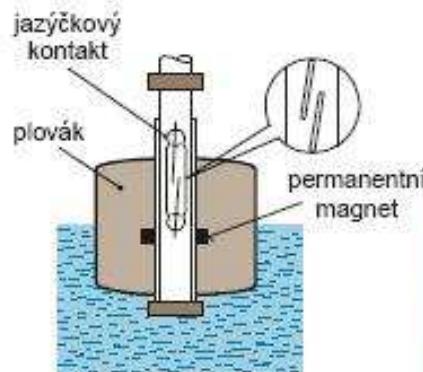
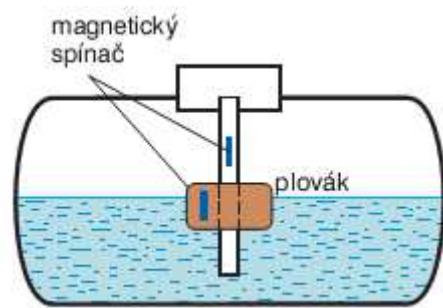
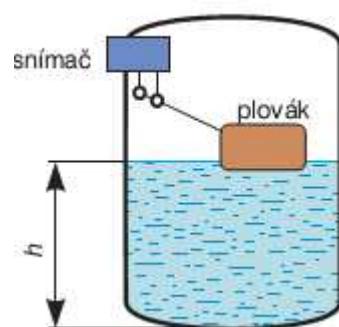
# Plovákové hladinoměry

- Plovák – tenké lehké těleso, buď duté nebo vyrobené z materiálu o malé hustotě
- Poměr ponořené části plováku se rovná poměru hustot plováku a kapaliny
- Pro malé změny hladin (1m) se používá tvar koule, pro velké změny má plovák tvar válce na vodicí tyči
- Plovák bývá přímo v nádobě zavěšený na tyčích, lanech
- Poloha se odečte z polohy protizávaží nebo převod na el.
- Převodníkem může být odporový vysílač. Tento snímač musí vykazovat nízký třecí moment a dlouhou životnost



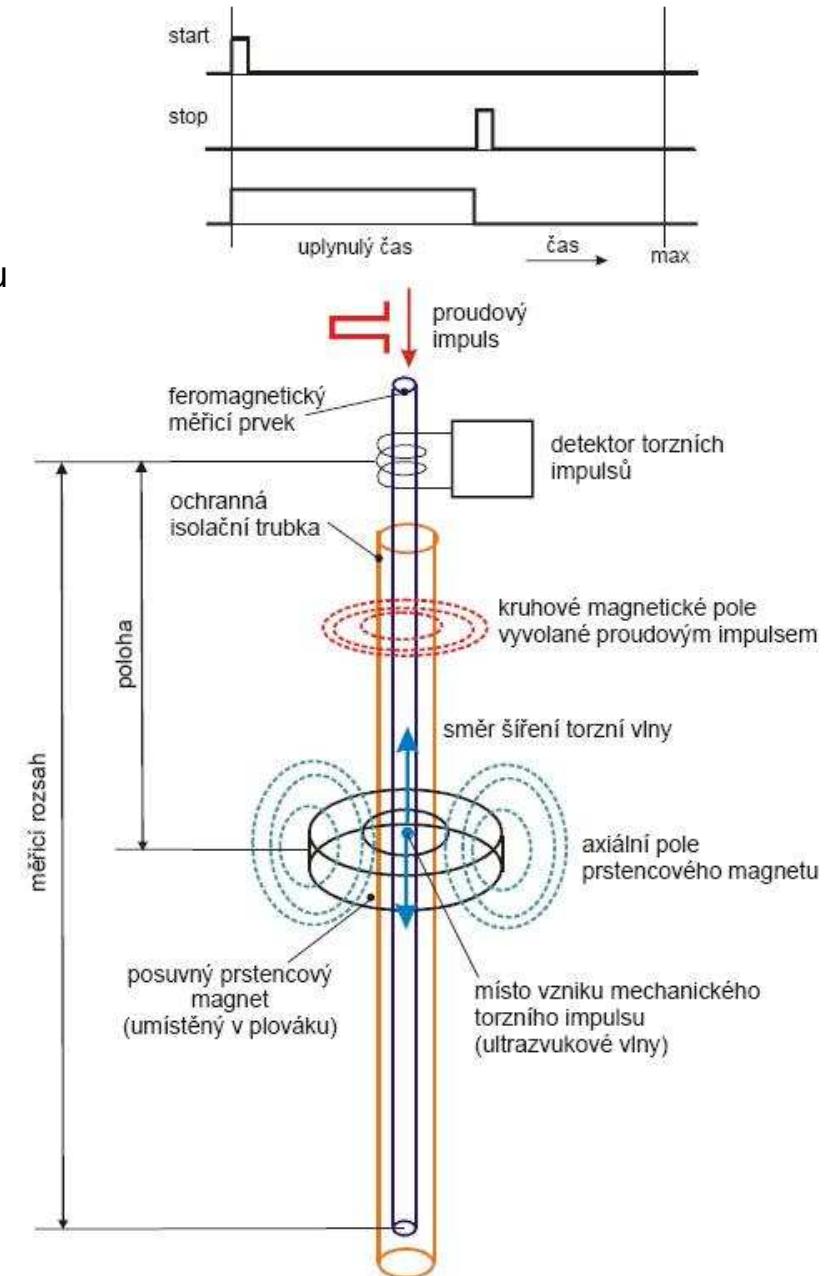
# Plovákové hladinoměry

- V uzavřených nádobách mívá plovák tvar prstence na vodicí tyči
- Snímání může být magnetickými spínači nebo pohyb je vyveden přes magnetickou spojku



# Plovákové hladinoměry

- Magnetostriční senzor s prstencovým magnetem
  - Uvnitř tyče je vodič napájený impulsy proudu o délce asi 2  $\mu$ s
  - impuls elektrického proudu protékajícího středem vlnovodu vytvoří magnetické pole radiálně působící okolo vlnovodu a šířící se s proudovými impulsy podél vlnovodu rychlostí světla.
  - Mag pole vodiče a mag pole prstence vytvoří impuls kroutícího momentu, který se šíří ke koncům trubky
  - Ze známé rychlosti (přibližně 2 800 m.s<sup>-1</sup>) a doby šíření mechanického rozruchu se určí poloha plováku



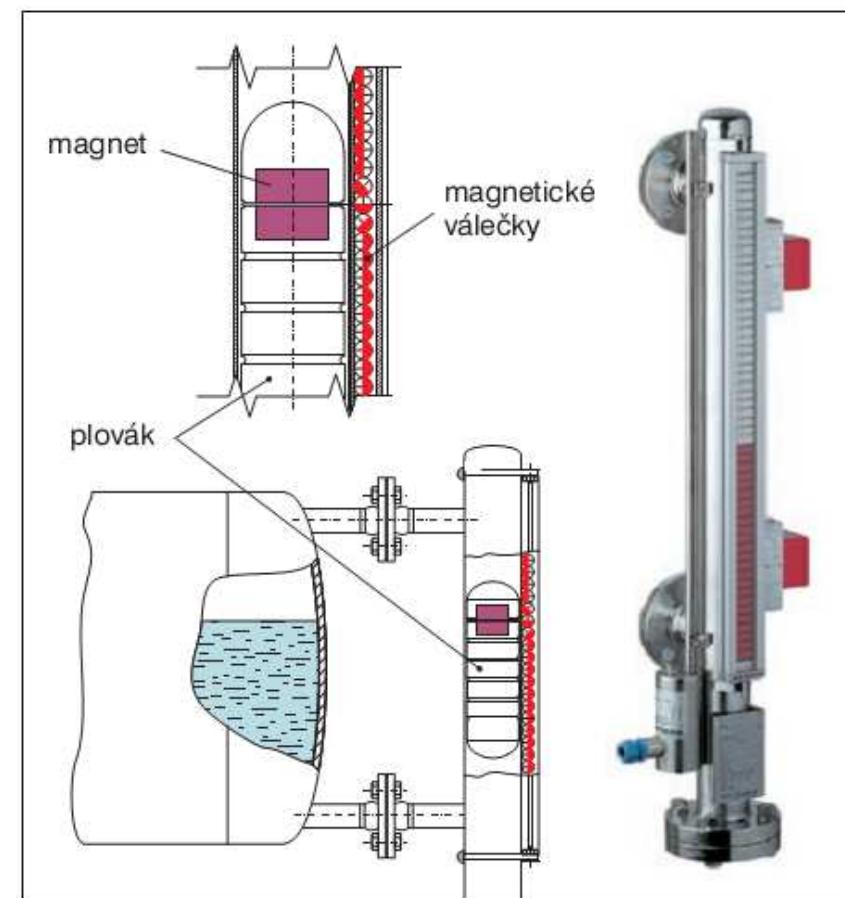
# Plovákové hladinoměry

- Přesnost závisí na tvaru a průřezu plováku, dále na pasivních odporech mechanismu
- Ideálně plovák nemá horizontální plochy kde se usazují nečistoty či kapky kapaliny (změna hmotnosti)
- Materiál mosaz, nerez, plasty



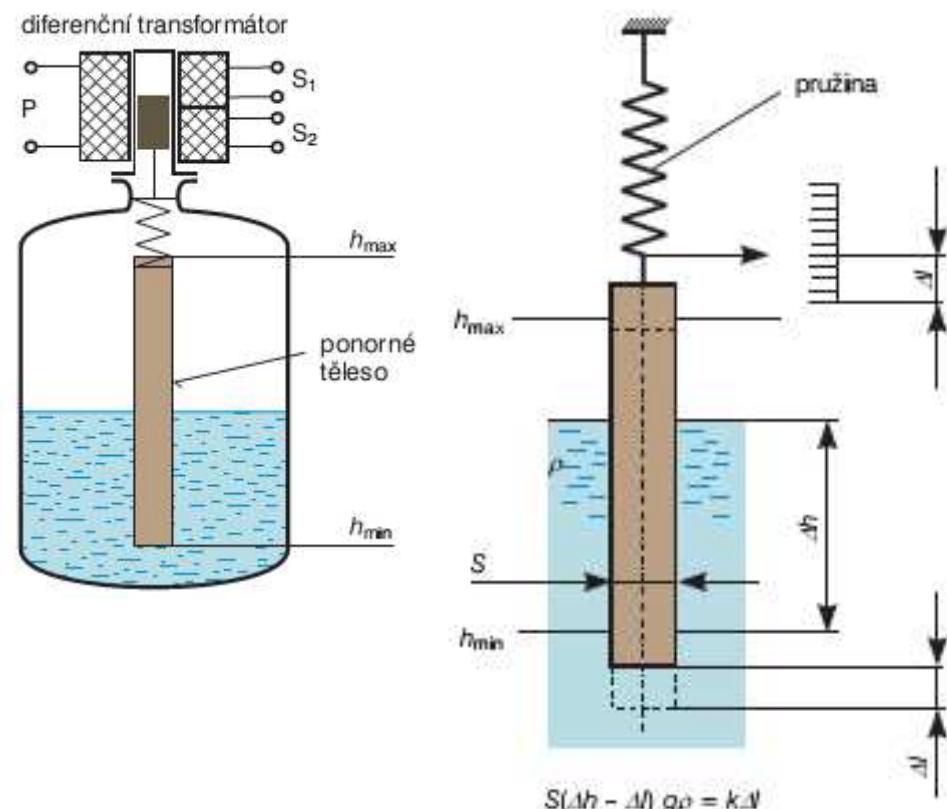
# Plovákové hladinoměry

- Obtokový hladinoměr s magnetickými válečky
- Z pohledu uživatele je to analogie průhledového hladinoměru



# Plovákové hladinoměry vztlakové

- Vztlakový hladinoměr využívá Archimédův zákon a pracuje na principu vyrovnání sil.
- Síla působící na pružinu je dána vlastní tíhou tělesa zmenšenou o vztlakovou sílu
- Hustota kapaliny musí být konstantní
- Tíha tělesa musí být větší než vztlak při plném ponoření
- Snímání polohy např. diferenčním transformátorem
  - Změnou polohy jádra se mění vzájemná indukčnost
- ! Proudění a turbulence !



# Plovákové hladinoměry

- Elektromechanický hladinoměr
- Periodické spouštění závaží
- Detekce uvolnění lanka
- Měřicí rozsah až 70m



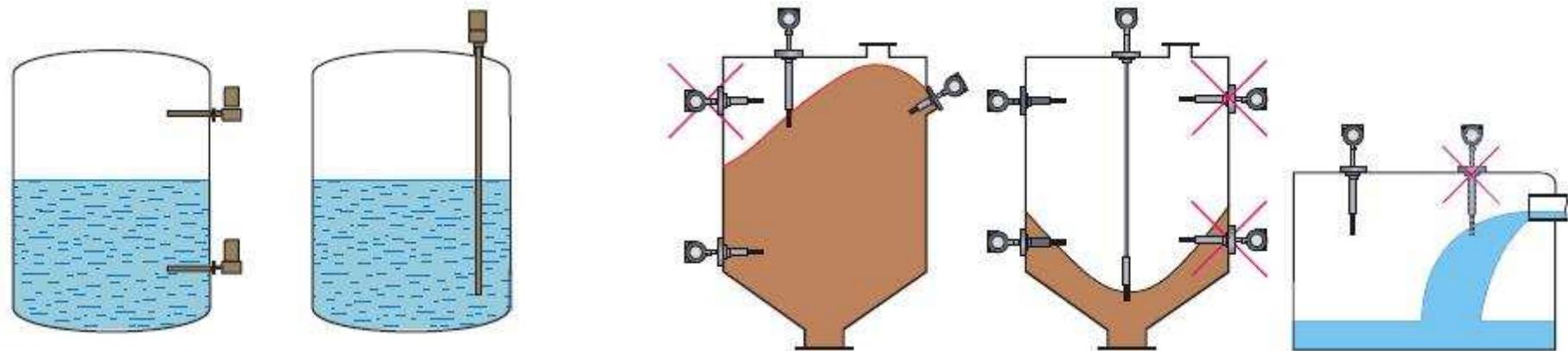
# Plovákové hladinoměry

- Vibrační hladinoměr
  - Kmitající prvek na rezonanční frekvenci se při ponoření či styku s materiélem utlumí
  - Snímač mezních stavů
- Vrtulkový hladinoměr
  - Útlum, zpomalení či zastavení vrtulky



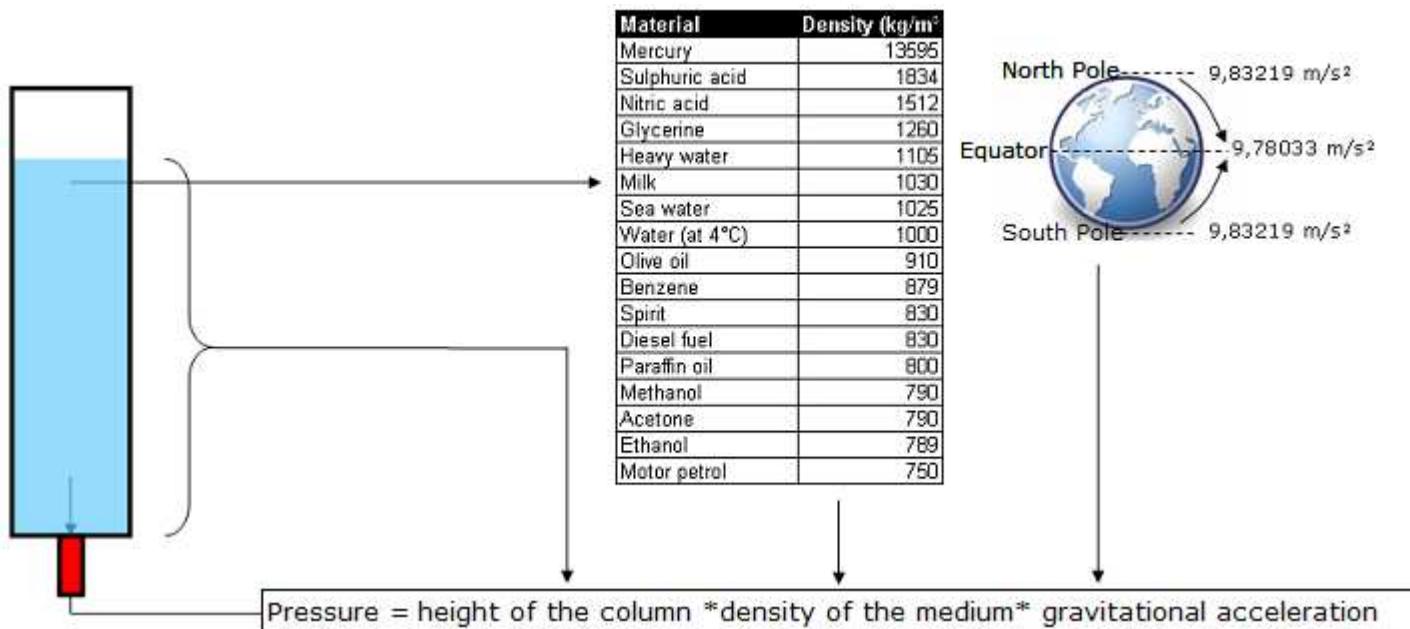
# Instalace a montáž vibračních spínačů hladiny

- Při vertikální montáži spínače do horního víka nádrže může být sonda vyjmuta bez vypouštění kapaliny.
- Jedna sonda umístěná do víka může zahrnovat i více hladinových spínačů.
- U hladin s turbulencí na povrchu je vhodné umístit hladinový spínač do uklidňovací trubice k zabránění oscilací a mnohonásobného spínání.
- Spínač by neměl být vystaven proudu přitékajícího materiálu do nádrže, v případě potřeby je vhodné jej shora chránit stříškou proti padajícímu materiálu.
- Při horizontální instalaci se snímač umisťuje tak, aby ramena vidlice kmitala horizontálně, aby materiál mohl volně propadat a neovlivňoval oscilace senzoru



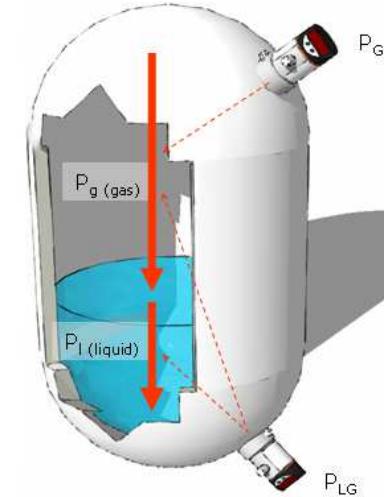
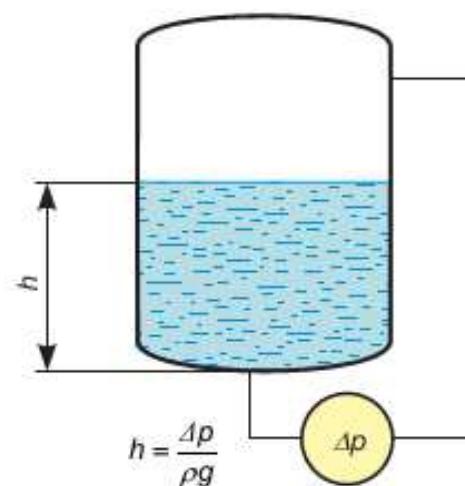
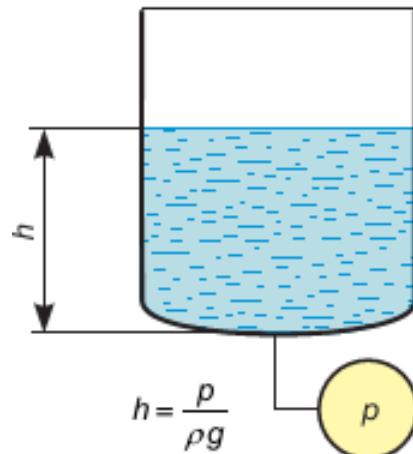
# Hydrostatické hladinoměry

- Poloha hladiny se vypočtuje z hydrostatického tlaku po sloupce kapaliny v nádrži
  - Výsledek měření závisí na hustotě a tedy i teplotě kapaliny!



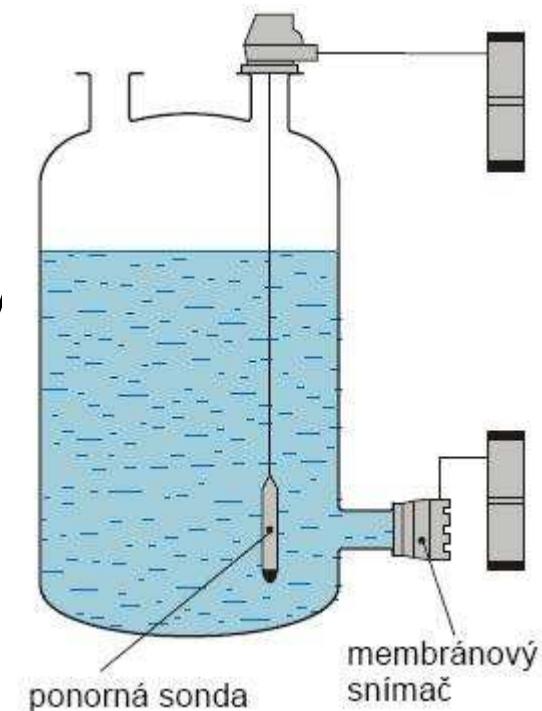
# Hydrostatické hladinoměry

Skupina	Typ snímačů	Princip měření	Možnosti použití
hydrostatické	snímače hydrostatického tlaku	měření hydrostatického tlaku	vhodný zejména pro čisté kapaliny; údaj závisí na hustotě měřeného média
	pneumatické s probubláním	měření hydrostatického tlaku při probublání měřeného média vzduchem	výhodou je nízká pořizovací cena; údaj závisí na hustotě měřeného média



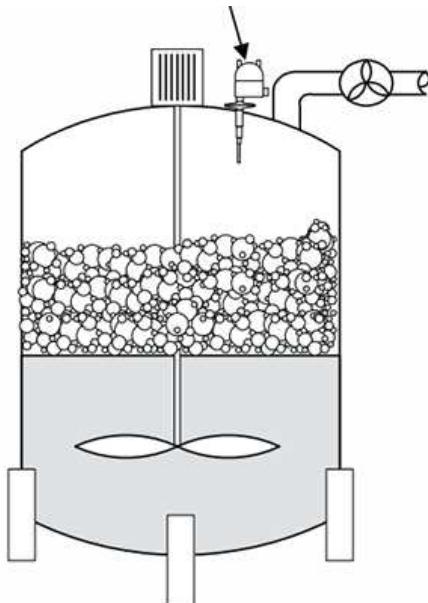
# Hydrostatické hladinoměry ponorná sonda

- Ponorné sondy jsou vhodné pro měření polohy hladiny v zásobnících s výškou obvykle větší než 0,6 m, zejména pak jsou vhodné pro měření ve vrtech hlubokých až 200 m.
- Podstatnou součástí je membrána s tenzometrickým snímačem. Tenzometrický senzor je chráněn oddělovací membránou z korozivzdorného materiálu nebo plastu. Hydrostatický tlak, přímo úměrný výšce hladiny kapaliny nad oddělovací membránou, je přenášen prostřednictvím náplně inertního oleje na měřicí polovodičový čip s tenzometrickým můstekem.



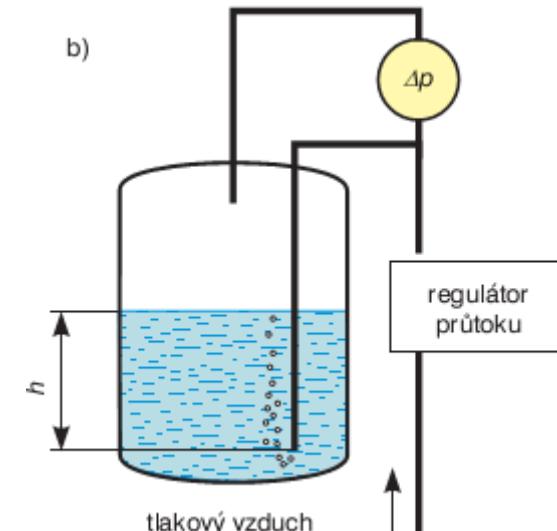
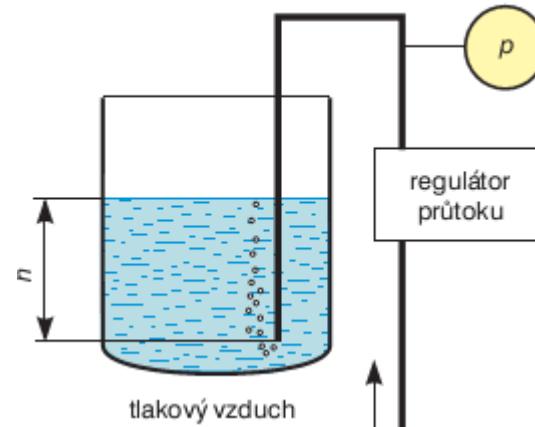
# Hydrostatické hladinoměry

- Předností hydrost. hladinoměrů je nezávislost na tvorbě pěny a na elektrických vlastnostech měřené látky
- Nevýhodou je závislost na hustotě (teplotě) média a nebezpečí zamrznutí přívodů ke snímači, který je mimo uzavřené objekty



# Hydrostatické hladinoměry probublávací

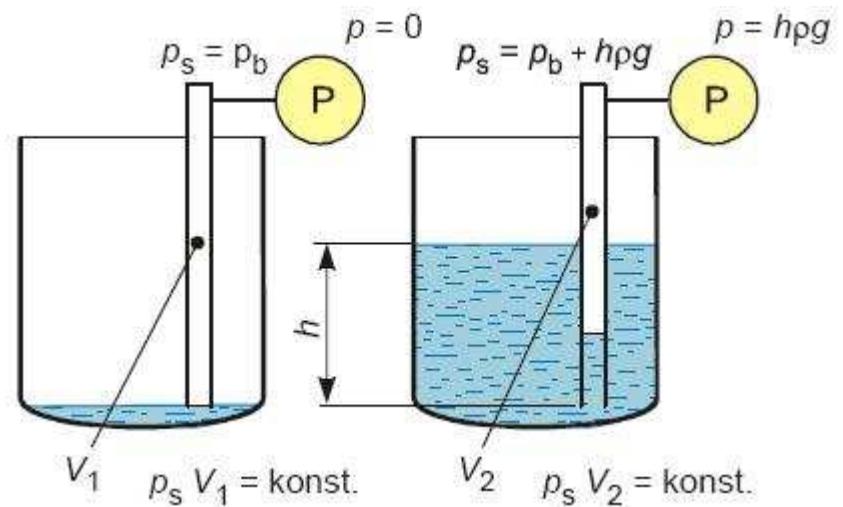
- Měření s probubláváním používají se při práci s agresivními, silně znečištěnými či viskózními kapalinami
- Regulátor udržuje konstantní průtok vzduchu bez ohledu na hydrostatický tlak
- Unikající vzduch musí překonat hydrostatický tlak



# Hydrostatické hladinoměry s využitím Boyle-Mariottova zákona

Jestliže je hladina pod úrovní sondy, pak tlak  $p_s$  v sondě je roven barometrickému tlaku  $p_b$ .

Při vzestupu hladiny  $h$  se tlak v sondě zvýší o hodnotu hydrostatického tlaku a podle Boyle-Mariottova zákona ( $pV = \text{konst.}$ , za předpokladu konstantní teploty) se zmenší objem vzduchu uzavřeného v sondě na hodnotu  $V_2$ .

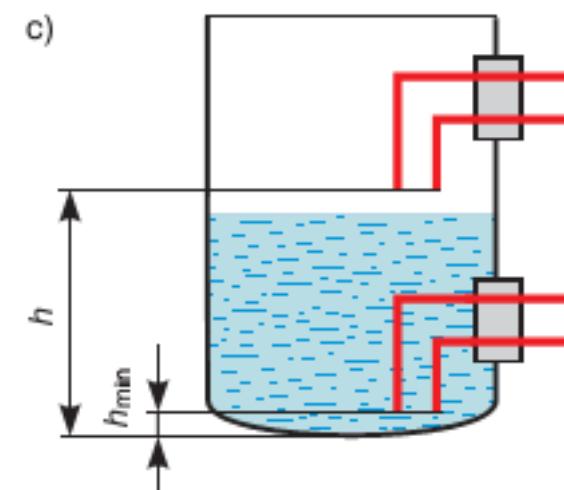
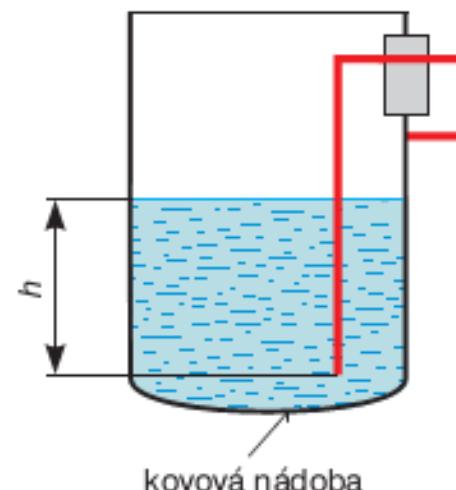
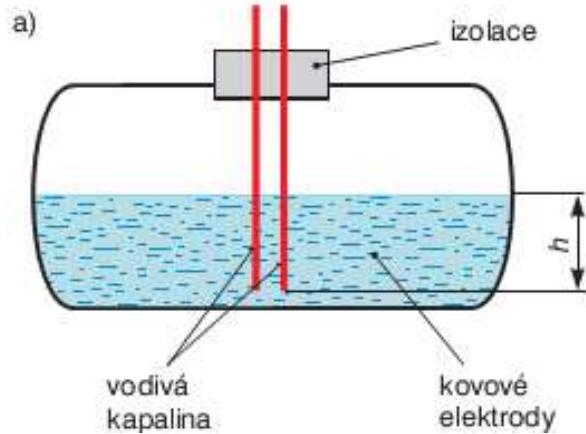


# Elektrické hladinoměry

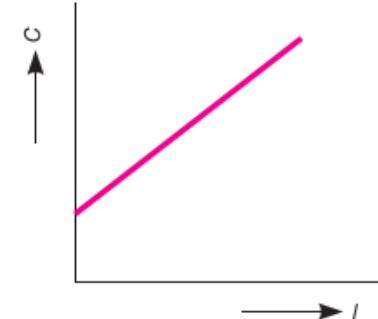
Skupina	Typ snímačů	Princip měření	Možnosti použití
elektrické	vodivostní	vyhodnocení změny elektrické vodivosti mezi elektrodami	jednoduchý a levný snímač pouze pro elektricky vodivé kapaliny; vhodný snímač pro odpadní vody
	kapacitní	měření elektrické kapacity snímače	použitelné pro měření elektricky vodivých i nevodivých kapalin a sypkých hmot; vhodné pro limitní i spojité měření, a to i při vysokých tlacích a teplotách; možnost snímání polohy mezihladiny kapalin; nevhodné pro média ulpívající na měřicí sondě
	tepelné	změna odvodu tepla z vyhřívaného rezistoru	pro 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 měřicí sondě

# Elektrické hladinoměry vodivostní

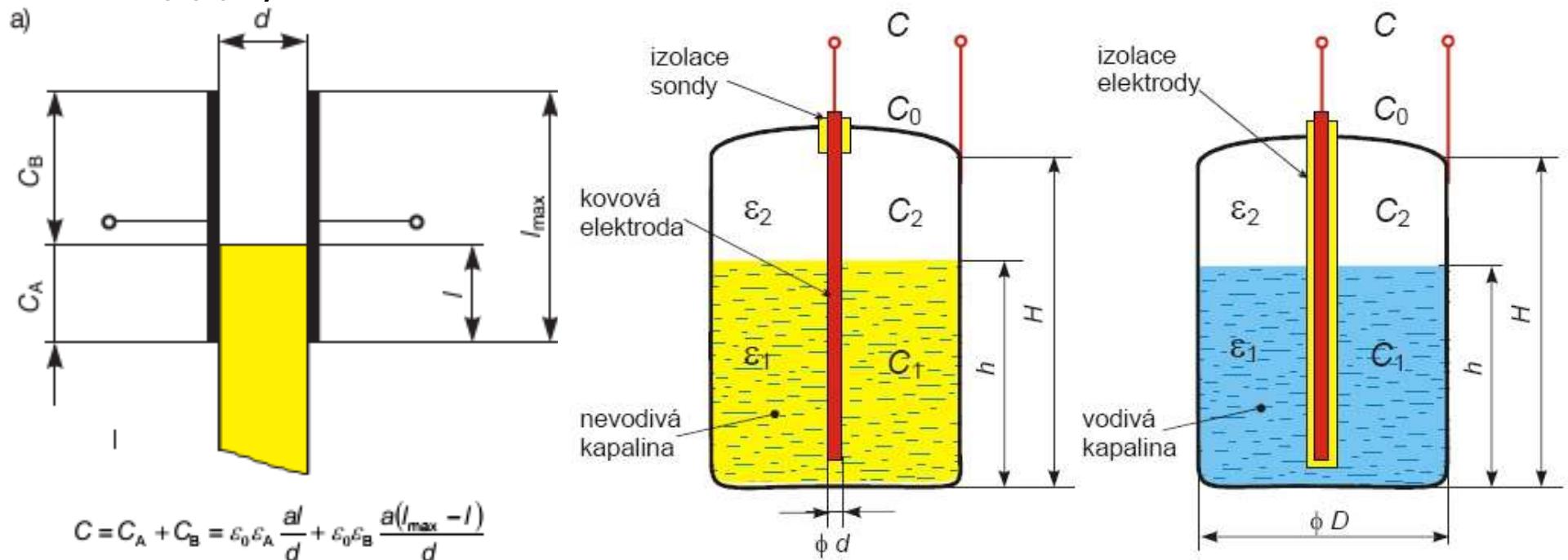
- potřebují vodivou kapalinu
- Přesnost je ovlivněna změnou složení, vodivosti i teplotou
- Jednoduchý princip



# Elektrické hladinoměry kapacitní

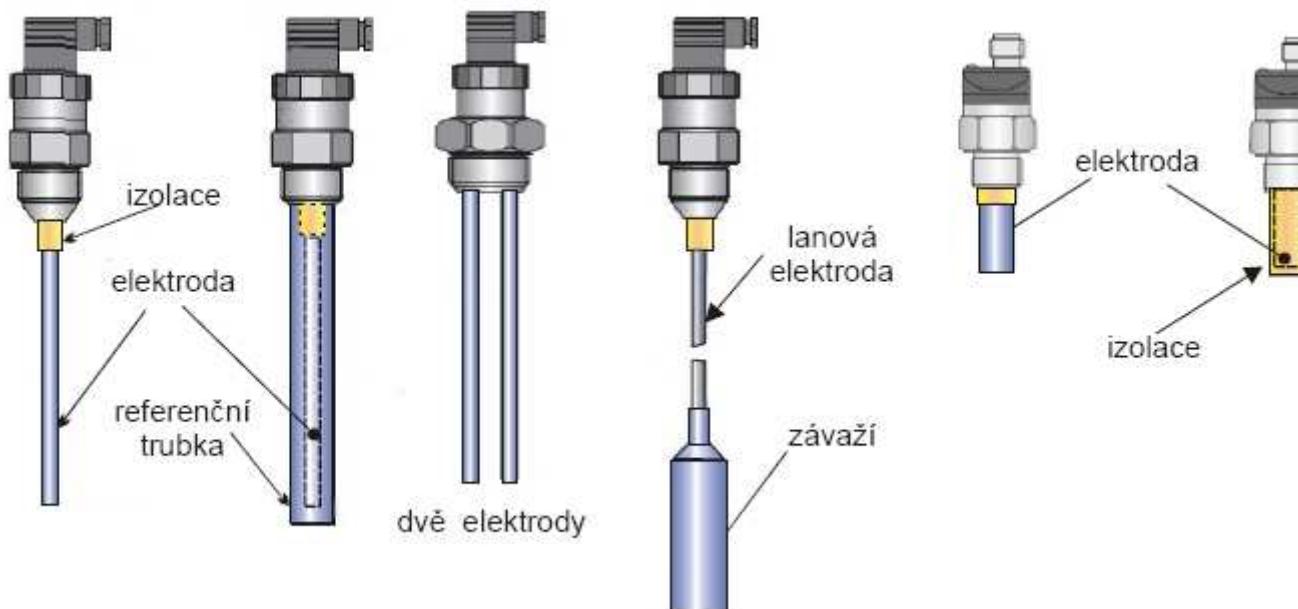


- **Kapacitní** – základní částí je kondenzátor s proměnnou kapacitou
- U **nevodivých** kapalin se změnou polohy nastává změna dielektrika, které zaplavuje elektrody
- Pokud má nádoba nevhodný tvar nebo je nevodivá, použijí se 2 trubky



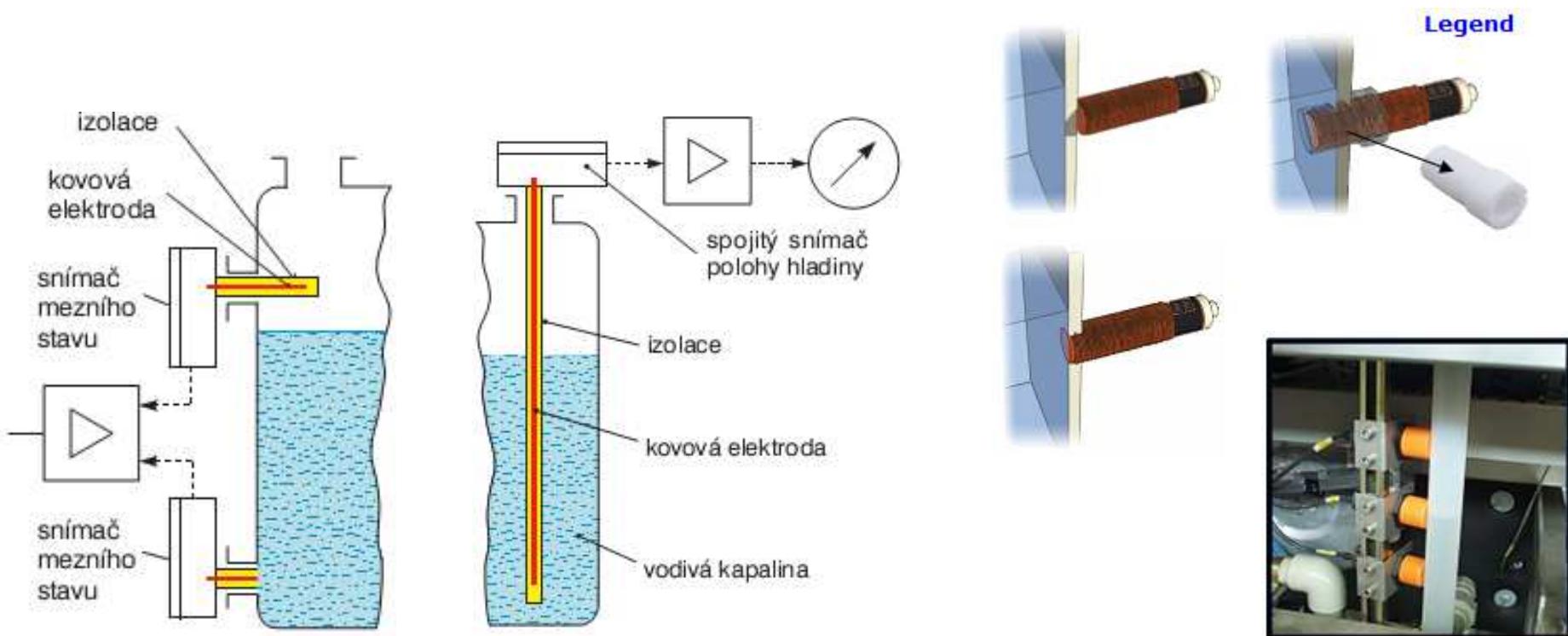
# Elektrické hladinoměry kapacitní

- Při měření vodivých médií musí být snímací elektroda izolovaná. K disposici jsou izolované tyčové elektrody, izolované elektrody s referenční trubkou a také izolované lanové elektrody.
- Délka tyčových elektrod kapacitních hladinoměrů je od 0,2 do 5 m, lanových elektrod od 1 do 20 m.



# Elektrické hladinoměry kapacitní

- základní částí je kondenzátor s proměnnou kapacitou
- U **vodivých** kapalin je kovová tyčová elektroda opatřena izolačním povlakem
- Vodivá kapalina tvoří druhou elektrodu s plochou závislou na výšce hladiny

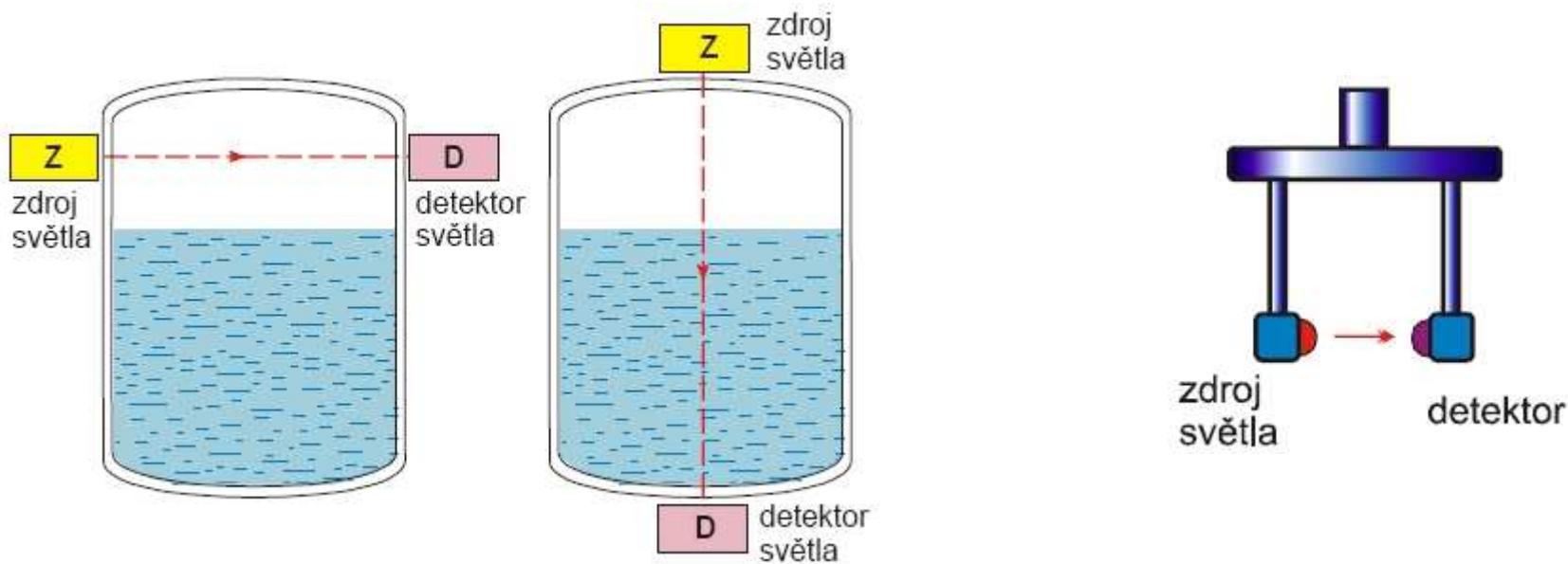


# **Elektrické hladinoměry tepelné**

- Základem snímacího prvku je sonda s vyhřívaným elektrickým rezistorem
- Prostředí, které snímač obklopuje ovlivňuje přenos tepla z topného prvku do okolí
- Jedná se o limitní snímače (dvoustavový nespojitý výstup)

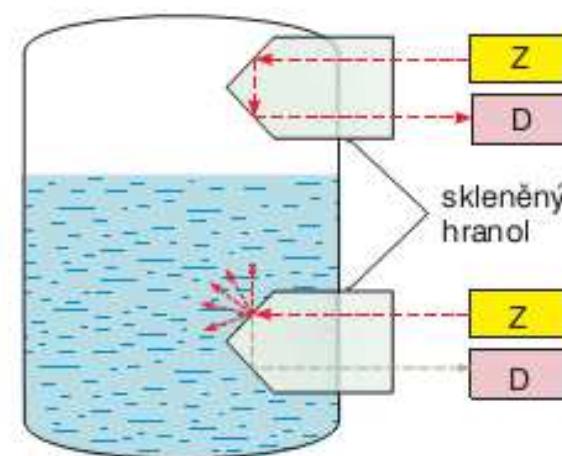
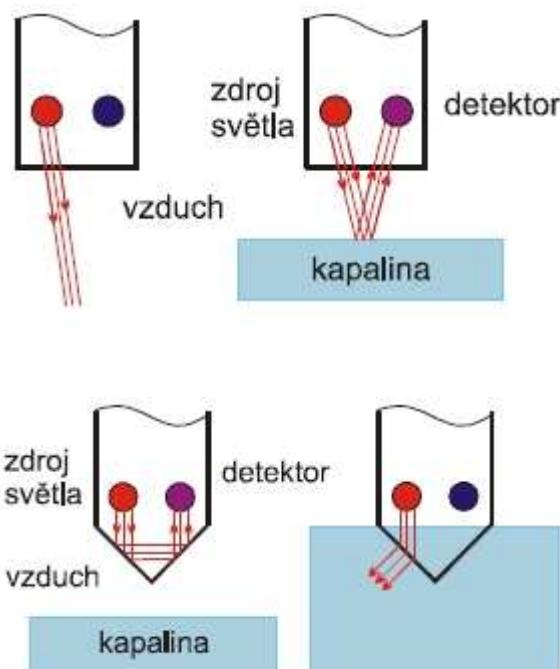
# Elektrické hladinoměry fotoelektrické

- Vhodný zdroj IR nebo viditelného záření a detektor
- Pokud hladina vystoupí nad úroveň umístění spínače, dochází k absorpci světla a detektor zaznamená změnu intenzity. U spojitého měření dochází se změnou výšky hladiny ke změnám intenzity světla dopadajícího na detektor.



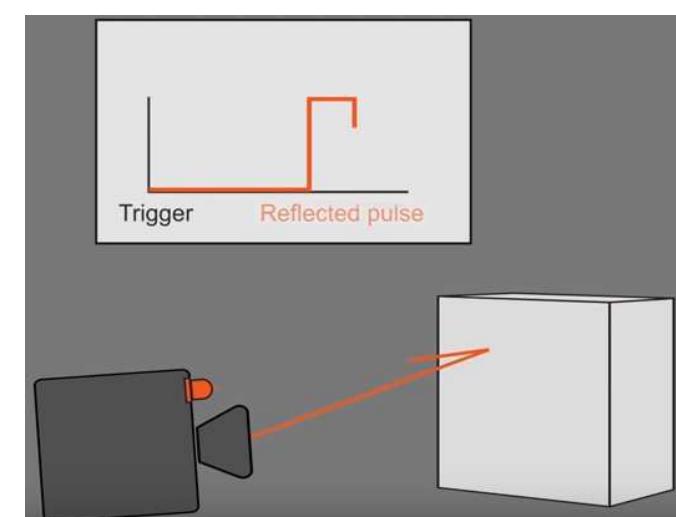
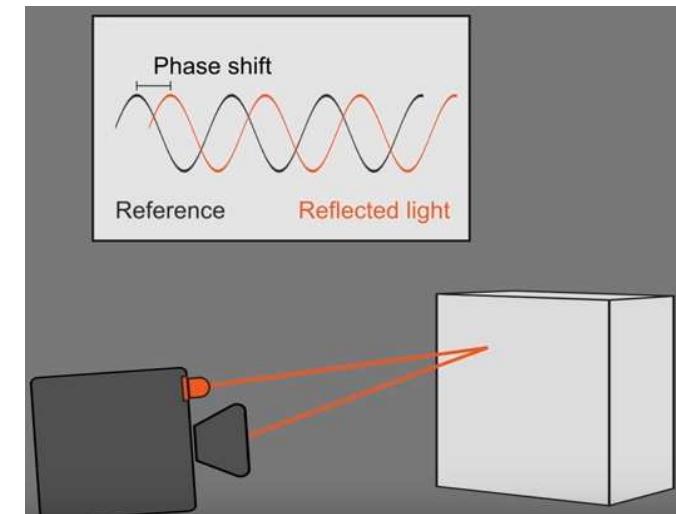
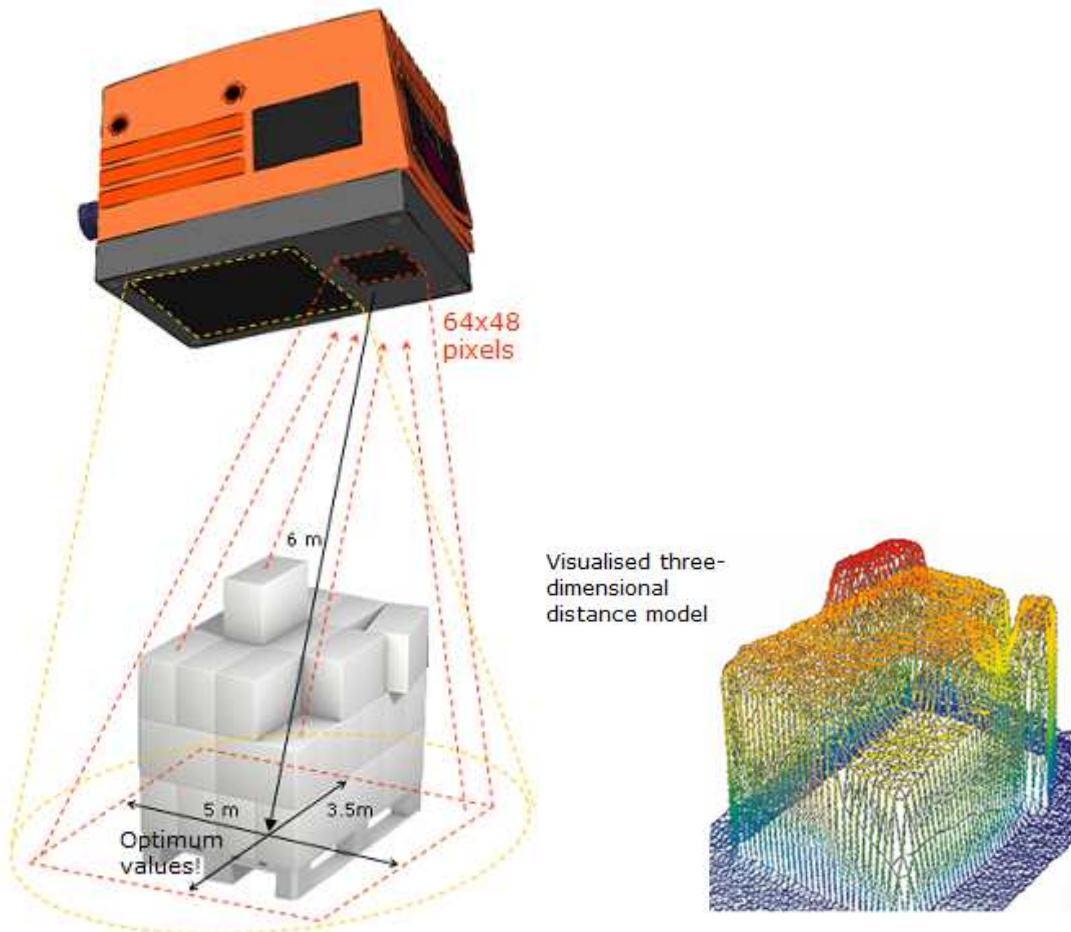
# Elektrické hladinoměry fotoelektrické

- Snímač s hranolem využívá změnu indexu lomu při změně okolního prostředí



# Elektrické hladinoměry

- **Fotoelektrické 3D, Time of Flight (ToF)**
- Výrobce IFM, 64 x 48 pixelů, analyzuje odražený laserový paprsek od plochy až 5 x 3 m, na vzdálenost 6m



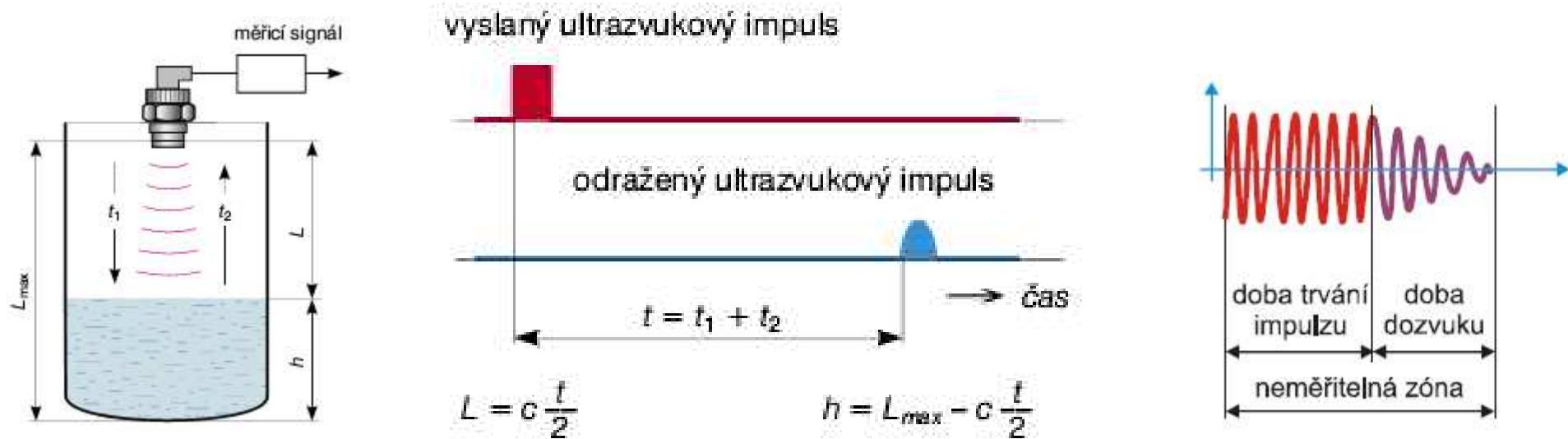
# Fyzikální hladinoměry

Skupina	Typ snímačů	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 zejména pro limitní měření
	radarové	měření doby šíření mikrovlnného signálu	bezdotykové, neinvazivní měření; vhodné k použití za extrémních podmínek pro velmi agresivních i toxické materiály za vysokých teplot a tlaků, pro viskózní a lepivá média, pasty a kaly, zkapalněné plyny, těkavé a agresivní kapaliny; nevhodné pro kapaliny s malou permitivitou
	reflektometrické (radary TDR)	měření doby odrazu impulušu mikrovlnného signálu od fázového rozhraní	vhodné 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 toxicá, agresivní a abrazivní média při jakýchkoli teplotách a tlacích; snímače se umisťují vně nádrží; nutná

# Ultrazvukové hladinoměry

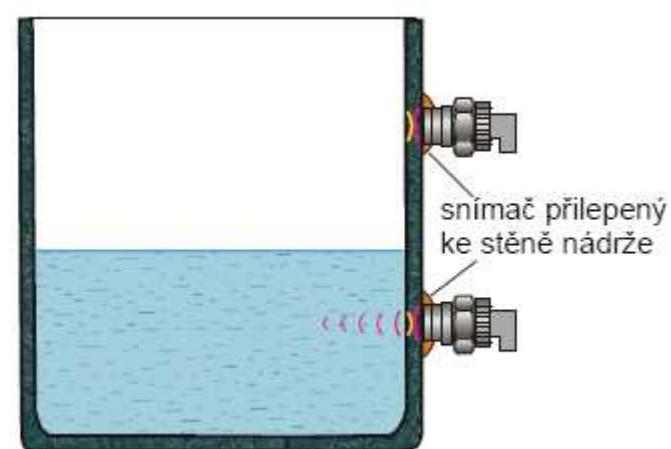
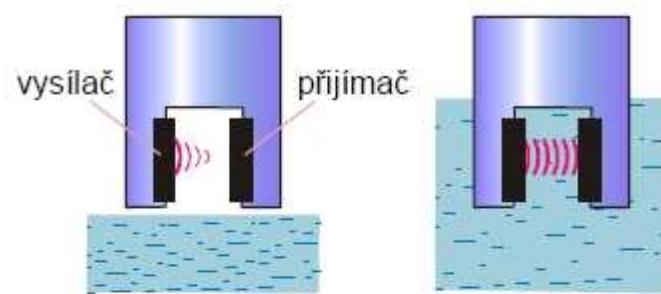
- Dva principy:
  - Doba průchodu ultrazvukové vlny od vysílače přes odraz hladiny zpět k přijímači, znaměřené doby se při známé rychlosti šíření vypočítá vzdálenost. Spojité měření.
  - Útlum ultrazvukových vln v závislosti na složení prostředí – limitní měření úrovně
- Frekvence 20-50kHz, ve vakuu se ultrazvuk nešíří – nelze použít pro tlaky menší než 60kPa.
- $\kappa$  je adiabatický koeficient, R – plynová konstanta, T – absolutní teplota, M - molekulová hmotnost plynu.

$$c = \sqrt{\kappa R \frac{T}{M}}$$



# Ultrazvukové hladinoměry

- Útlum ultrazvukových vln v závislosti na složení prostředí – limitní měření úrovně
  - ultrazvukový reflexní snímač

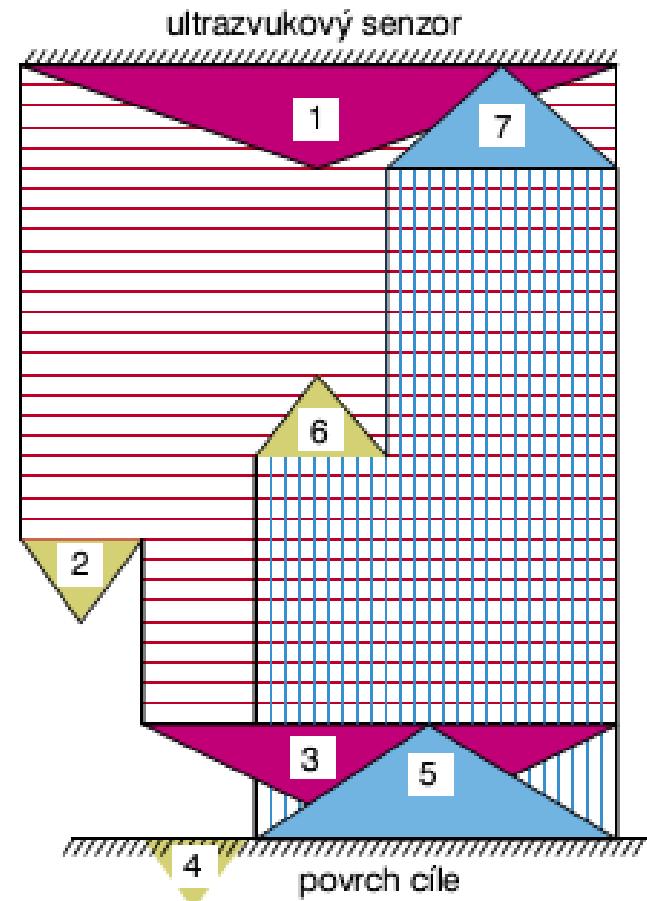


# Ultrazvukové hladinoměry provedení



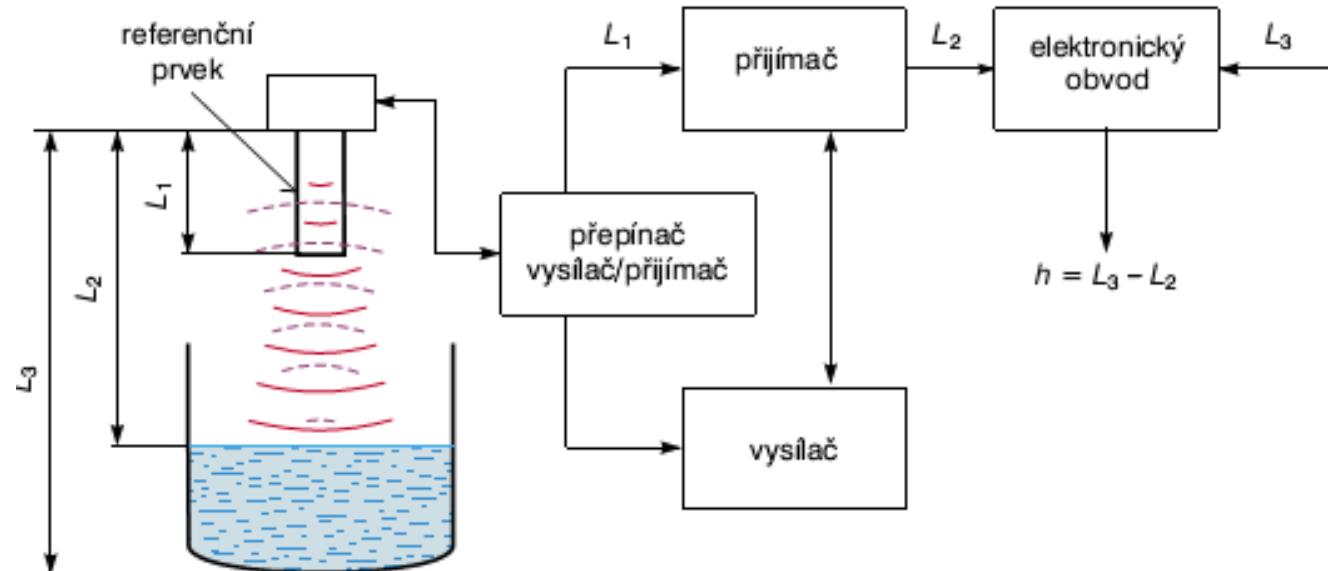
# Ultrazvukové hladinoměry

- Energetická bilance:
  - 1 vyslaná energie
  - 2 ztráta útlumem v prostředí
  - 3 energie dopadající na povrch cíle
  - 4 ztráta v měřené látce
  - 5 odražená energie
  - 6 ztráta útlumem v prostředí
  - 7 energie navracející se k senzoru
- Minimální měřitelná vzdálenost závisí na délce a dozvuku ultrazvukového impulsu
- Rychlosť šíření závisí na hustotě a tedy i teplotě prostředí – nutná korekce



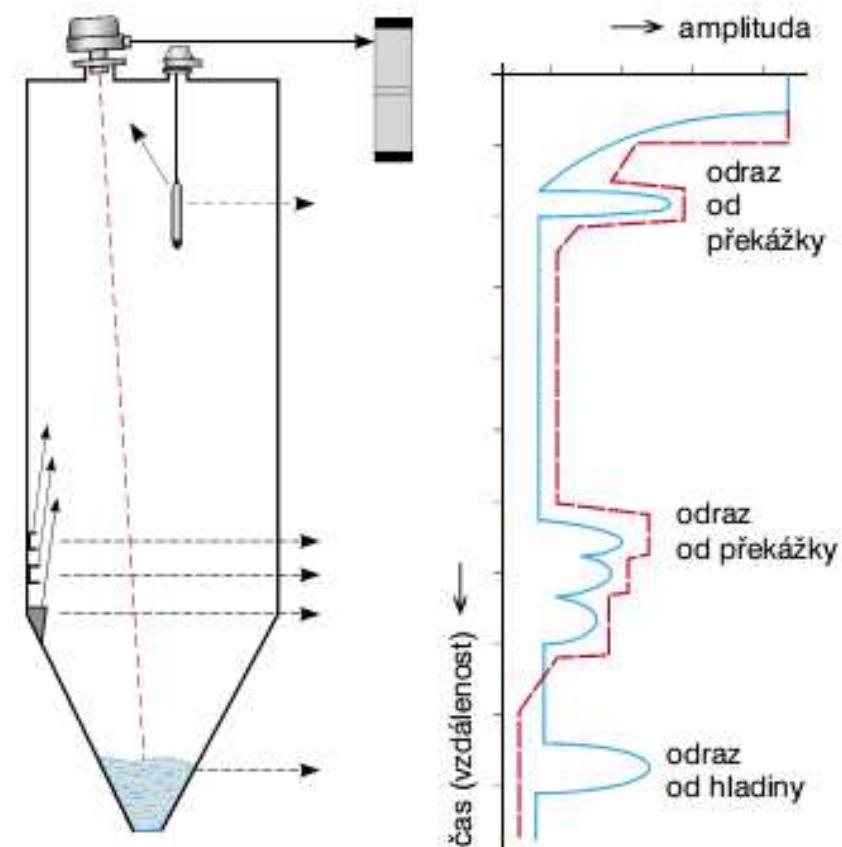
# Ultrazvukové hladinoměry

- Automatická korekce změny hustoty prostředí
- Doba potřebná k překonání referenční vzdálenosti slouží pro výpočet rychlosti šíření



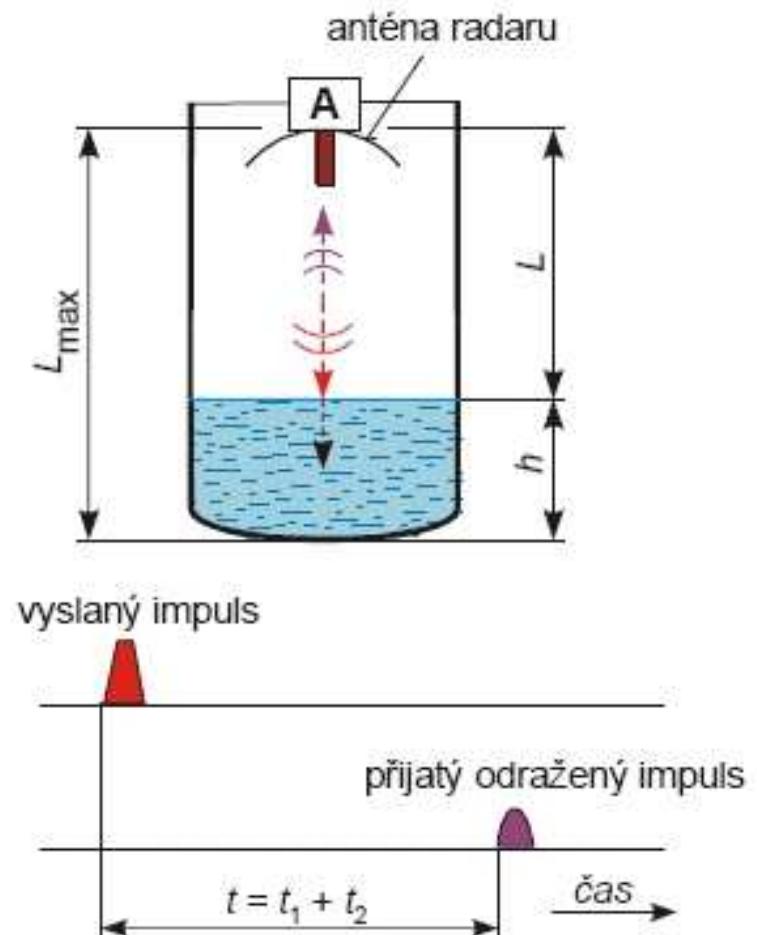
# Ultrazvukové hladinoměry

- Přesnost je ovlivněna přírubami, míchadly, přepážkami
- Při prázdné nádobě lze mapovat nádobu a korekce uložit



# Radarový hladinoměr

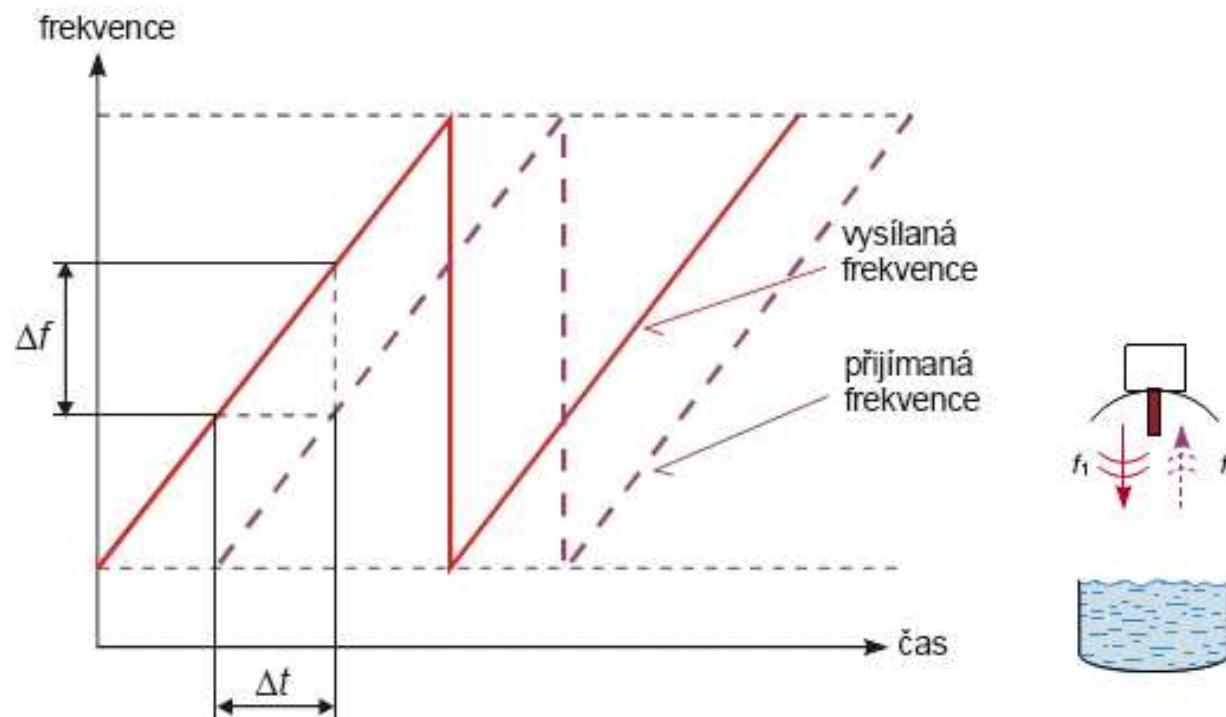
- Pracují analogicky jako ultrazvukové hlad. Time of Flight
- Používají EM vlnění, mikrovlnné záření s frekvencemi 5,8 až 26 GHz
- Metoda Časová (Pulsní) metoda: krátké impulsy s dobou trvání asi 1ns. Na rozhraní se vlna částečně odrazí, měří se doba od vysílače k hladině a zpět.
- Další impuls po 300ns mezeře.
- Má-li být vzdálenost hladiny měřena s chybou menší než 1 mm, je třeba měřit čas s rozlišením  $6 \cdot 10^{-12}$  s



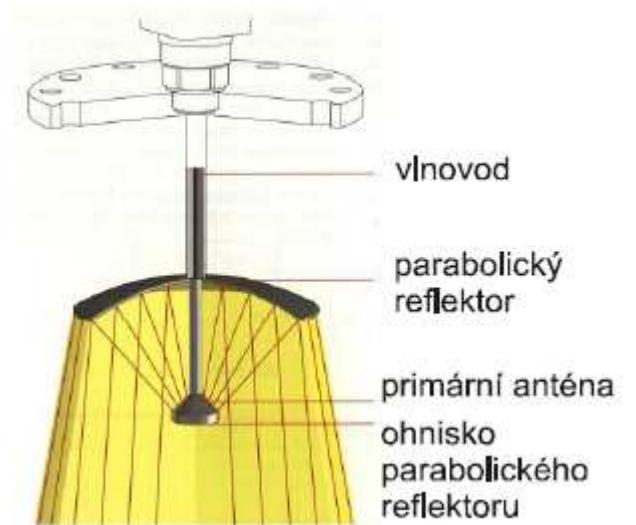
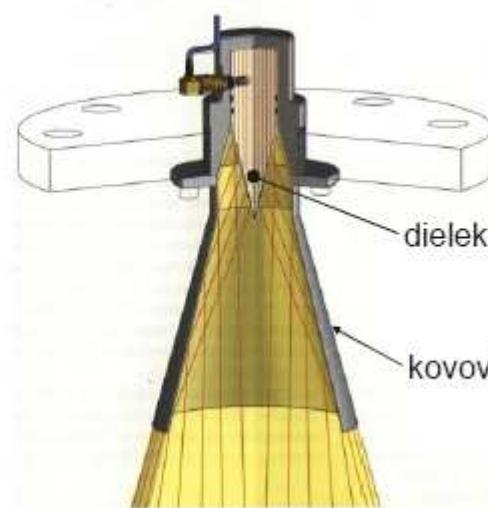
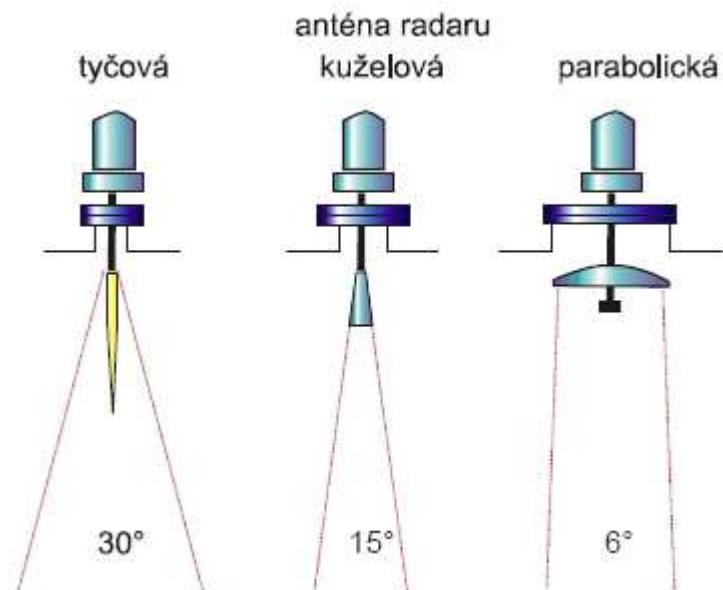
$$L = c \frac{t}{2} \quad h = L_{\max} - c \frac{t}{2}$$

# Radarový hladinoměr

- Radar s rozmítaným spojitým signálem - vysílání spojitého signálu s proměnnou frekvencí
- Ze známé rychlosti přelaďování a hodnot frekvencí vyslaného a přijatého signálu změřených v čase  $t_1$  je možné vypočítat vzdálenost odpovídající hladině
- Přijímaný signál je směšován s vysílaným a hodnota mezifrekvence (řádově kHz) je mírou vzdálenosti cíle



# Radarový hladinoměr

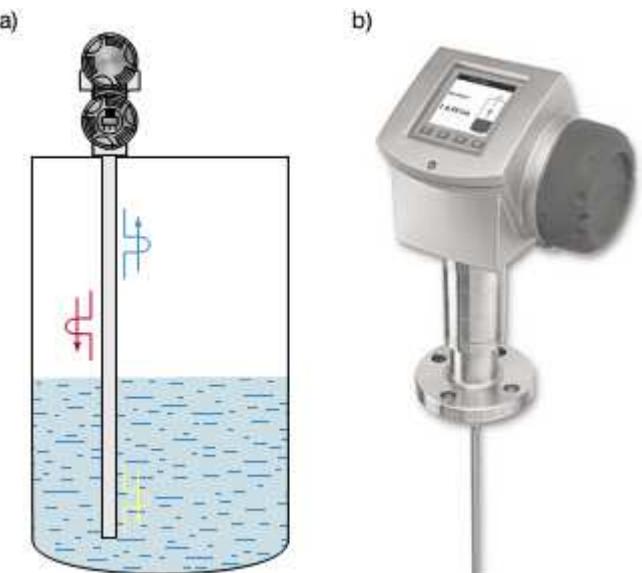


# Radarový hladinoměr kontaktní - reflektometrický

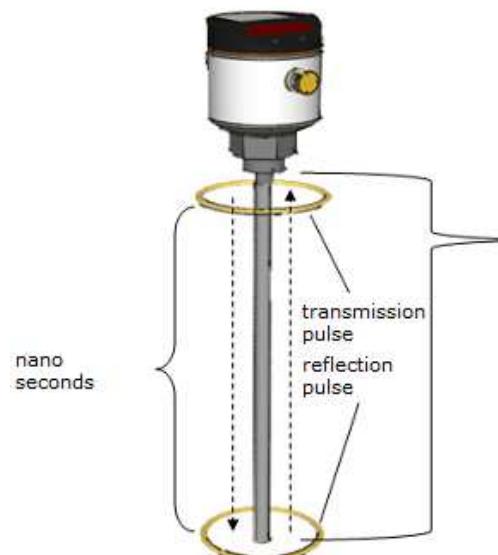
- Reflektometrický – vedený mikrovlný signál
- Mikrovlny jsou vedeny tělesem z pevného materiálu
- Využívá se šíření EM impulsu po dvou vodičích instalovaných v nádrži

Principem je odraz v rovině hladiny pokud není vedení zakončeno charakterist. imped.

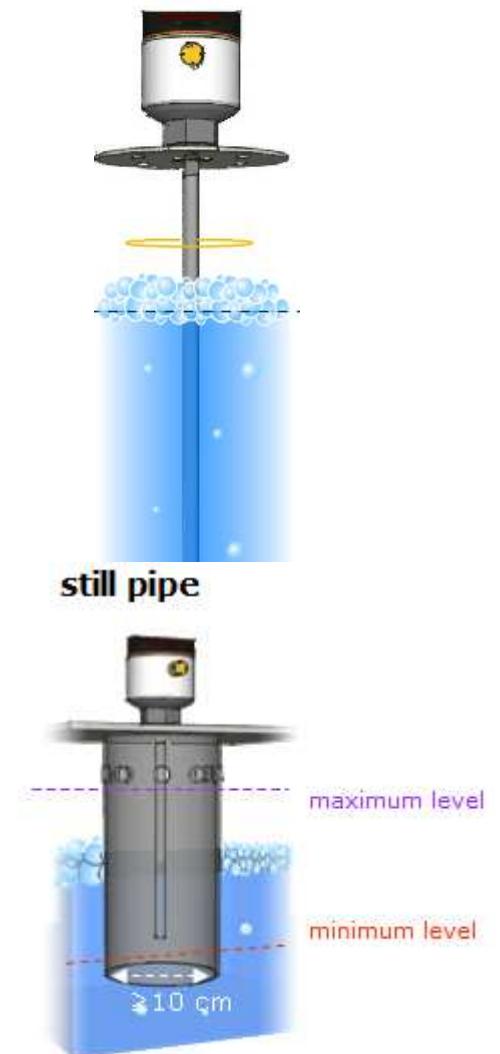
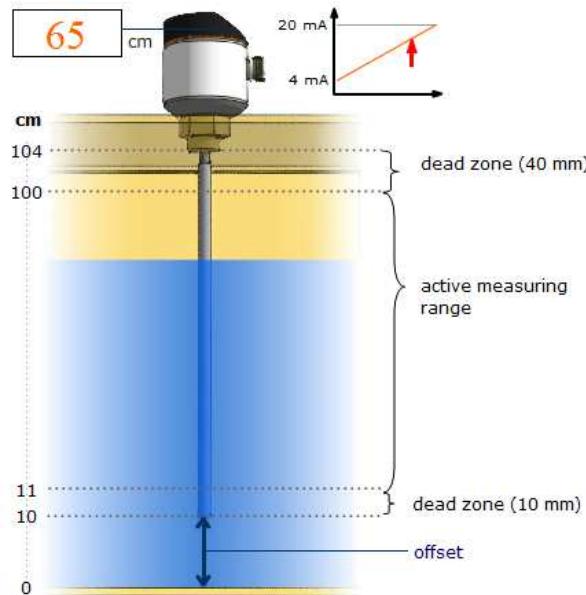
Velkou roli hraje permitivita média, čím je větší, tím je větší, tím je odraz intenz.



# Radarový hladinoměr reflektometrický

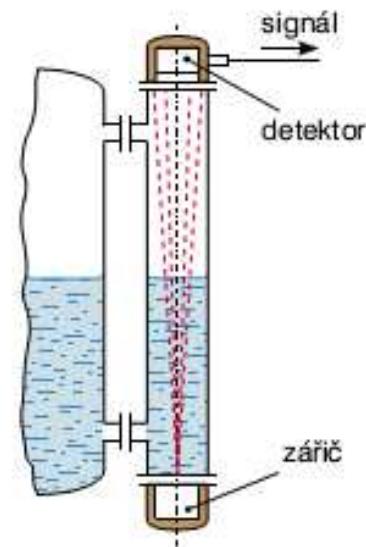
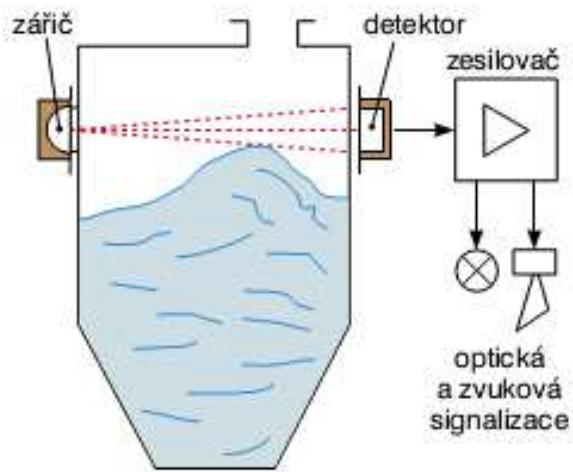


The reference for distance measurement is the lower edge of the thread.



# Radioizotopový hladinoměr

- Intenzita radioaktivního záření klesá s tloušťkou vrstvy materiálu mezi záričem a detektorem
- Zdroje záření gama, izotopy s delším poločasem rozpadu 5 – 30let





Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

17. Listopadu 15  
70833 Ostrava - Poruba  
Tel.: 597 321 231, Fax.: 597 323 138  
email: [info.cbe@vsb.cz](mailto:info.cbe@vsb.cz)  
<http://cbe.vsb.cz>

zdroje: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorii/](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/)

<http://cbe.vsb.cz>



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství, FEI, VŠB-TU Ostrava

Senzory a měření  
10-Tlak, síla, napětí

<http://cbe.vsb.cz>



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Tlak - úvod

- Tlak  $p$  definovaný jako síla  $F$  působící kolmo na plochu  $S$

$$p = \frac{F}{S}$$

- Tlak  $p$  definovaný prostřednictvím hydrostatického sloupce kapaliny o dané hustotě a výšce

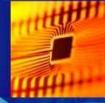
$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

- Hlavní jednotkou je Pascal Pa. Jedná se o velmi malou jednotku, používají se v praxi násobky: hPa, kPa, Mpa

- Používá se také bar. 1bar = 100kPa
- Atm. tlak, tlak v pneu auta



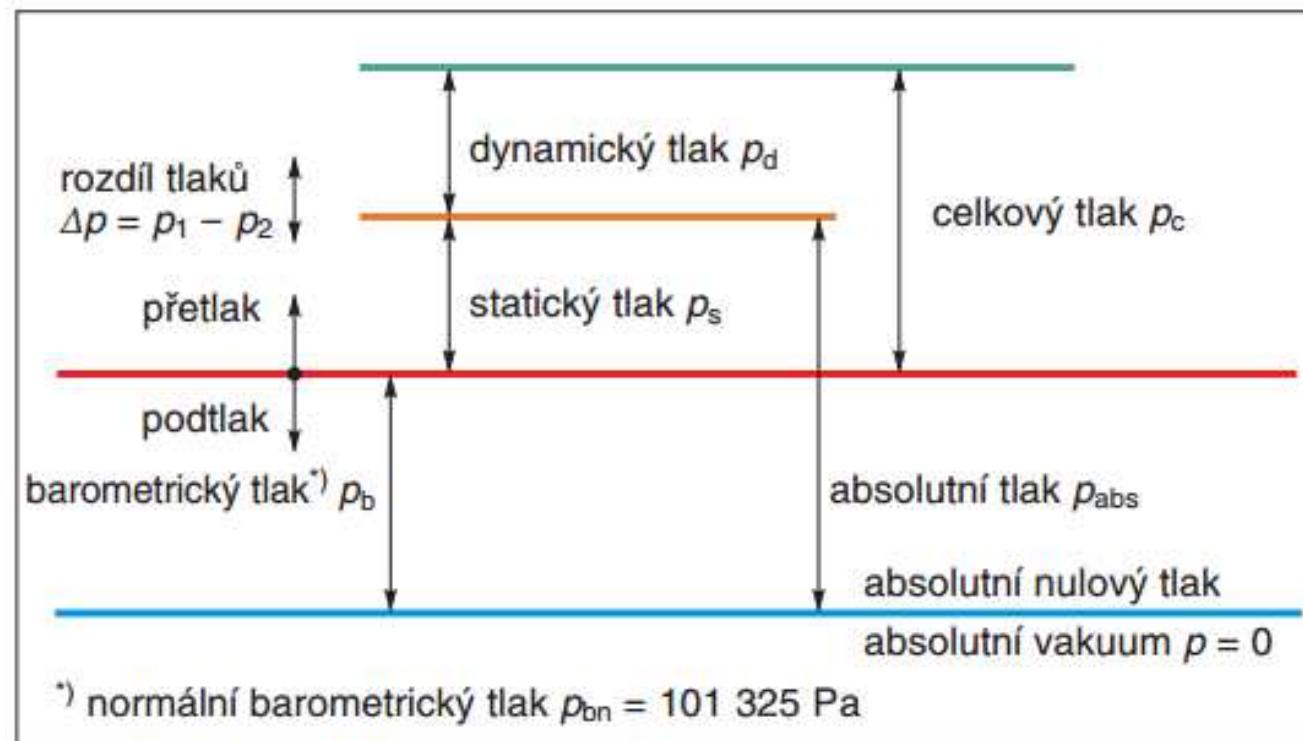
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Pojmy

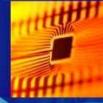
Hodnota tlaku se uvádí vztažena vůči:

- 1) absolutnímu nulovému tlaku
- 2) k barometrickému tlaku.



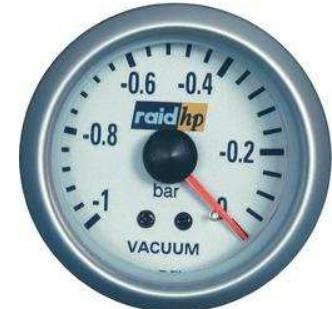


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Přístroje

- Tlakoměry (manometr)
- Podtlakoměr (vakuometr)
- Diferenční tlakoměry
- Barometr (měření barom. tlaku)
- Tlakoměry absolutního tlaku



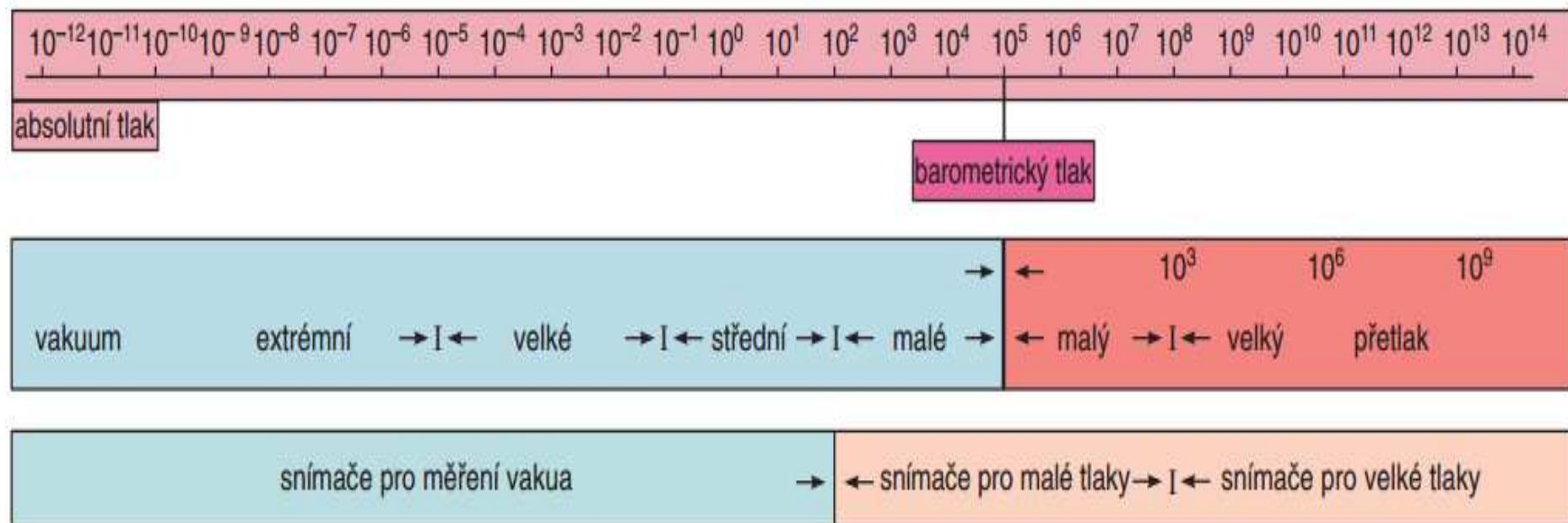
- Snímač tlaku je celý automatizační prvek (měřicí člen)
- Citlivou částí je čidlo např. Membrána nebo Bourdonova trubice
- Senzor: někdy čidlo někdy celý snímač



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Rozsahy tlaků





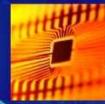
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



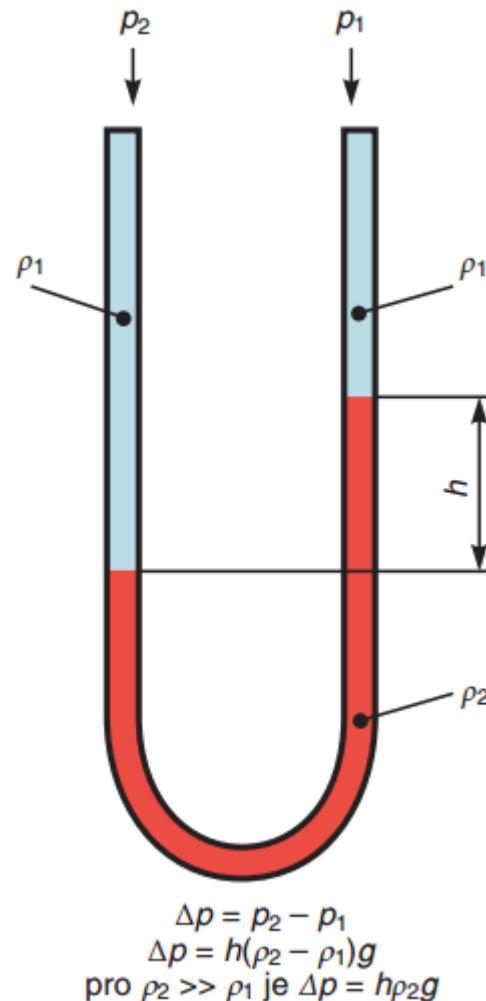
## Hydrostatické tlakoměry

Tlakoměry (snímače tlaku)	Charakteristika principu měření	Poznámka	Typ tlakoměru (snímače)	Měřicí rozsah	Přesnost (% z rozsahu)	Možnosti použití
hydrostatické tlakoměry	princip je založen na definici hydrostatického tlaku, měřítkem tlaku je výška sloupce kapaliny	ovlivňující veličinou je hustota tlakoměrné kapaliny a její teplota	U-trubicový	závisí na hustotě tlakoměrné kapaliny	až 0,05	v laboratořích, v metrologických laboratořích, přesné barometry
			nádobkový	do 200 kPa (náplň Hg)	až 0,05	
			mikromanometr se sklonným ramenem	do 5 kPa (náplň voda)	1 až 3	
			kompresní vakuometry	$10^{-3}$ až $10^3$ Pa		

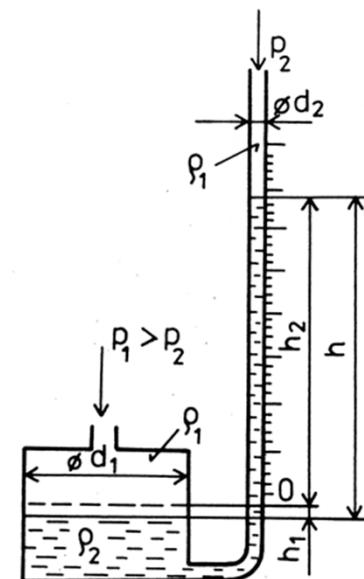
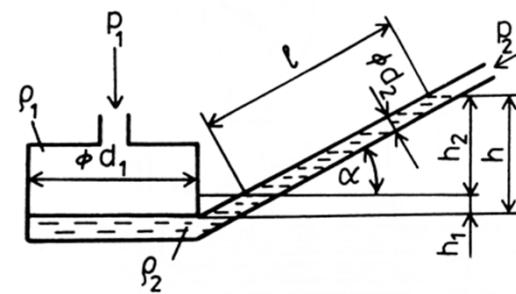
- Činnost hydrostatických tlakoměrů je založena na účinku hydrostatického tlaku, který vyvozuje sloupec kapaliny o výšce  $h$  a hustotě  $\rho$ .
- Mírou tlaku je výška sloupce kapaliny  $h$ , a měření tlaku je tak převedeno na měření délek.
- Protože hustota kapaliny je funkce teploty, je i údaj hydrostatického tlakoměru závislý na teplotě.



## Hydrostatické tlakoměry



- U-tlakoměr
- Nádobkový tlakoměr
- Mikromanometr





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



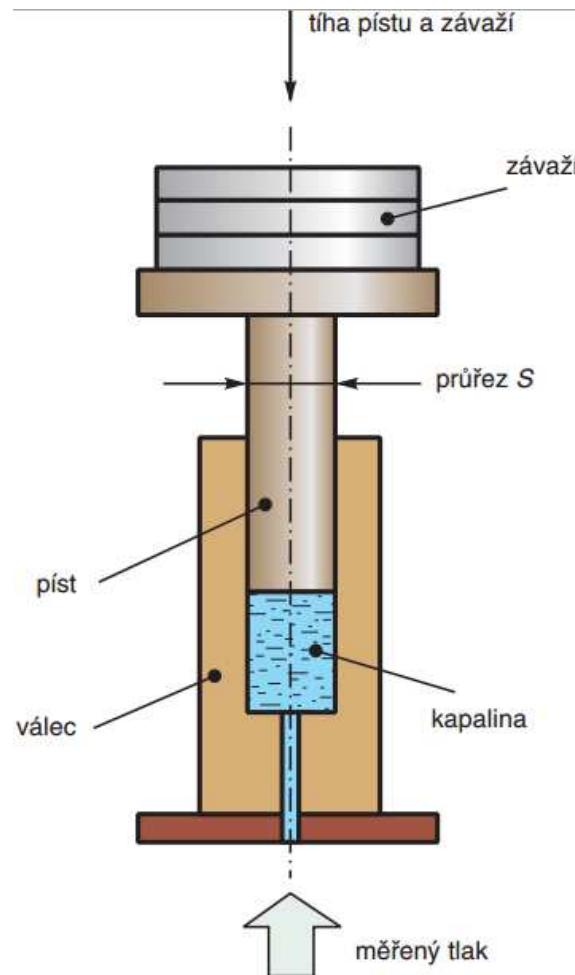
## Tlakoměry se silovým účinkem

silové tlakoměry	využívají definice tlaku jako síly působící na plochu	na hustotě kapaliny nezávisí údaj, ale měřicí rozsah	zvonový	do 1 000 Pa	1	laboratorní měření, kalibrace jiných tlakoměrů
			pístový	0 až 500 MPa	0,001 5 až 0,1 (1 až 5)	etalonové tlakoměry, (tlakoměry pro měření nahuštění pneumatik)

Měření tlaku se převádí na měření síly, jejíž účinky jsou vyvažovány pružinou nebo závažím



## Tlakoměry se silovým účinkem



- Podstatnou součástí pístového tlakoměru je píst přesného průřezu umístěný ve válci.
- Tlak se na píst přenáší kapalinou nebo plynem, kterým je celý systém tlakoměru vyplněn.
- Síla vzniklá působením měřeného tlaku na píst je kompenzována tíhou pístu a závaží. Rovnováhy sil se dosáhne v okamžiku, kdy se píst **nepohybuje** ve směru osy.
- Uvažuje-li se hmotnost pístu  $M_p$ , hmotnost závaží  $M_z$  a čelní plocha pístu  $S$ , pro měřený tlak platí

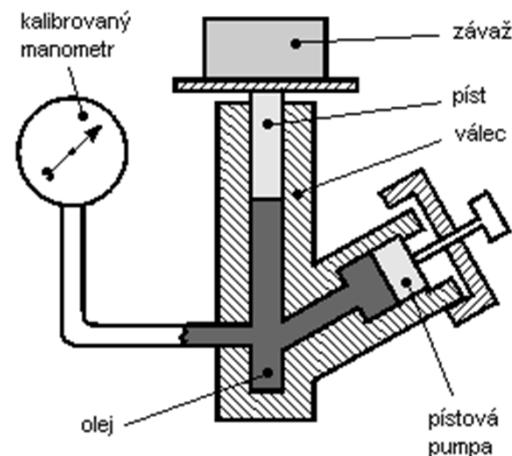
$$p = \frac{(M_p + M_z) g}{S}$$



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Tlakoměry se silovým účinkem

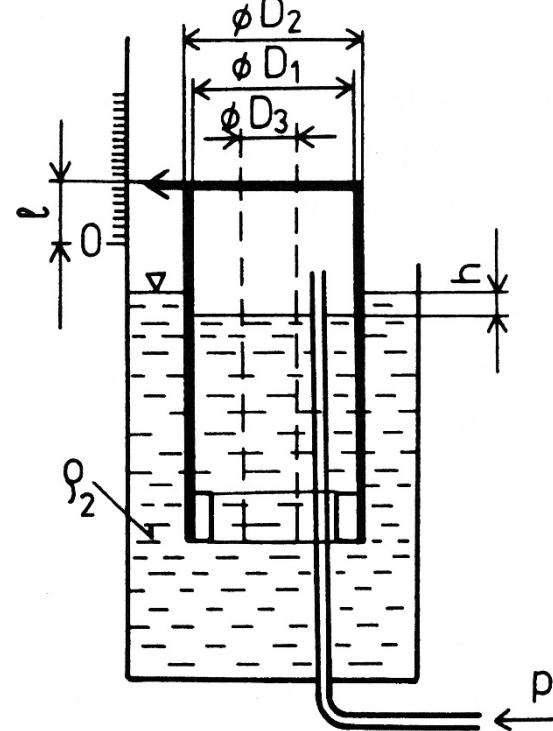




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



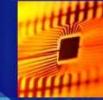
## Tlakoměry se silovým účinkem



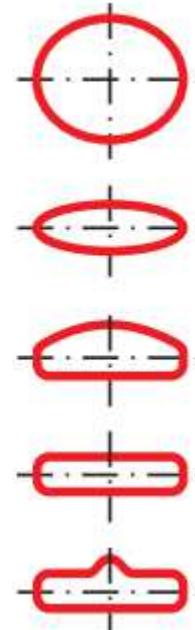
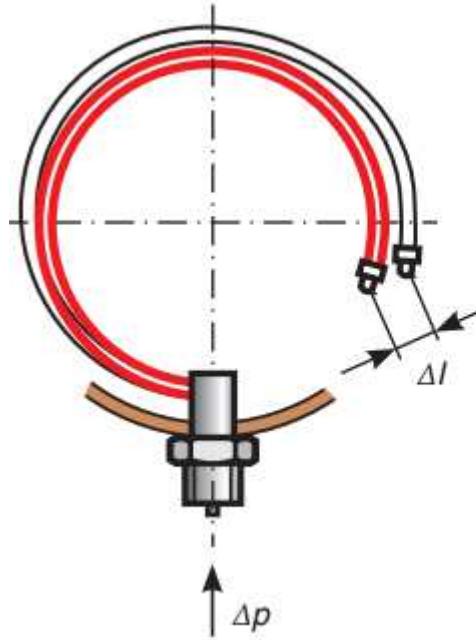
- Nízkotlaká modifikace pístového tl.
- Základní části tohoto tlakoměru je zvon, který je ponořen do kapaliny a pod který se přivádí měřený tlak.
- V klidu zvon plave na hladině
- Zavedením tlaku působí síla  $F = p * S$
- Proti působí síla způsobená vynořováním zvonu
- Velikost tlaku je hodnocena zdvihem zvonu.



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

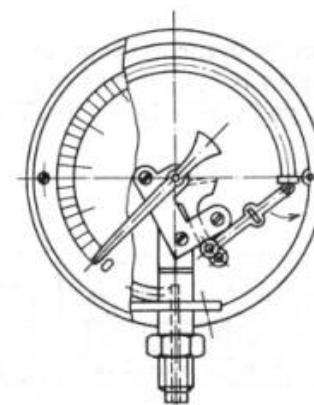


## Deformační tlakoměry



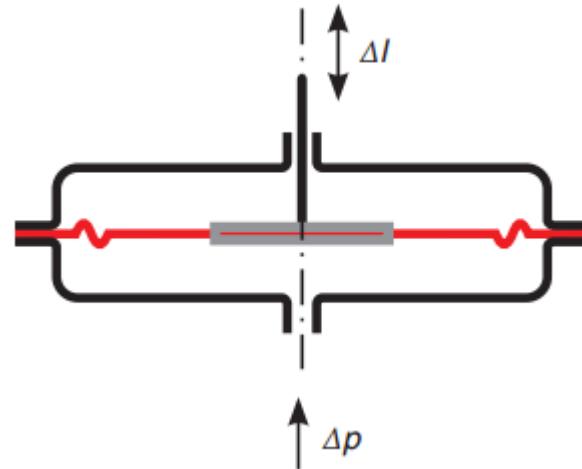
Princip funkce deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci, a tím i na změně geometrického tvaru vhodného tlakoměrného prvku vlivem působení měřeného tlaku.

Nejčastěji používanými deformačními prvky jsou **Bourdonova trubice**, membrána, krabice a vlnovec.





## Deformační tlakoměry



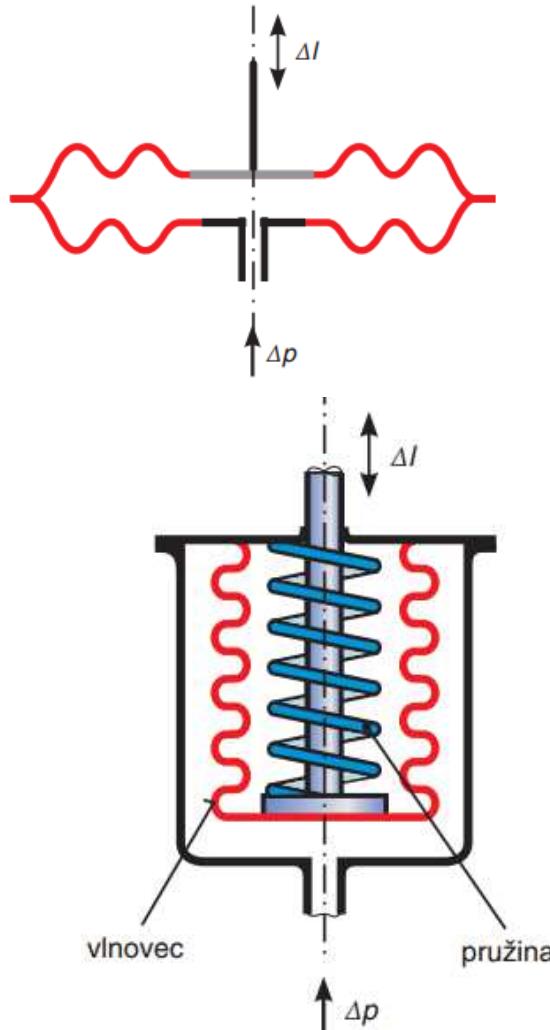
- Princip funkce deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci, a tím i na změně geometrického tvaru vhodného tlakoměrného prvku vlivem působení měřeného tlaku.
- Nejčastěji používanými deformačními prvky jsou Bourdonova trubice, **membrána**, krabice a vlnovec.



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



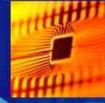
## Deformační tlakoměry



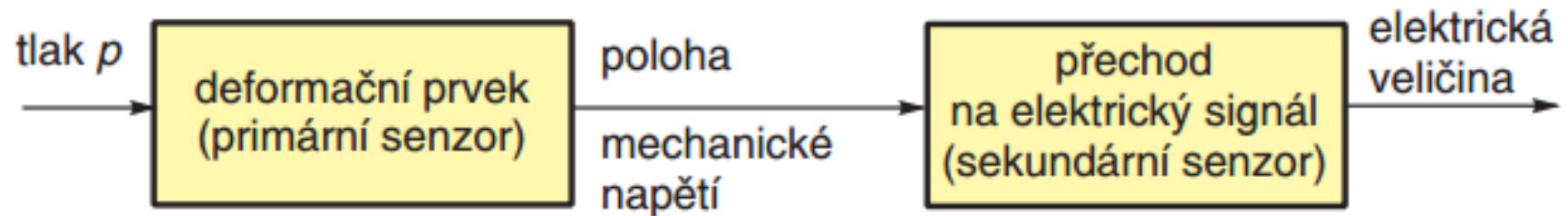
- **Krabicové** tlakoměry se používají pro měření malých přetlaků, podtlaků či rozdílu tlaků.
- Měřicím prvkem je krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami o průměru 50 až 100 mm. Deformace se přenáší pákovým převodem na ukazovatel. Horní mez měřicího rozsahu bývá 10 až 1 000 Pa.
- **Vlnovcové** tlakoměry se používají pro měření malých tlaků a rozdílů tlaků do asi 0,4 MPa.
  - Oproti předchozím typům deformačních tlakoměrů má vlnovec lepší linearitu.
  - V případě měření rozdílu tlaků se větší tlak přivádí do pouzdra snímače, menší do vlnovce.



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



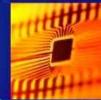
## Převod signálu deformačního prvku na elektrický signál



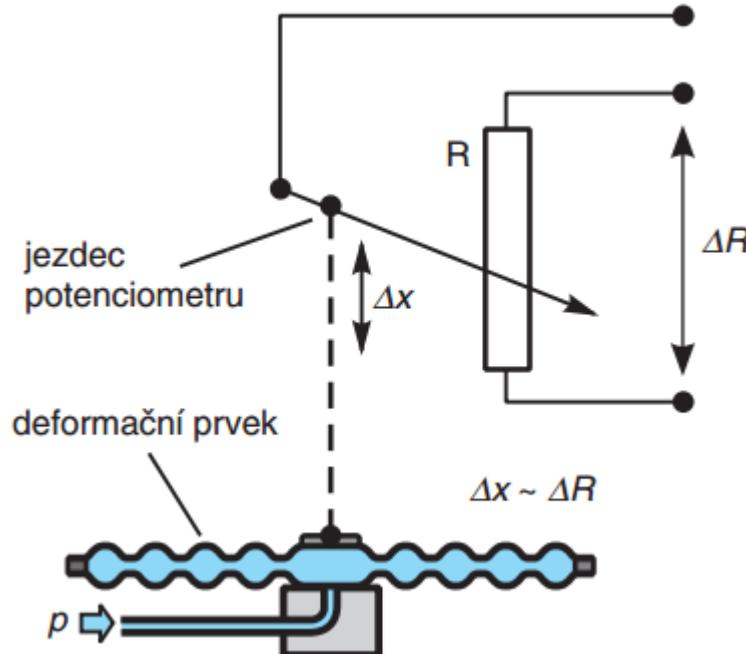
- Výsledkem působení síly při deformaci měřicího prvku je změna polohy nebo změna mechanického napětí, a proto se k vyhodnocení deformace a k převodu na elektrický signál s výhodou využívají senzory:
  - polohy (potenciometrické, indukčnostní, kapacitní, optické),
  - mechanického napětí (tenzometrické, rezonanční, piezoelektrické).



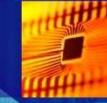
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



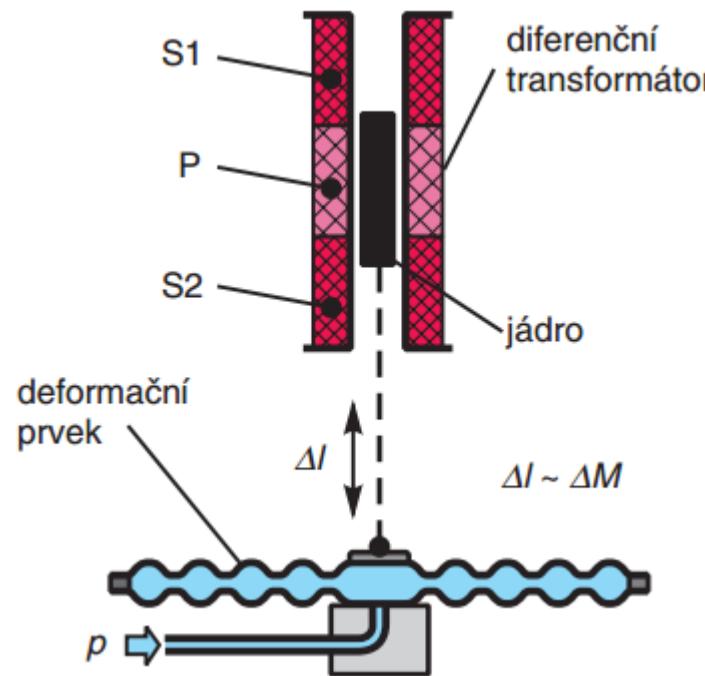
## Potenciometrický senzor polohy



- Jezdec potenciometru je mechanicky spojen s deformačním prvkem, jehož deformace  $\Delta x$  vyvolává změnu polohy jezdce vyhodnocovanou jako změna odporu  $\Delta R$ .
- Výhodou tohoto způsobu převodu na elektrický signál je nízká cena nevýhodami jsou citlivost na vibrace velká hystereze a nebezpečí rychlého mechanického opotřebení jednotlivých dílů (zhoršení přesnosti).



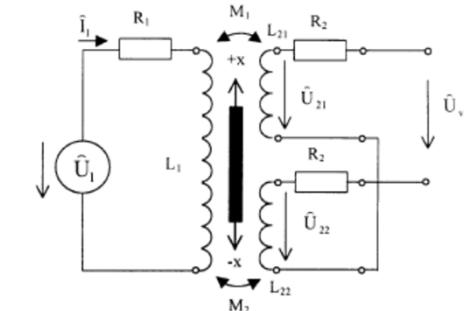
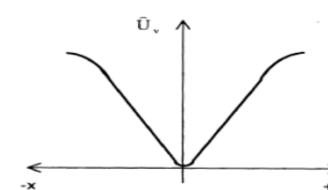
## Indukčnostní senzor polohy



Lineární diferenční transformátor LVDT

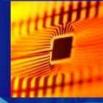
Změna tlaku vyvolá prostřednictvím vhodného pružného členu změnu polohy  $\Delta l$  feromagnetického jádra

- To způsobí změnu vzájemné indukčnosti  $\Delta M$  mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru.
- Při napájení primární cívky P střídavým napětím je změna napětí na sekundárních vinutích S1 a S2 přímo úměrná  $\Delta l$ .

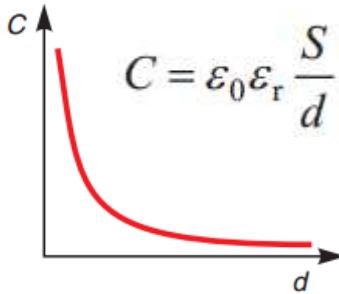
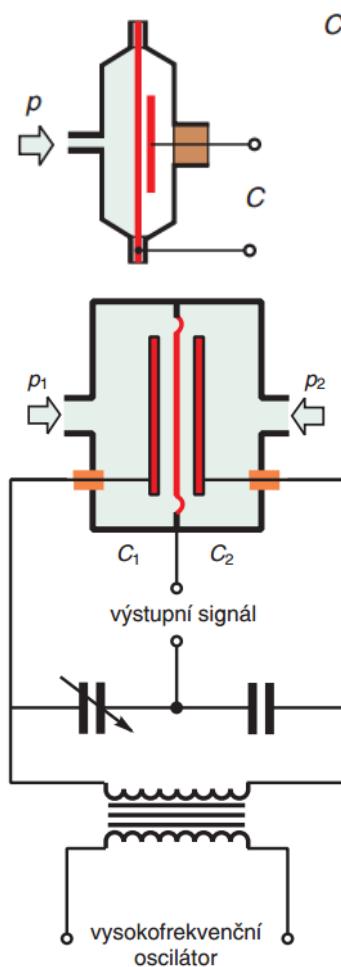




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

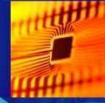


## Kapacitní senzor polohy

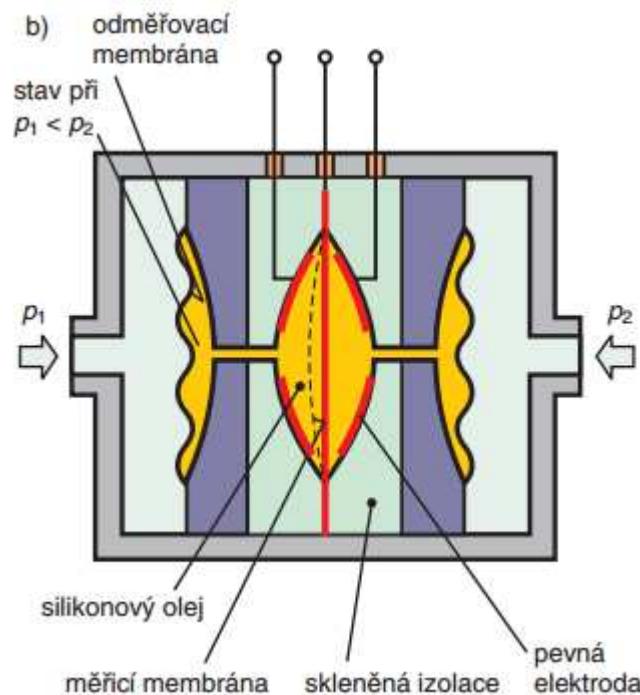


Elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, jejíž poloha se mění vlivem tlaku. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru se projeví změnou jeho kapacity.

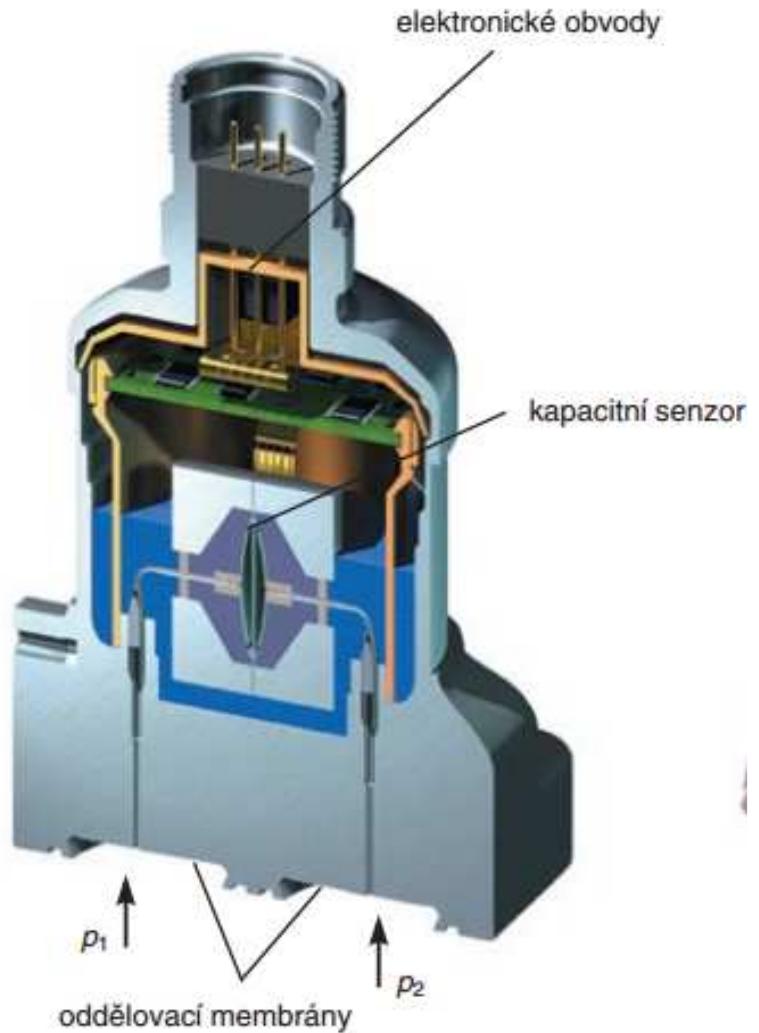
Průhyb membrány dif. čidla vyvolá opačné změny kapacit  $C_1$  a  $C_2$ , tj. např.  
 $C_1 = C_0 + \Delta C$  a  $C_2 = C_0 - \Delta C$ .  
Výstupní napětí můstkového obvodu je úměrné rozdílu kapacit  $C_1 - C_2 = 2\Delta C$ , takže citlivost je dvojnásobná

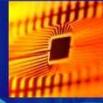


## Kapacitní senzor tlaku (polohy)



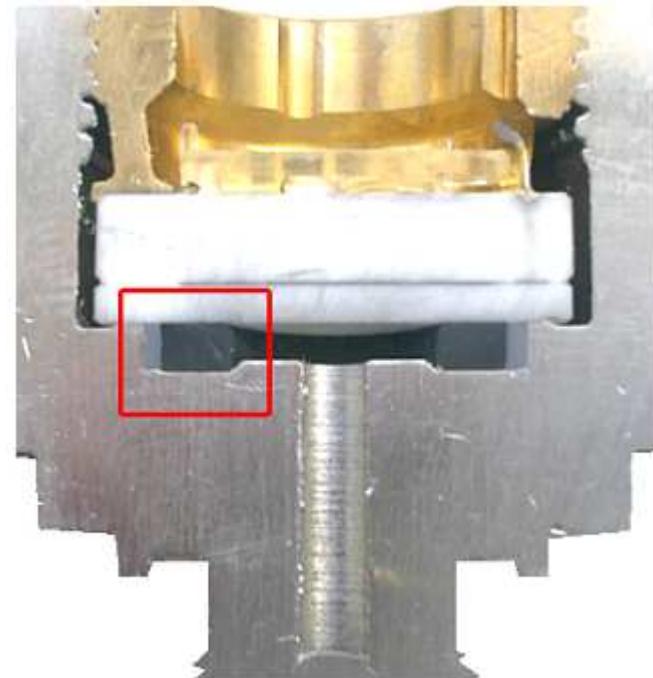
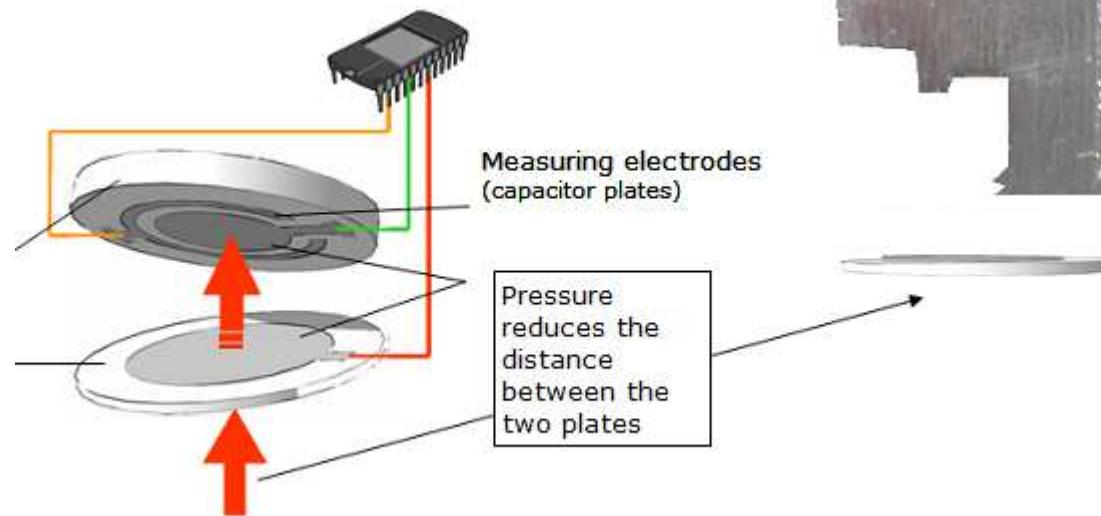
- Vnitřní prostor čidla je vyplněn silikonovým olejem nebo jinou vhodnou inertní kapalinou
- měřené médium nepůsobí na měřicí membránu přímo, ale prostřednictvím oddělovacích membrán.





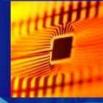
## Kapacitní senzor tlaku (polohy)

- Vnitřní prostor čidla je vyplněn silikonovým olejem nebo jinou vhodnou inertní kapalinou
- měřené médium nepůsobí na měřící membránu přímo, ale prostřednictvím oddělovacích membrán.

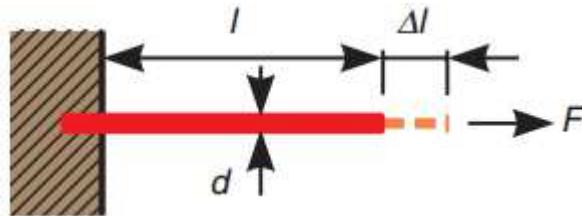




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Snímače s tenzometry



- Deformace odporového drátu o délce  $l$ , průřezu  $S$  (průměru  $d$ ) a měrném odporu  $\rho$ , je podroben účinku síly  $F$  tak, že se prodlouží o délku  $\Delta l$ .
- Původní odpor vodiče  $R = \rho l / S$  se v důsledku působící síly změní o  $\Delta R$ , a to proto, že se změní jeho délka o  $\Delta l$ , průřez o  $\Delta S$  a vlivem strukturálních změn i měrný odpor o  $\Delta \rho$ .

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \varepsilon$$

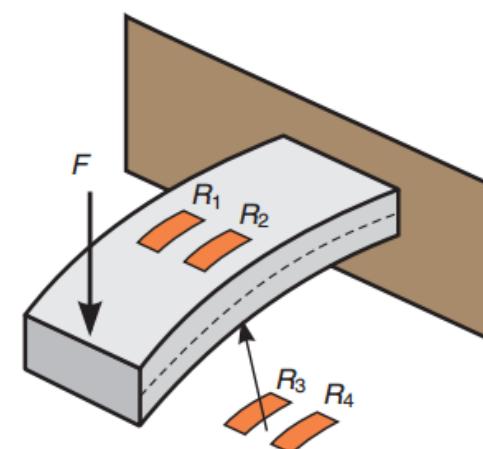
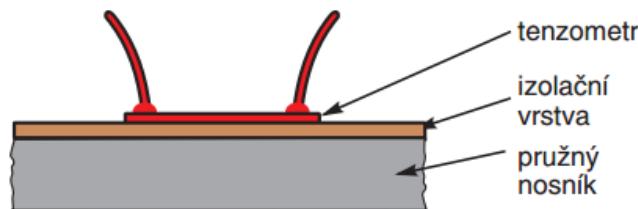
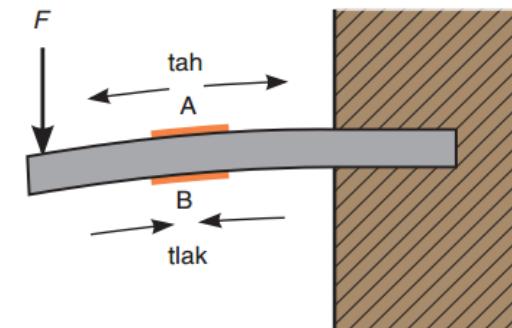
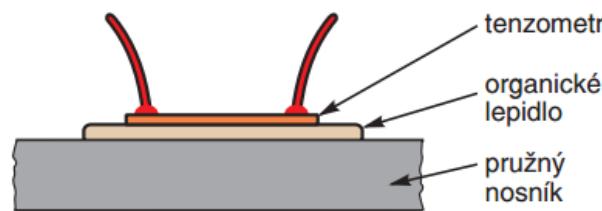
- $k$  – koef. deformační citlivosti



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

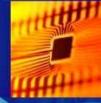


## Snímače s tenzometry

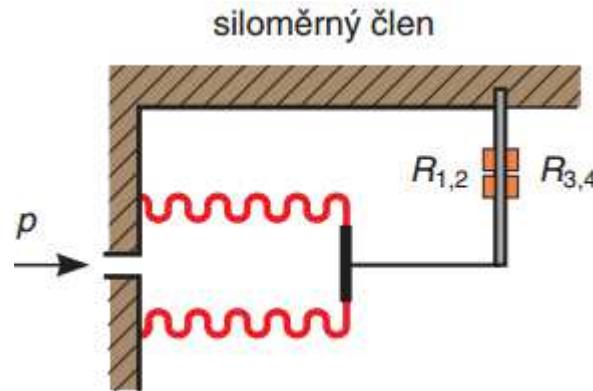




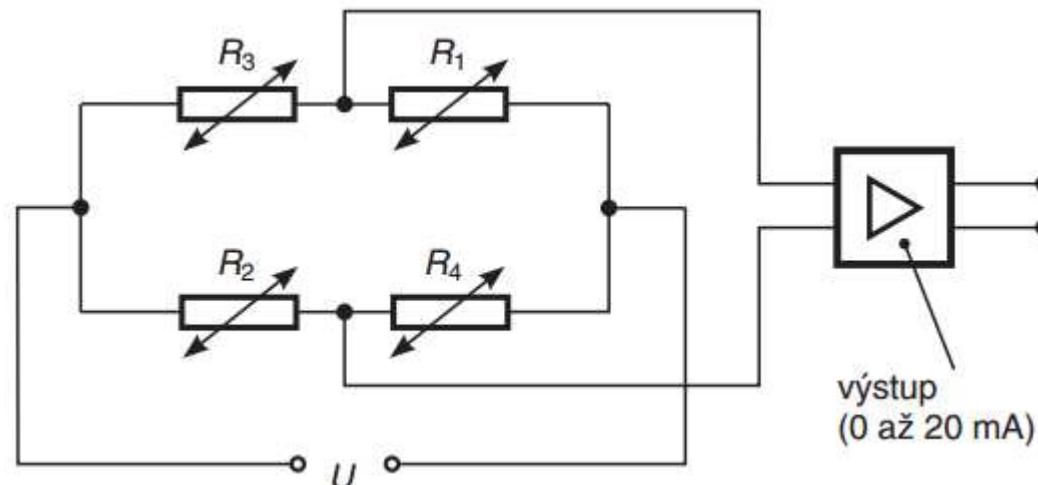
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Snímače s tenzometry



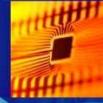
Starší typy tenzometrických snímačů tlaku využívaly propojení siloměrného členu s deformačním prvkem (vlnovcem nebo membránou),



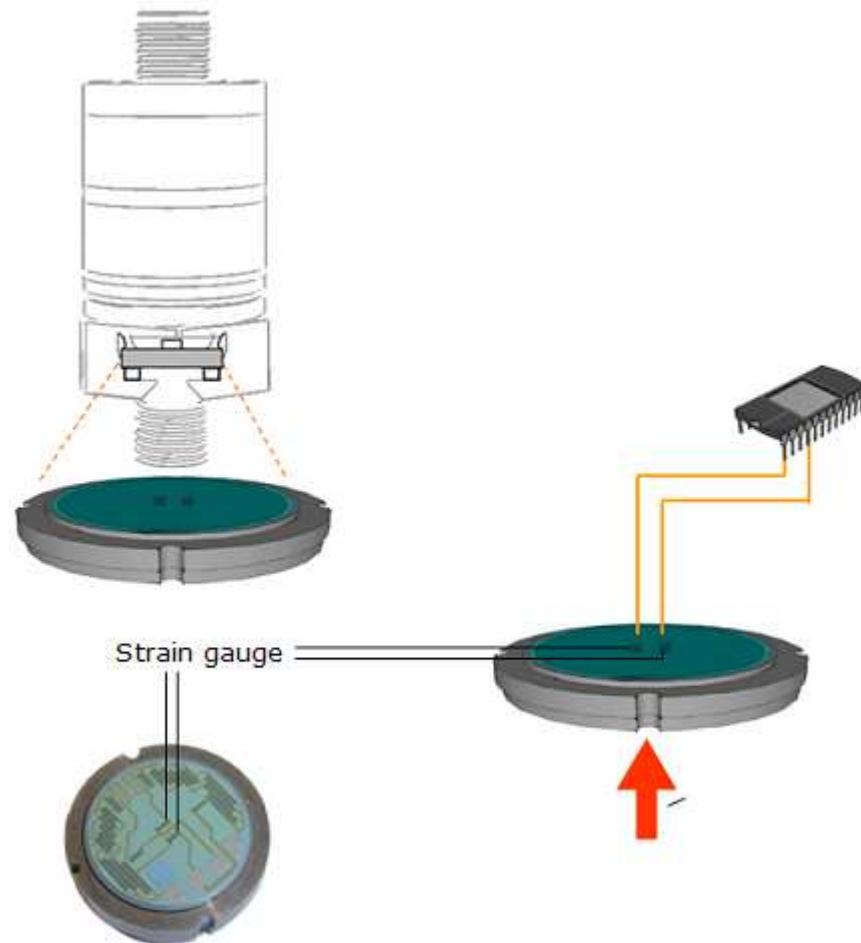
tenzometry R1 a R2 namáhány na tah, tenzometry R3 a R4 na tlak.

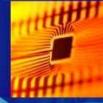


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

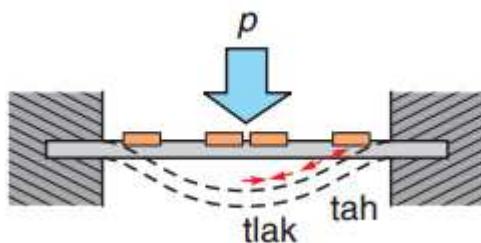


## Tenzometrické snímače tlaku

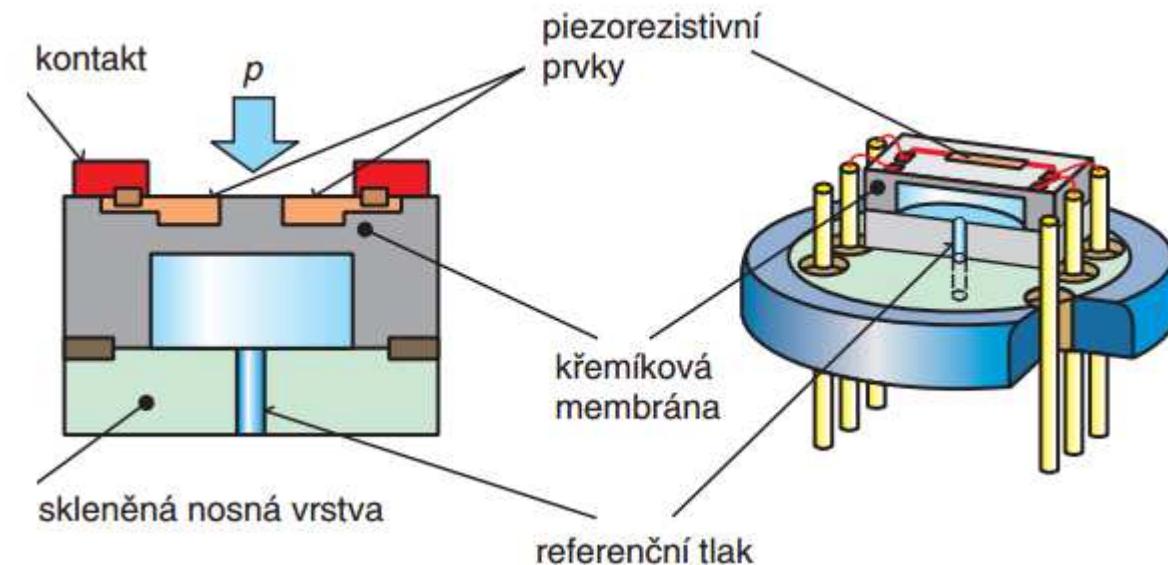




## Snímače s polovodič. tenzometry (piezorezistory)



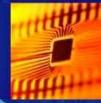
polovodičové tenzometry, které se lepí na mechanický měřicí člen – křemíkovou membránu tl. 2-5  $\mu\text{m}$  či 20-50  $\mu\text{m}$



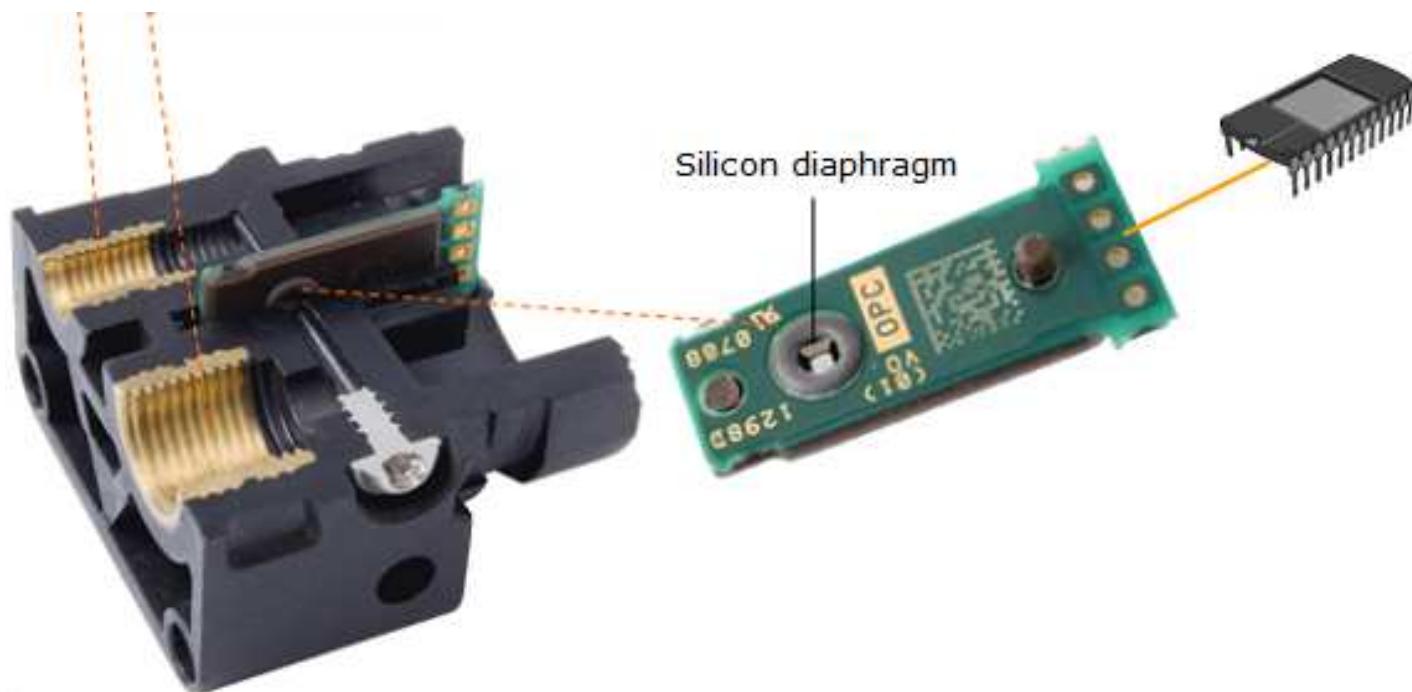
Lineární vztah mezi tlakem na membránu a mechanickým napětím je platný pouze pro deformace, které jsou malé v porovnání s tloušťkou membrány



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Křemíkové snímače tlaku

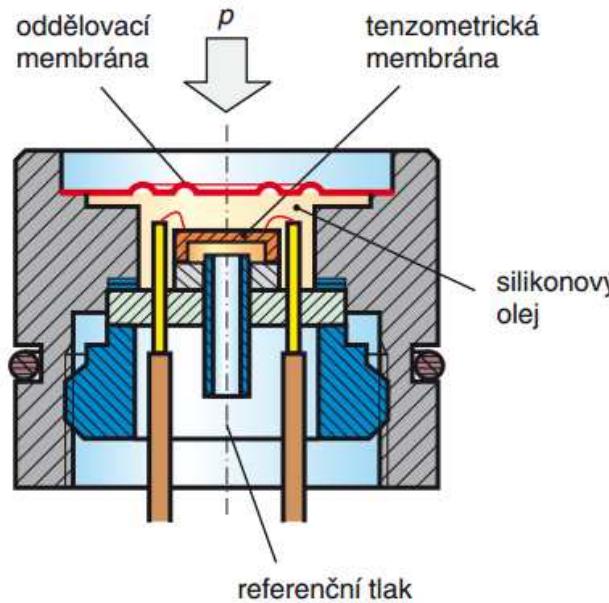




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

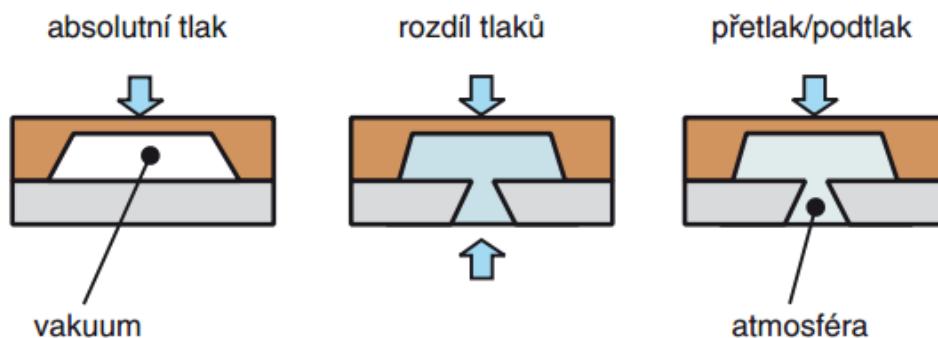


## Křemíkové snímače tlaku



V průmyslových podmínkách je třeba křemíkové čidlo chránit před stykem s měřeným médiem.

K tomu se v tlakoměrných systémech používá kovová oddělovací membrána a olejová náplň.

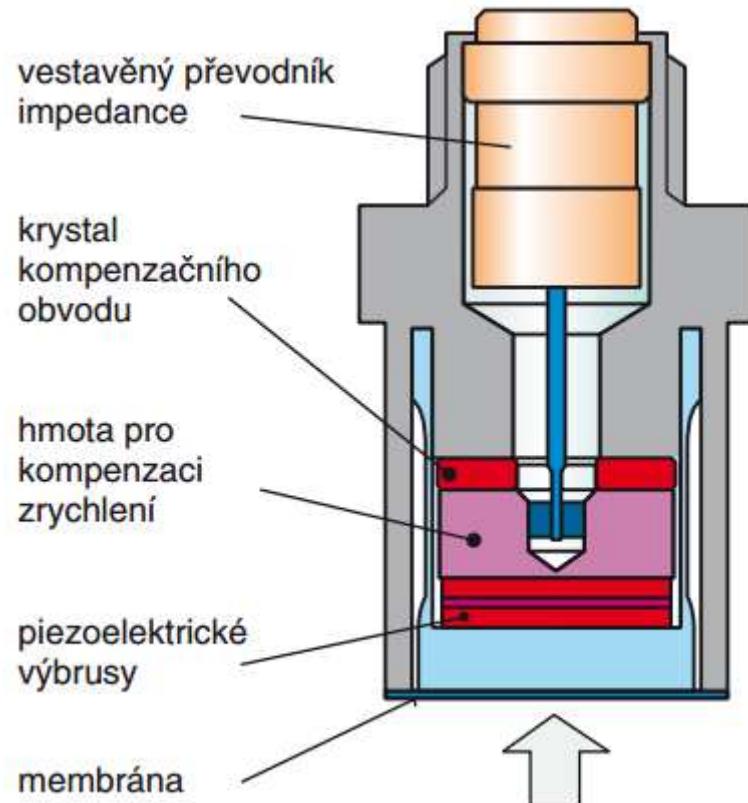




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Piezoelektrické snímače tlaku

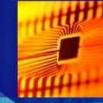


Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů k vyvolání elektrického náboje, vhodné k měření časově proměnných tlaků a rychlých dějů.

Měřit statický tlak v podstatě nemohou, jelikož náboj vzniklý po přiložení tlaku se vlivem nedokonalostí izolace vybíjí a napětí na elektrodách stále klesá.

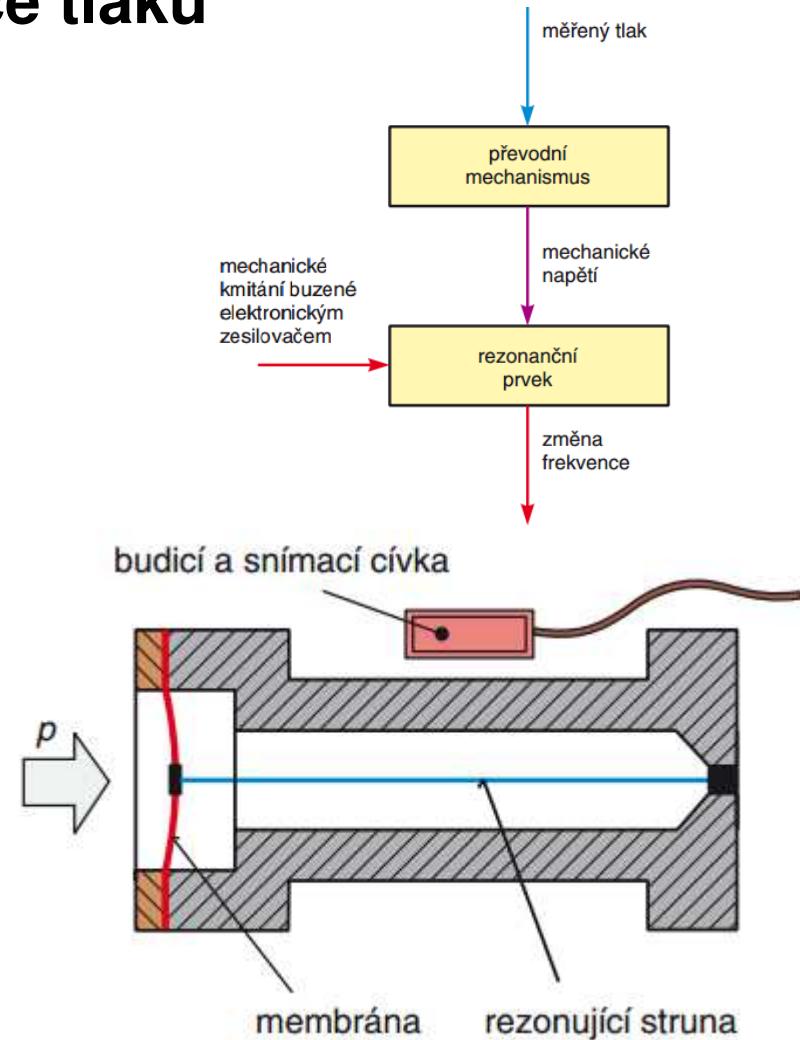


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



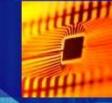
## Rezonanční snímače tlaku

- využívá závislost vlastní frekvence mechanického kmitání rezonančního prvku na jeho mechanickém napětí.
- Při daném uspořádání změna tlaku působícího na membránu vyvolá změnu mechanického napětí struny, a tím změnu její vlastní frekvence. Detekovaná změna frekvence je nositelem informace o změně tlaku.

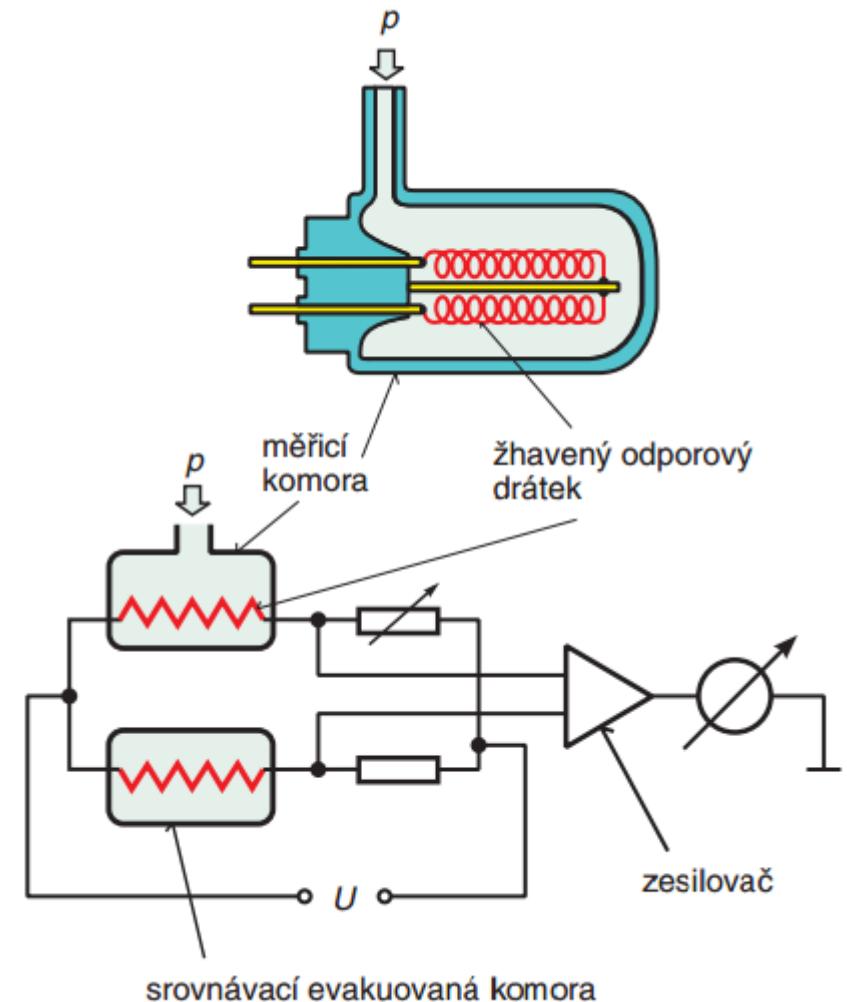




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

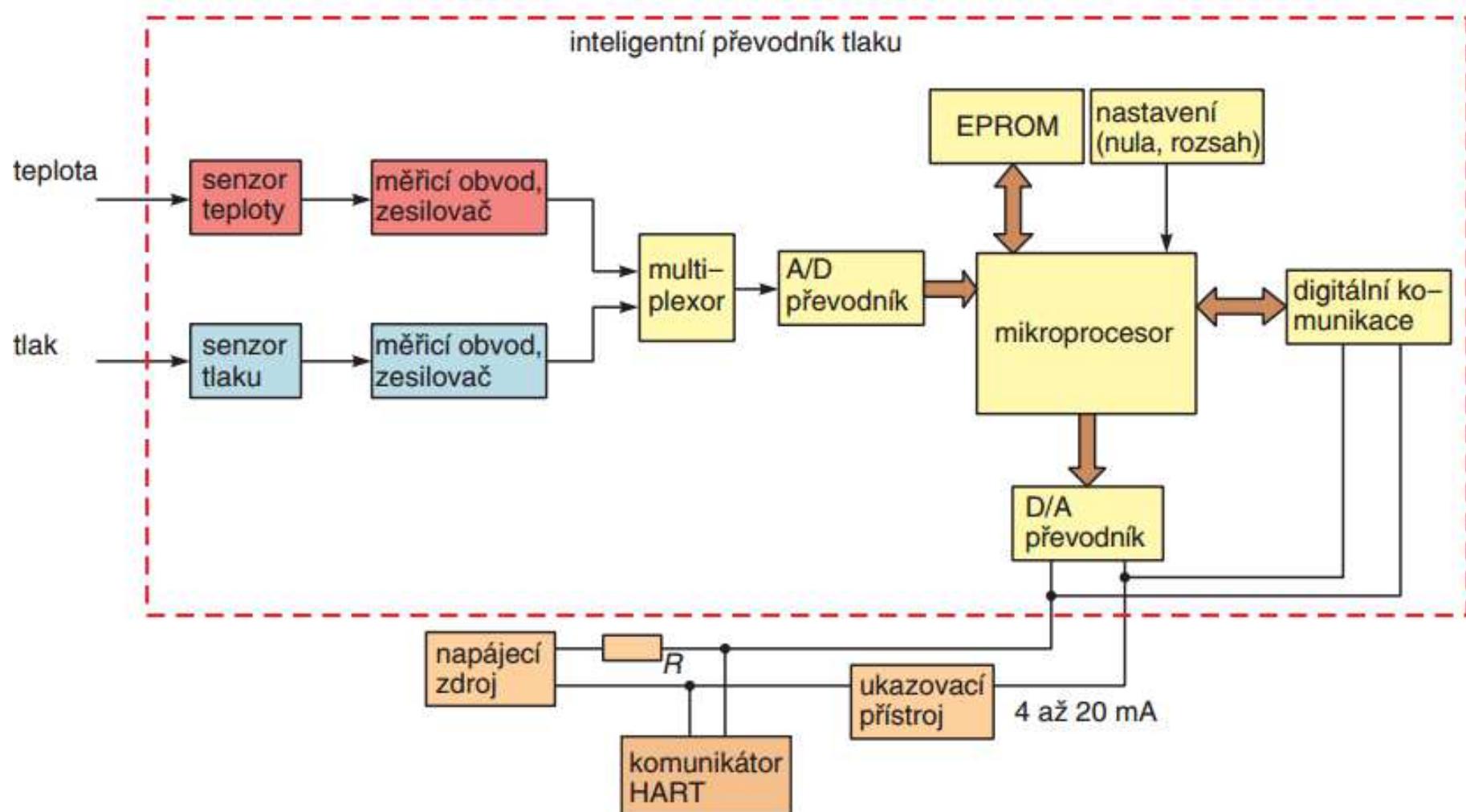


## Piraniho vakuoměr



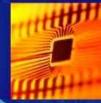


## Inteligentní - smart snímače tlaku

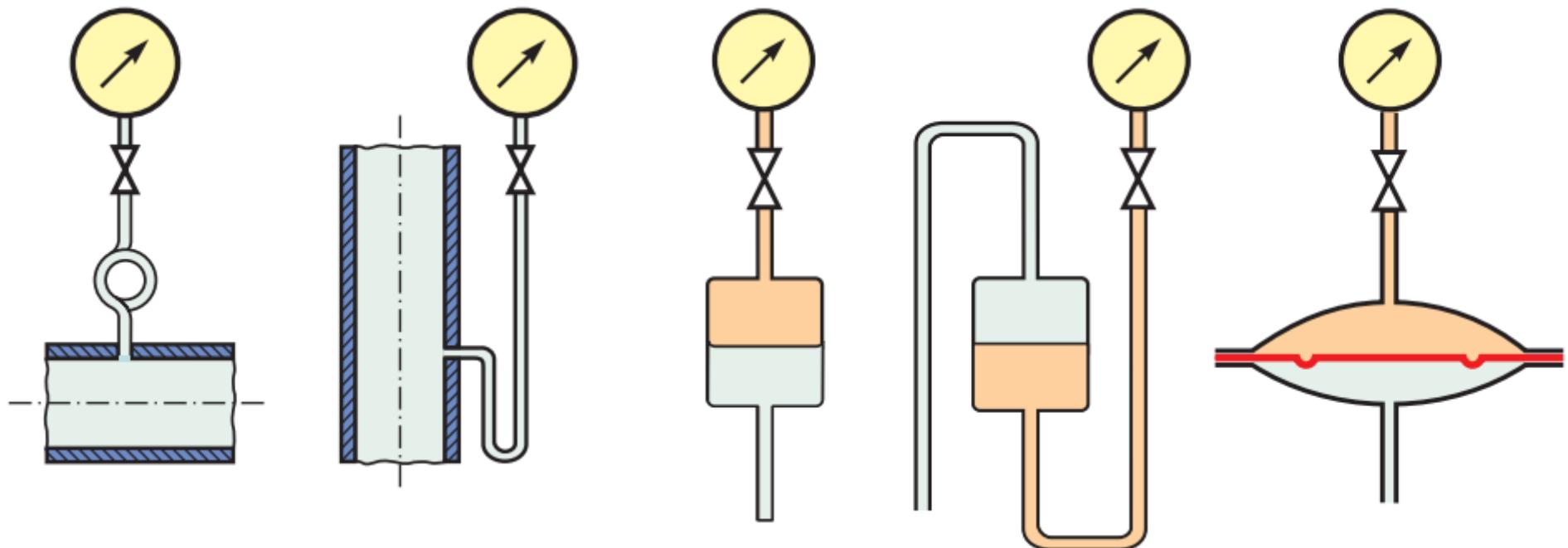




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

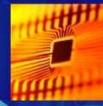


## Připojení snímače tlaku





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

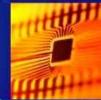


## Připojení snímače tlaku

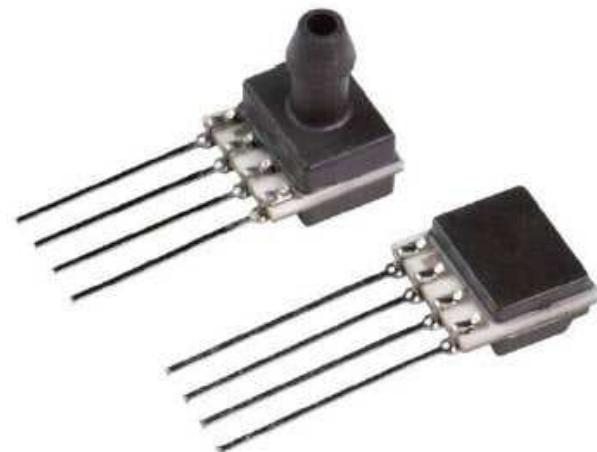




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

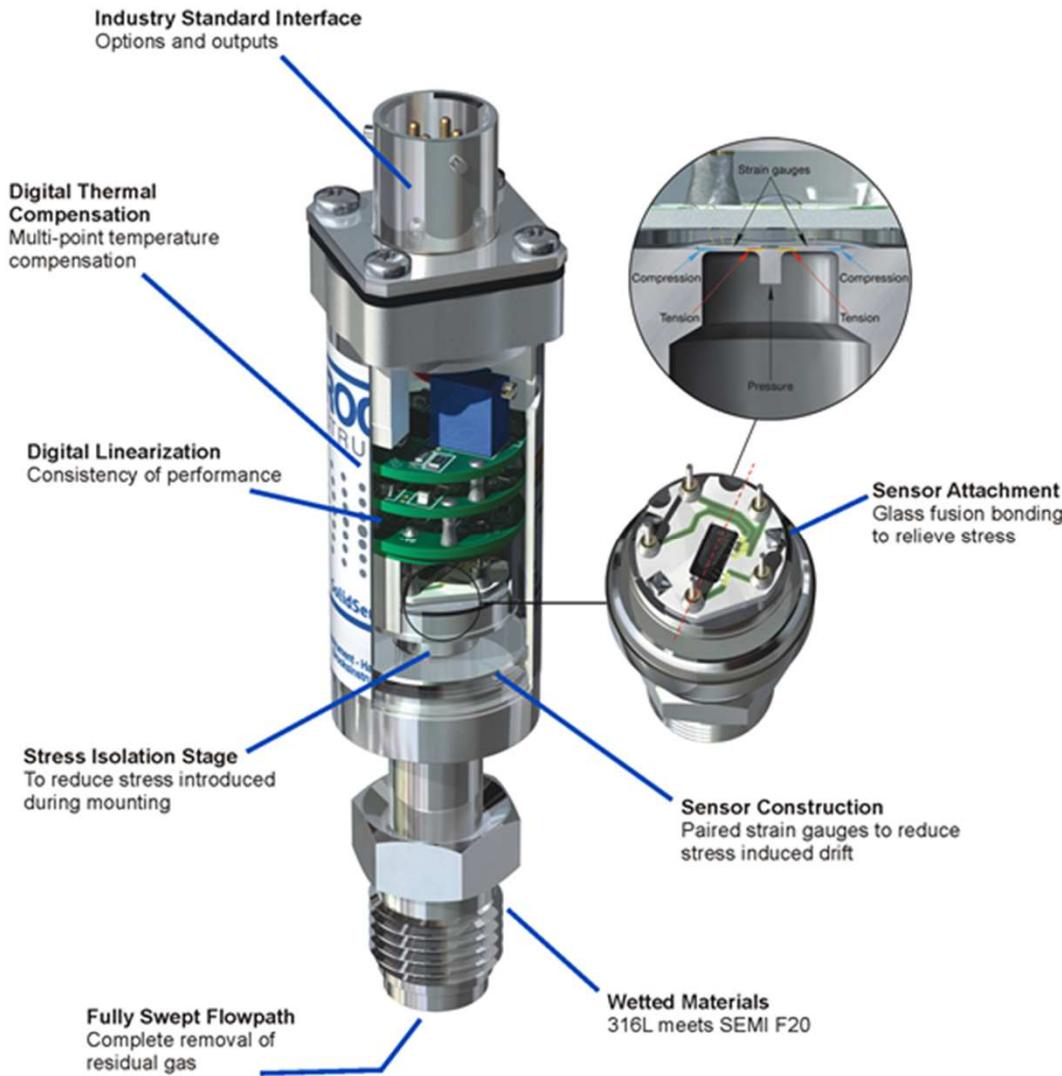
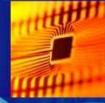


## Snímače tlaku





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

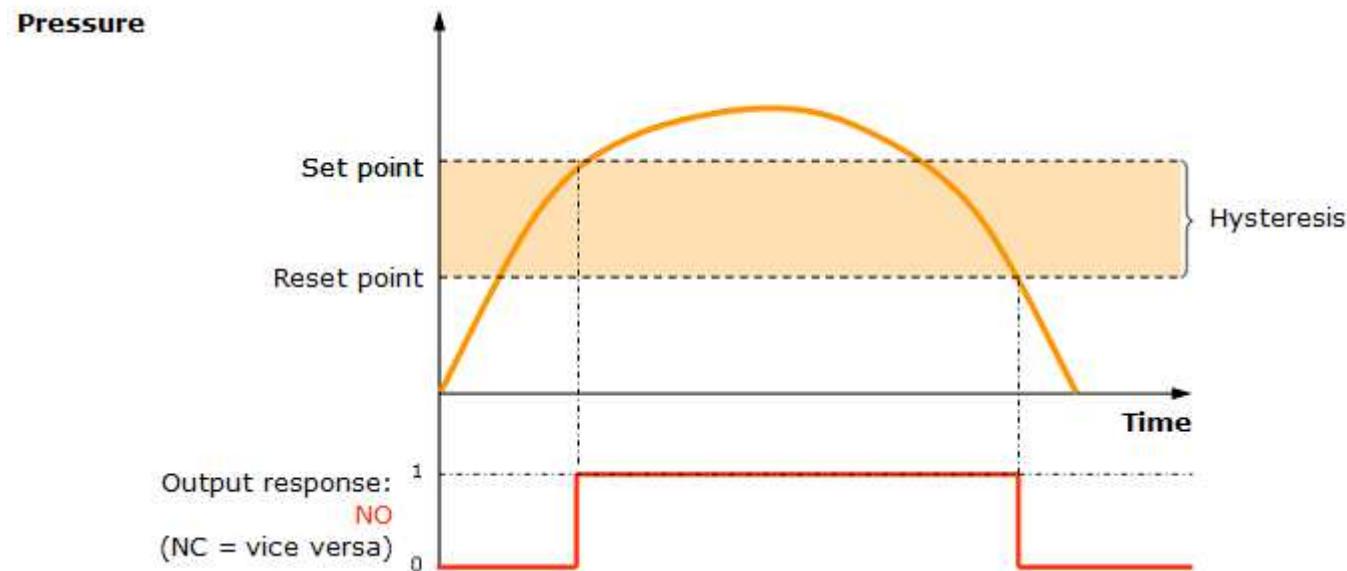




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Snímače tlaku

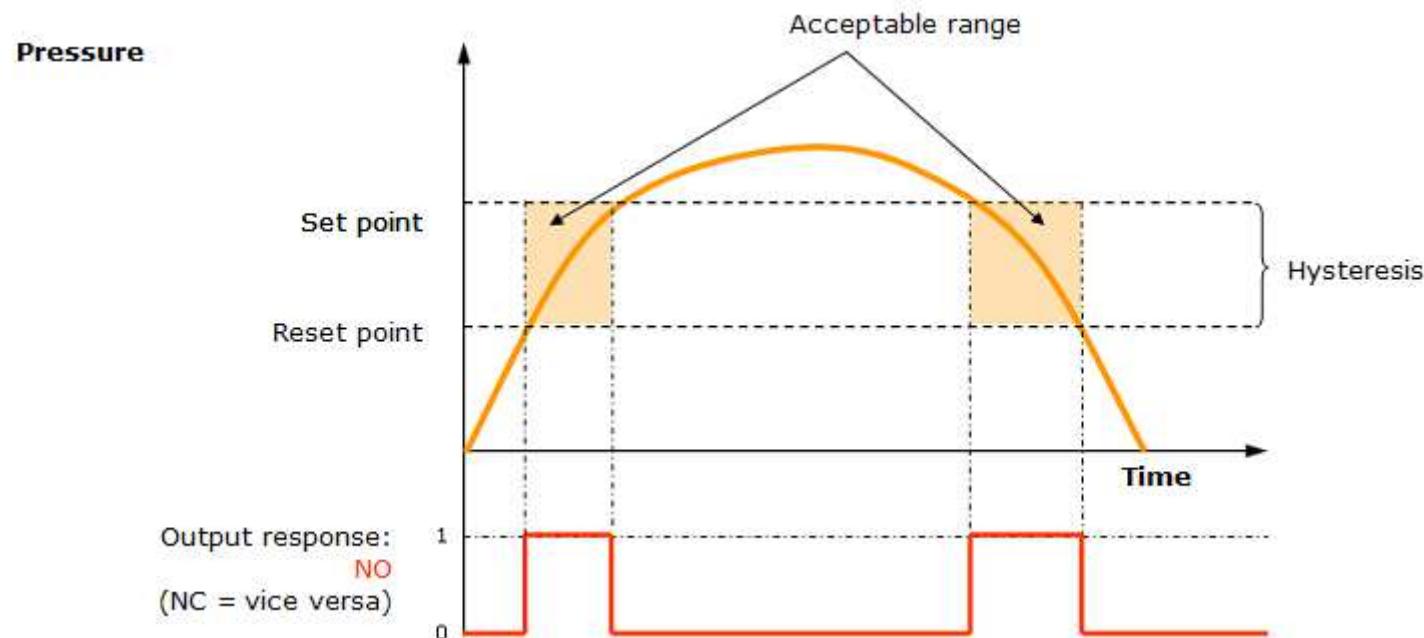




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Snímače tlaku

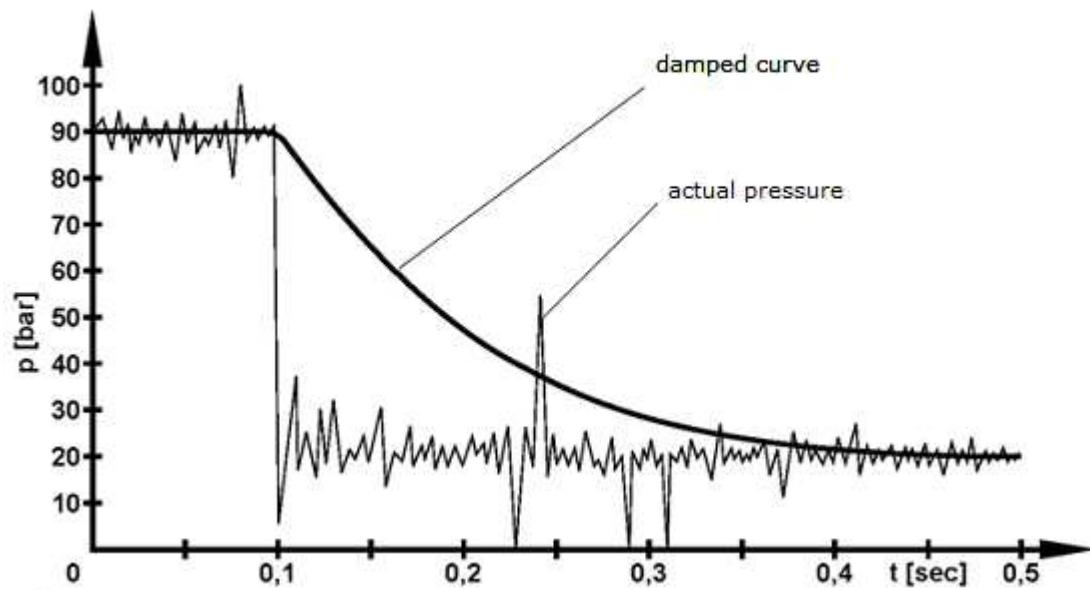




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Snímače tlaku





**zdroje: K.Kadlec, Automa**

**<http://cbe.vsb.cz>**



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství, FEI, VŠB-TU Ostrava

## 11-Měření průtoku

<http://cbe.vsb.cz>



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Úvod

Senzory průtoku tekutin zjišťují:

- objemový průtok  $Q_v$  nebo
- hmotnostní průtok  $Q_m$

$$Q_v = \frac{V}{t} = \bar{v} \cdot S \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = \varrho \cdot \bar{v} \cdot S \quad [kg \cdot s^{-1}],$$

tekutiny či plynu, který protekl určitým průřezem za jednotku času.

Ze známé plochy průřezu  $S \quad [m^2]$  a střední rychlosti proudění  $\bar{v} \quad [m \cdot s^{-1}]$  lze definovat  $Q_v$  a  $Q_m$



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



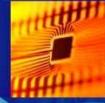
## Přímé a nepřímé měření

**Přímé měření** průtoku se uskutečňuje dávkovacími senzory (rotující píst, ozubené kolo, bubnové), kdy tekutina je rozdělována na přesně definované díly a transportována ve směru proudění.

**Nepřímé měření** průtoku většinou vychází z rychlosti nebo změny kinetické energie měřené tekutiny. Nepřímé měření  $Q_v$  a  $Q_m$  předpokládá znalost (a stálost) hustoty tekutiny  $\rho$  a uplatní se zde závislost střední rychlosti  $\bar{v}$  na typu proudění.



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Viskozita - tekutost

- Viskozita charakterizuje vnitřní tření a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi tekutiny.
- Větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.
- Ideální kapalina má viskozitu (vazkost) = 0 supertekutina
- Převrácená hodnota viskozity je tekutost – ideální kapalina má nekonečnou tekutost.

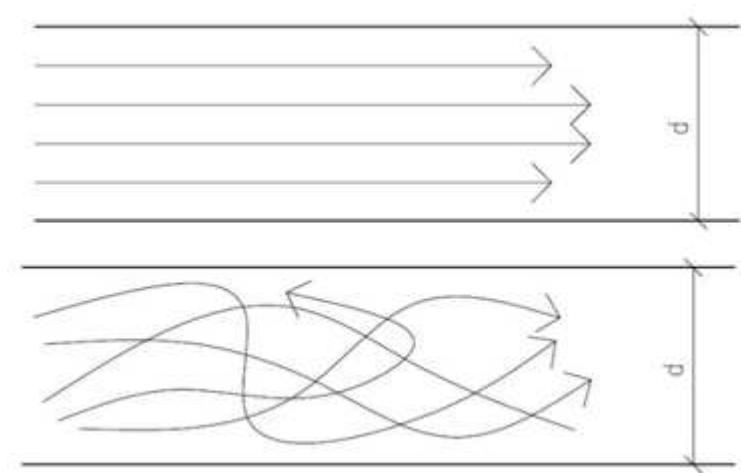


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Typy proudění

- **Laminární proudění** je charakterizováno parabolickým rychlostním profilem (směrem ke stěnám kanálu rychlosť klesá).  $Re < 2000$
- **Turbulentní proudění** se vyskytuje u větších rychlostí a u tekutin s menší přitažlivou silou mezi částicemi. Proudění se rozpadá na víry a rychlostní profil je blízký rovnoměrnému. S tímto prouděním pracuje většina aplikací.  $Re > 4000$



$$Re = (v_s \times d) / u$$

- střední hodnota rychlosti proudění tekutiny
- charakteristický rozměr průřez
- kinematická viskozita tekutina



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Základní metody měření průtoku

- Objemová

$$Q_v = \frac{V}{t} ; \quad Q_m = \frac{V}{t} \cdot \rho ,$$

- Hmotnostní

$$Q_m = \frac{m}{t} ,$$

- Rychlostní

$$Q_v = \bar{v} \cdot S , \quad Q_m = \bar{v} \cdot S \cdot \rho .$$

- Měření rozdílů tlaků před a za prvkem průtokoměru



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

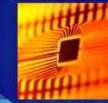


## Základní metody měření průtoku

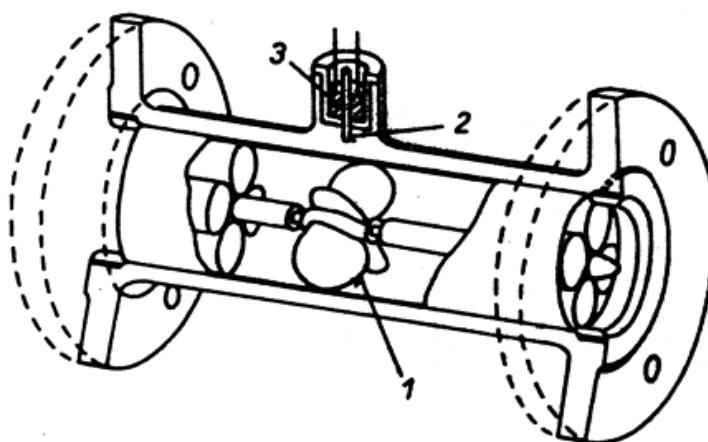
- Rychlostní
  - Turbinkový, vírový, indukční (elektromagnetický), ultrazvukový
- Měření rozdílů tlaků před a za prvkem průtokoměru
  - Plováčkový, clona, dýza, Pitotova trubice
- Objemové
  - Odměrné prostory
- Hmotnostní
  - Tepelné, Coriolisův



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



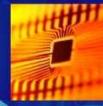
## Rychlostní senzory průtoku



- Využívají kinetické energie tekutin, která uvádí do rotačního pohybu soustavu vhodně uspořádaných ploch.
- Rychlosť otáčení (otáčky) n rotoru je přímo úměrná rychlosti proudění tekutiny a tedy i průtočnému množství  $Q_v$
- Úhlová rychlosť (otáčky n) se snímá počítáním průchodu lopatek pod senzorem polohy.



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

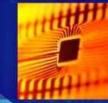


## Rychlostní senzory průtoku



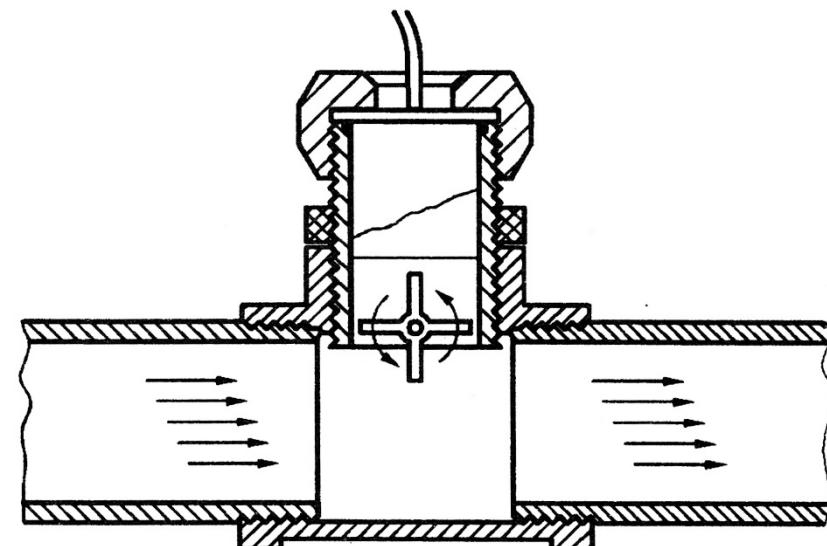


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



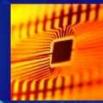
## Rychlostní senzory průtoku

- Lopatkové - liší se od turbínkových kolmou orientací lopatek na směr proudění tekutiny
- Jsou výrobně levnější než průtokoměry turbínkové

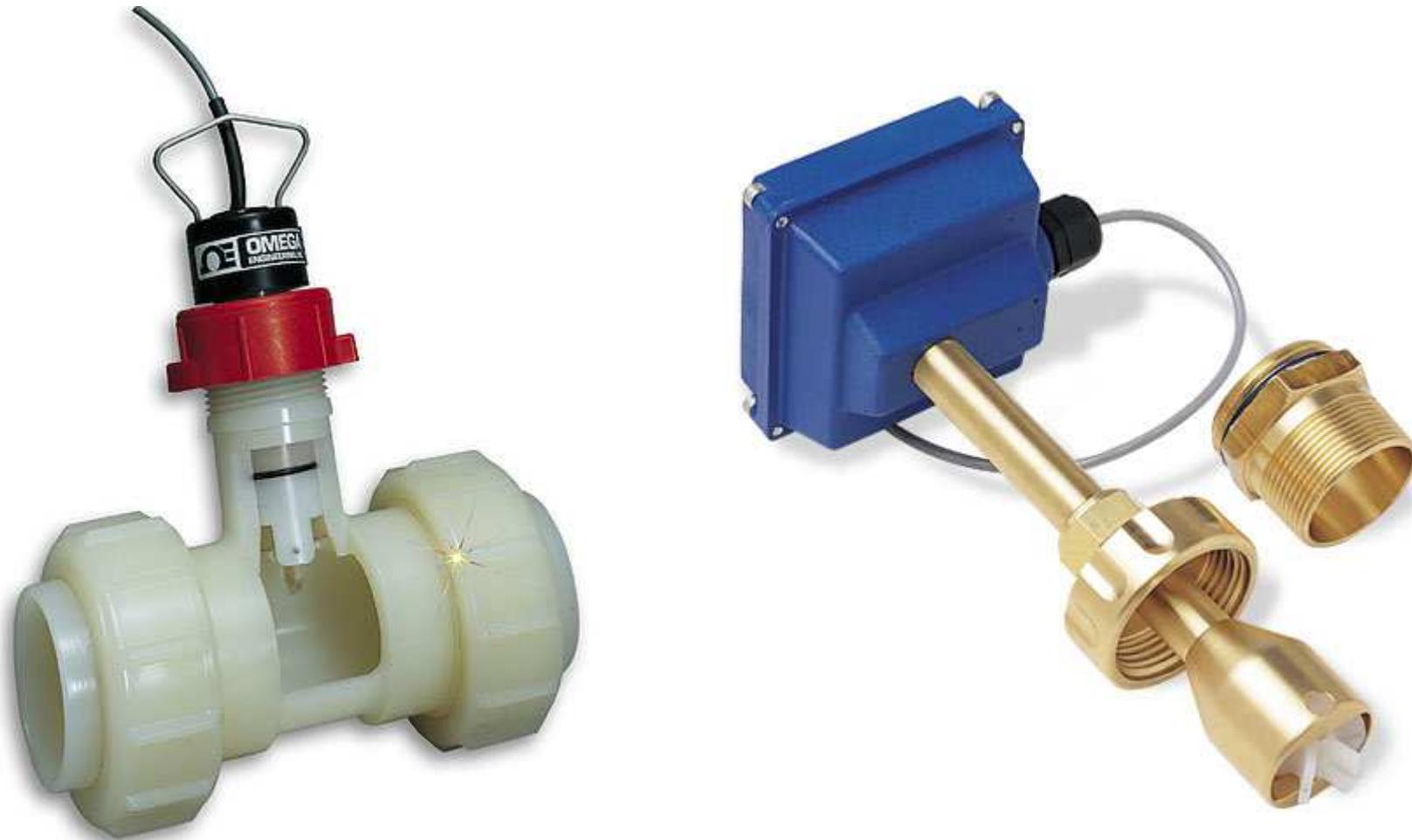




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

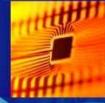


## Rychlostní senzory průtoku



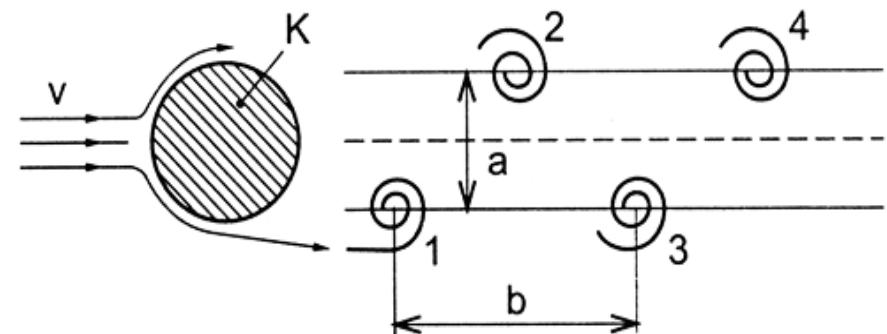


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Vírové senzory průtoku

- Pracují na principu měření frekvence Karmánových výrů, které vznikají za obtékaným tělesem v proudící tekutině.
- V praxi se nejčastěji využívá průtokoměrů pracujících s přirozenými oscilacemi, kdy jsou výry oddělovány za překážkou střídavě na horní a dolní straně. Je tomu tak proto, že proudící tekutina není schopna sledovat tvar překážky.
- Frekvence výrů je snímána senzory, zabudovanými buď do překážky, nebo do stěny potrubí.

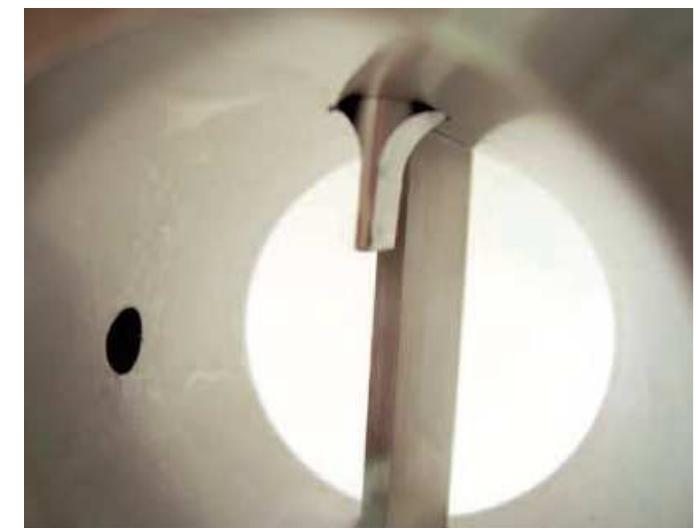
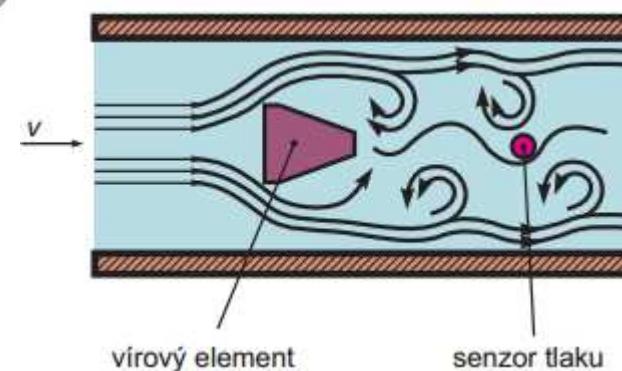
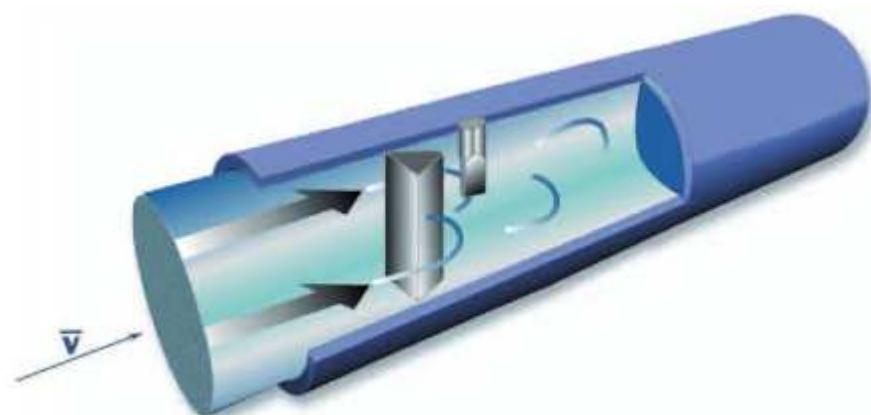




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Vírové senzory průtoku



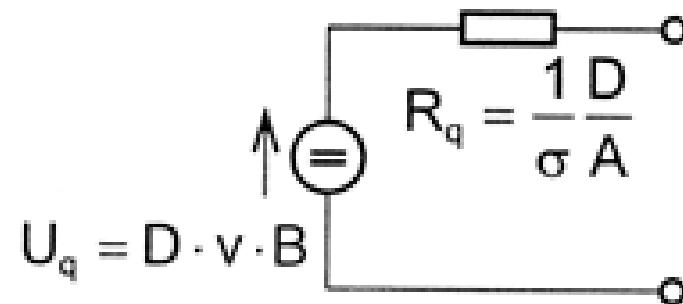
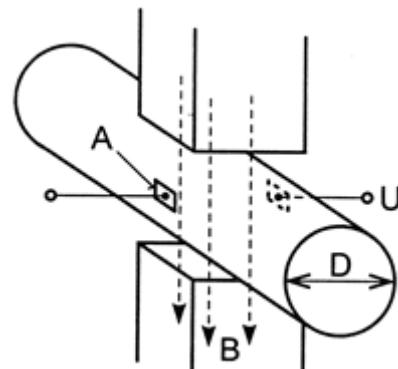


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



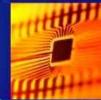
## Indukční senzory průtoku

- Jsou určeny k měření vodivých kapalin
- Ionty vodivé kapaliny se pohybují v magnetickém poli nevodivým kanálem, na jehož stěnách jsou umístěny snímací elektrody.
- Na pohybující se iont s nábojem  $q$ , který se pohybuje v magnetickém poli  $B$  rychlostí  $v$  působí Lorentzova síla  $F$
- Touto silou jsou náboje vychýleny s přímého směru a objeví se na elektrodách, kde vytvoří rozdíl potenciálů – napětí  $U$

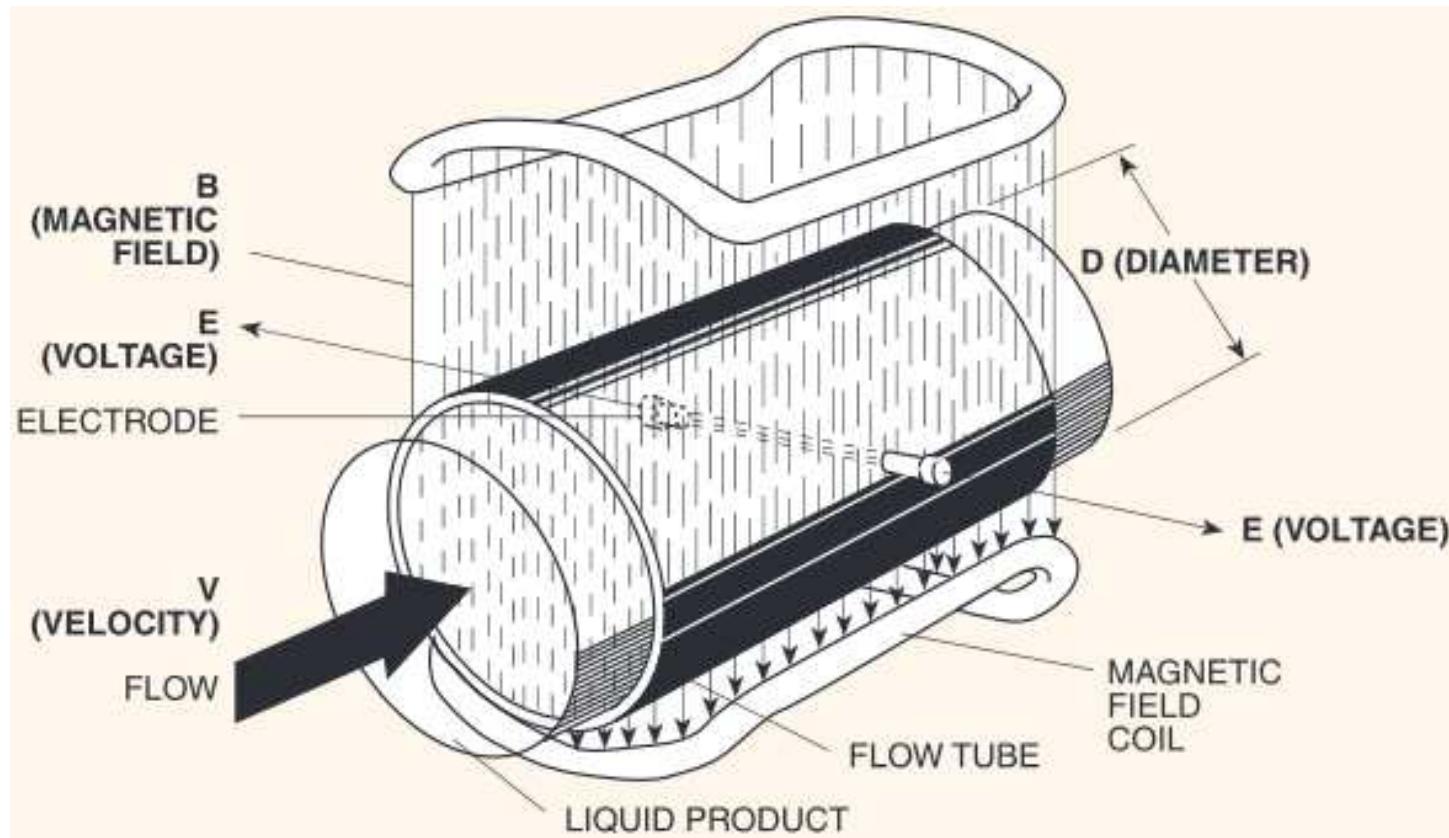




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Indukční senzory průtoku



$$E = VBD$$

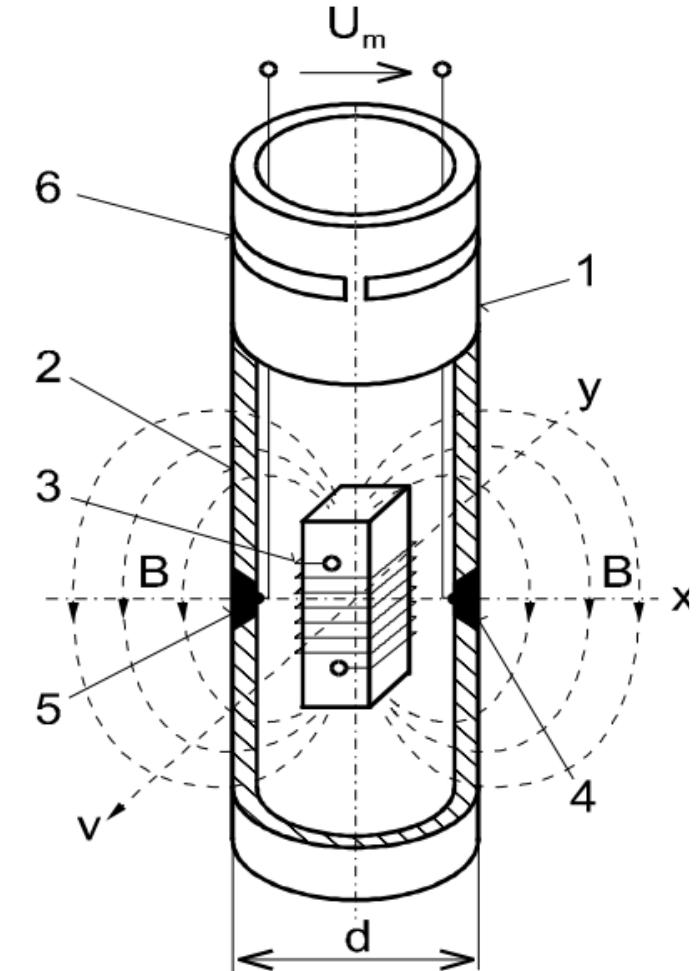
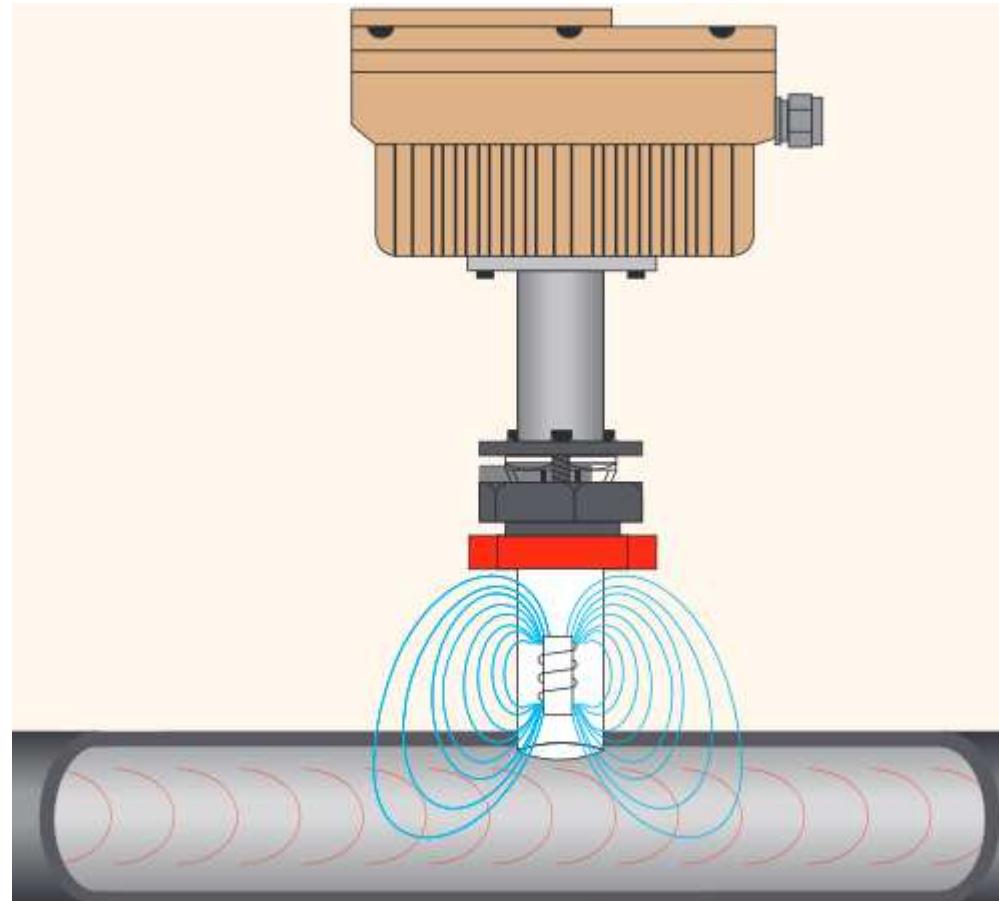
E = INDUCED VOLTAGE  
V = AVERAGE LIQUID VELOCITY  
B = MAGNETIC FIELD  
D = DISTANCE BETWEEN ELECTRODES



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

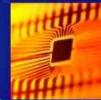


## Indukční senzory průtoku





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Indukční senzory průtoku



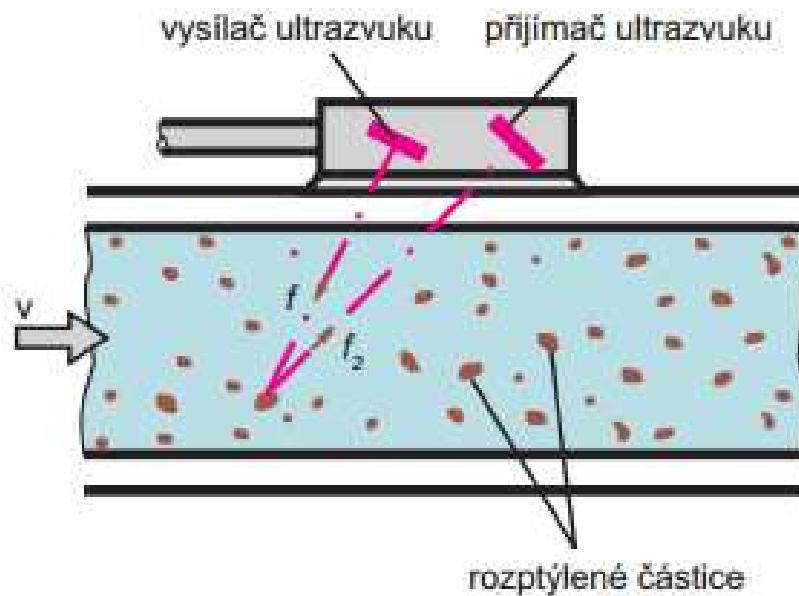


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



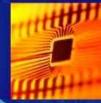
## Ultrazvukové senzory průtoku

- Principem činnosti ultrazvukových průtokoměrů je měření změny rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového vlnění (Doppler) v závislosti na průtoku tekutiny.



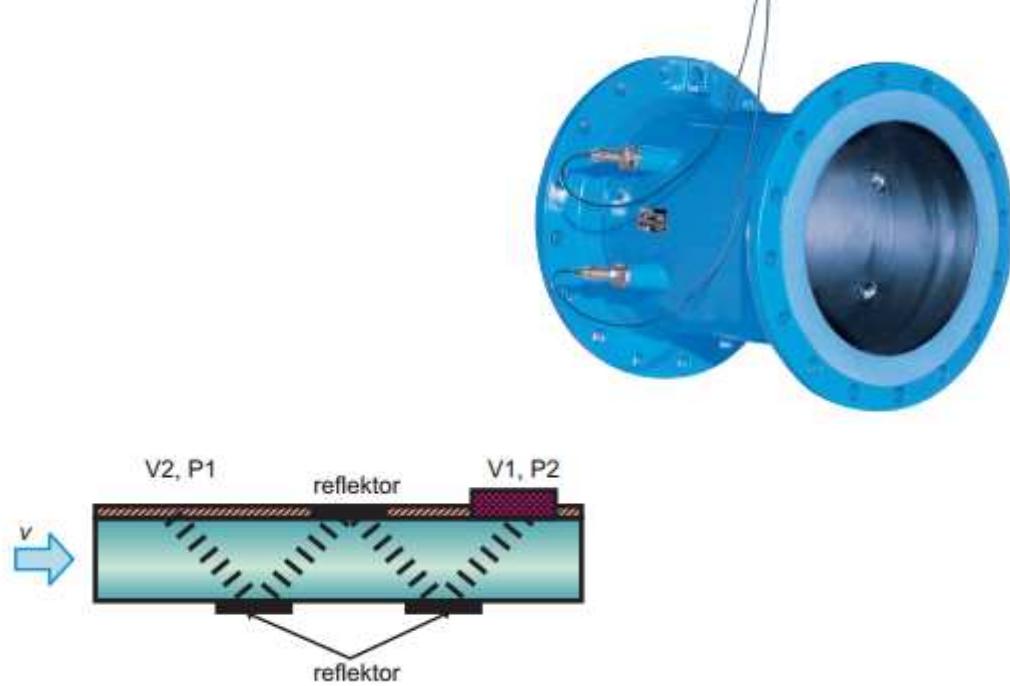
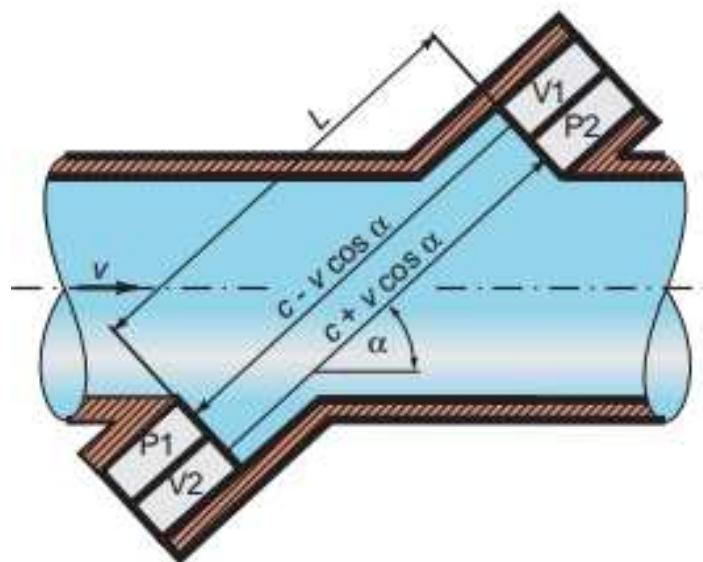


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Ultrazvukové senzory průtoku

- Průtokoměry, u nichž se vyhodnocuje doba šíření ultrazvukového signálu, se nejčastěji konstruují v rozdílovém zapojení. Ultrazvukový signál se vysílá jak ve směru, tak i proti směru proudění.



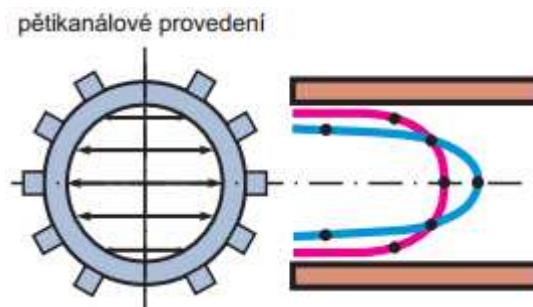
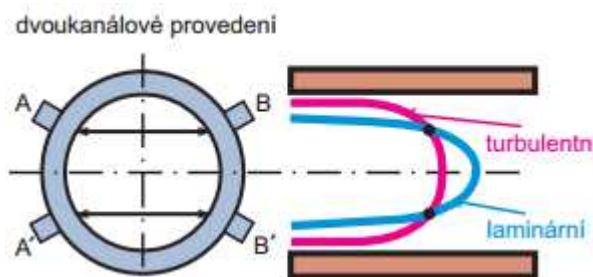


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Ultrazvukové senzory průtoku

- Vícekanálové průtokoměry,



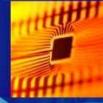


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



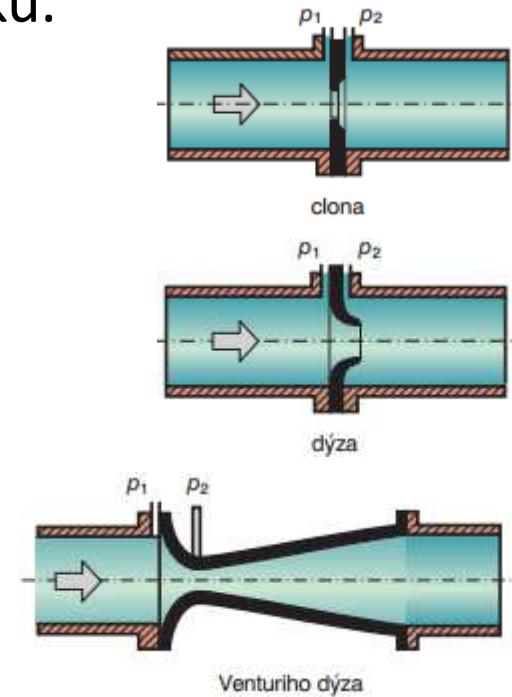
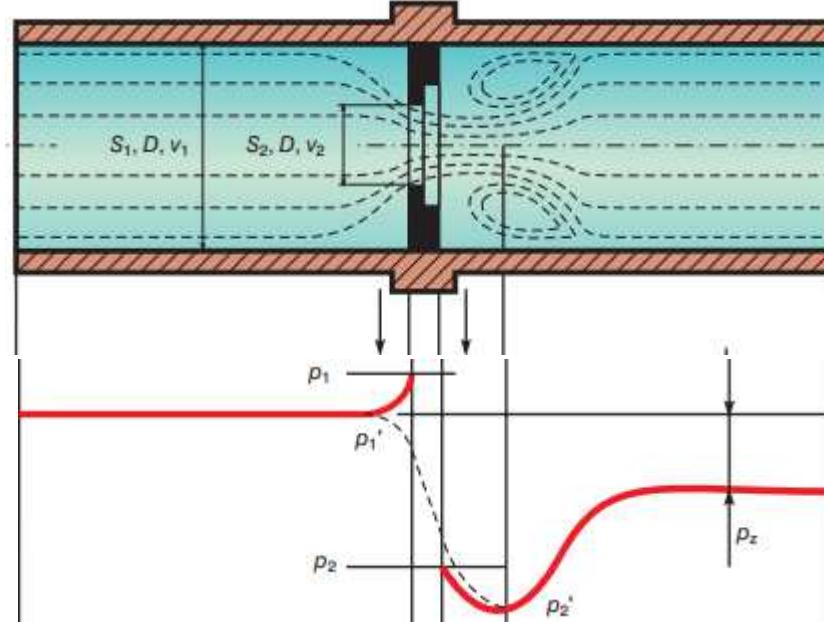
## Základní metody měření průtoku

- Rychlostní
  - Turbinkový, vírový, indukční (elektromagnetický), ultrazvukový
- Měření rozdílů tlaků před a za prvkem průtokoměru
  - Plováčkový, clona, dýza, Pitotova trubice
- Objemové
  - Odměrné prostory
- Hmotnostní
  - Tepelné, Coriolisův



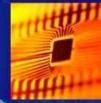
## Senzory průtoku se škrtícím prvkem

- Ke své činnosti využívají tlakového rozdílu, který vzniká před a za škrtícím orgánem.
- Rozdíl statických tlaků v médiu před zúžením a za zúžením snímaný diferenčním tlakoměrem je úměrný průtoku.

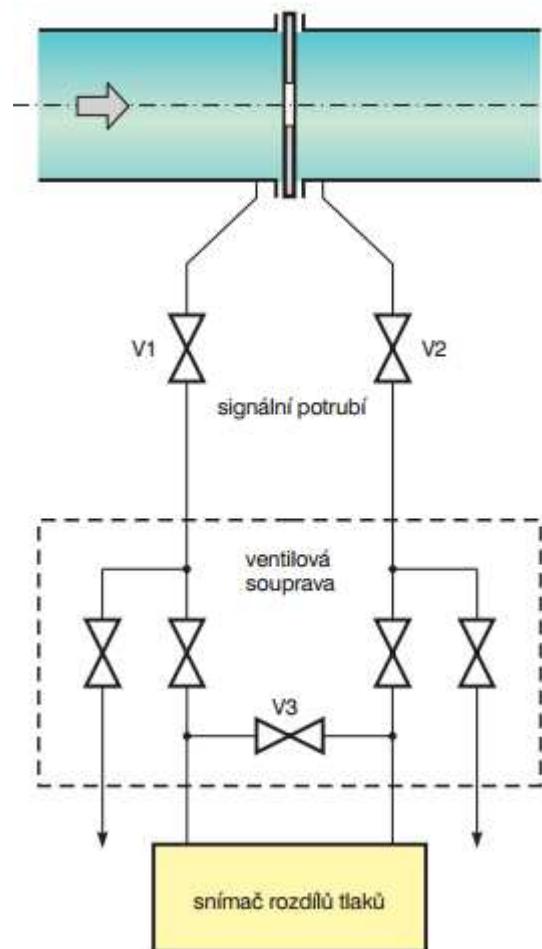




# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

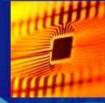


## Senzory průtoku se škrtícím prvkem





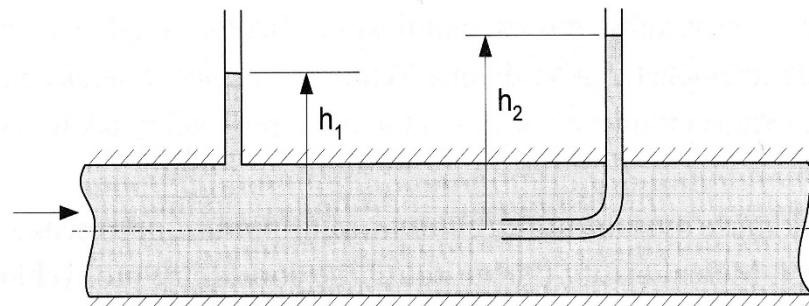
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Pittotova trubice

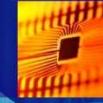
- tlak  $h_2$  je tlakem celkovým, který se skládá z tlaku statického  $p_1$  a tlaku dynamického.

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

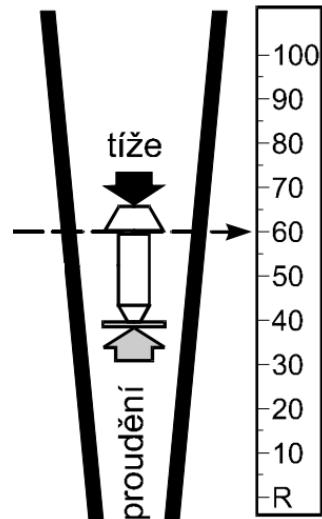




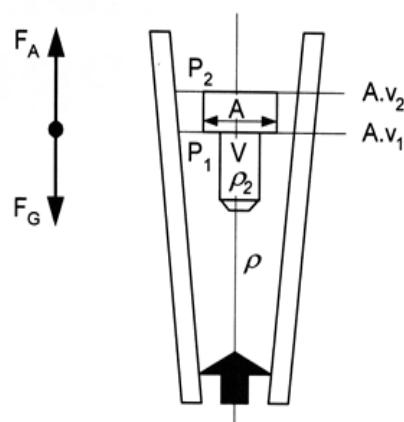
# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Plováčkový průtokoměr



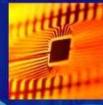
- Nadlehčující síla  $F_A$  se skládá:
  - p<sub>1</sub>, -statický tlak tekutiny,
  - V.p.g, -vztlak vyvolaný objemem plováku,
  - A.(pv<sub>1</sub><sup>2</sup>)/2, -dynamický tlak při rychlosti v<sub>1</sub>.
- Protisíla  $F_G$  má složky:
  - p<sub>2</sub> -síla úměrná statickému tlaku p<sub>2</sub>,
  - V.p<sub>2</sub>.g, -hmotnost plováku.



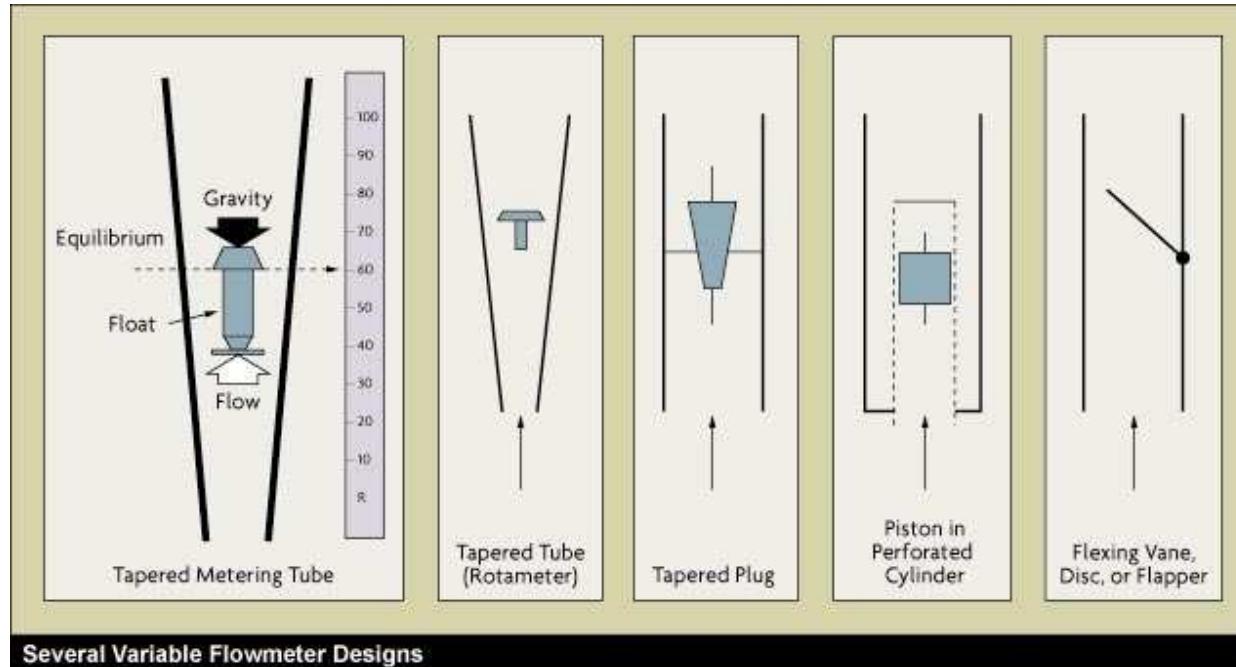
Závislost na hustotě tekutiny je možno potlačit volbou hustoty plováku, pro určitý druh měřené tekutiny se volí plováček specifické hmotnosti



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Plováčkový průtokoměr





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

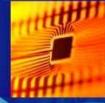


## Základní metody měření průtoku

- Rychlostní
  - Turbinkový, vírový, indukční (elektromagnetický), ultrazvukový
- Měření rozdílů tlaků před a za prvkem průtokoměru
  - Plováčkový, clona, dýza, Pitotova trubice
- Objemové
  - Odměrné prostory
- Hmotnostní
  - Tepelné, Coriolisův

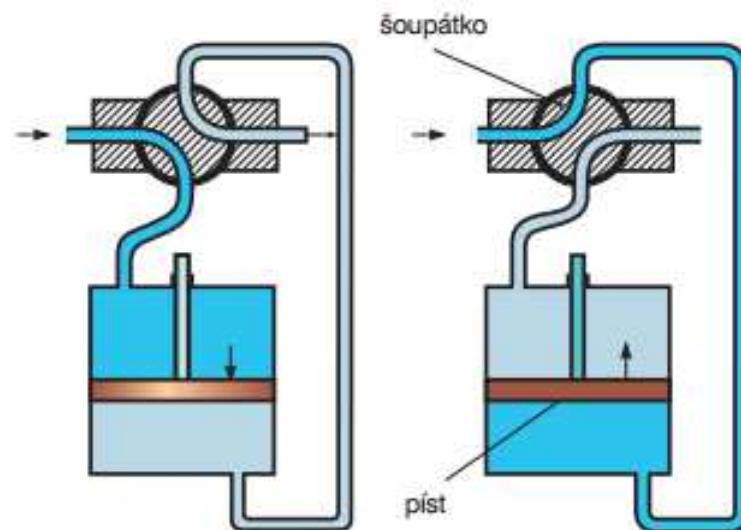


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



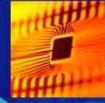
## Objemové senzory průtoku

- Dochází k rozdělení tekutiny na konečná objemová kvanta – dávky.
- Proudící tekutina je rozdělována na elementární dávky tím, že je nucena (na úkor kinetické energie a tlakové ztráty) proudit do přesně objemově vymezených prostorů, které se účinkem



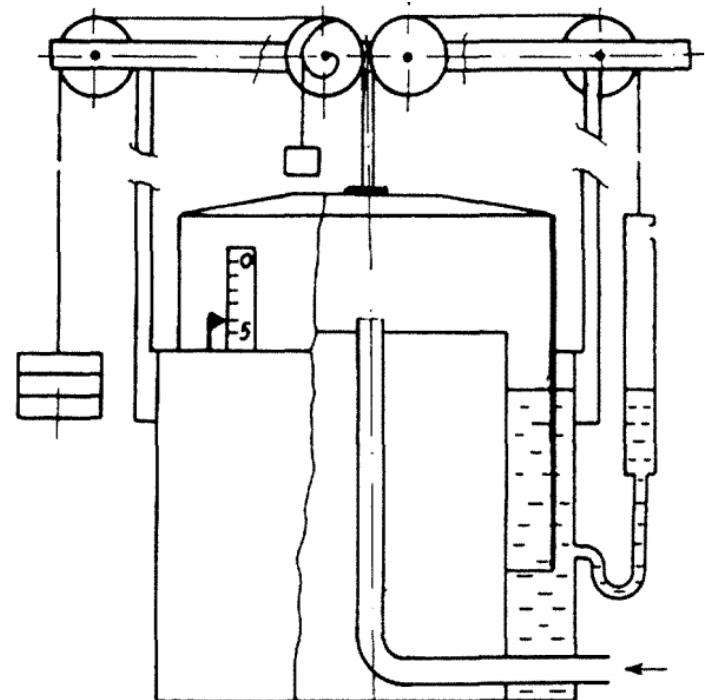


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



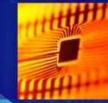
## Zvonový krychломěr

- Zvon zavěšený na laně zasahuje do nádoby s vodou
- Pod zvon se přivádí plyn jehož objem měříme
- Hmotnost protizávaží je úměrná přetlaku plynu
- Při vynořování zvona se snižuje vztaková síla kapaliny a hmotnost zvona roste



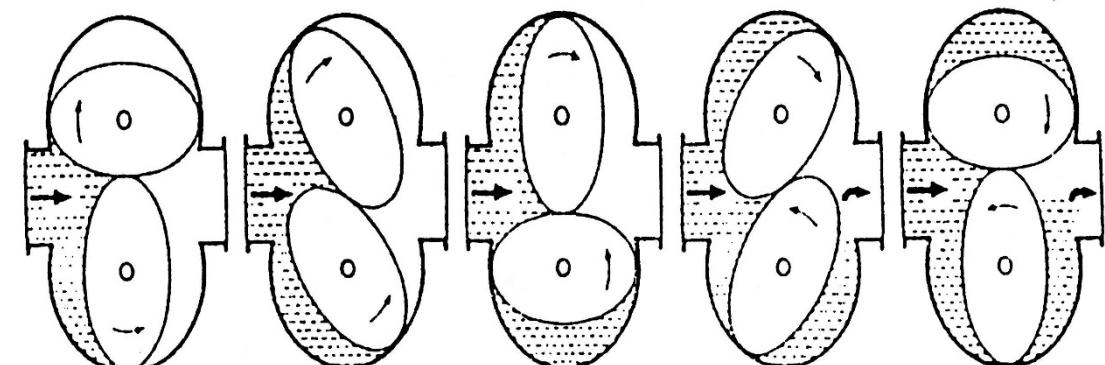
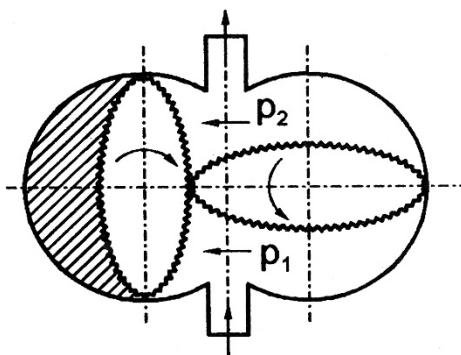


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Dávkovací objemové senzory průtoku

- Dochází k rozdělení tekutiny na konečná objemová kvanta – dávky.
- Proudící tekutina je rozdělována na elementární dávky tím, že je nucena (na úkor kinetické energie a tlakové ztráty) proudit do přesně objemově vymezených prostorů, které se účinkem proudění vyprazdňují a znova naplňují.





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Základní metody měření průtoku

- Rychlostní
  - Turbinkový, vírový, indukční (elektromagnetický), ultrazvukový
- Měření rozdílů tlaků před a za prvkem průtokoměru
  - Plováčkový, clona, dýza, Pitotova trubice
- Objemové
  - Odměrné prostory
- Hmotnostní
  - Tepelné, Coriolisův



# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

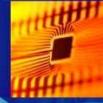


## Tepelné průtokoměry

- k měření průtoku média využívá vliv proudění tekutiny na šíření tepla.
- vyhodnocování energetické rovnováhy při sdílení tepla z elektricky vyhřívaného topného prvku do proudící tekutiny, přičemž se mění rozložení teploty
- Hmotnostní termoanemometry
- Kalorimetrické hmotnostní průtokoměry

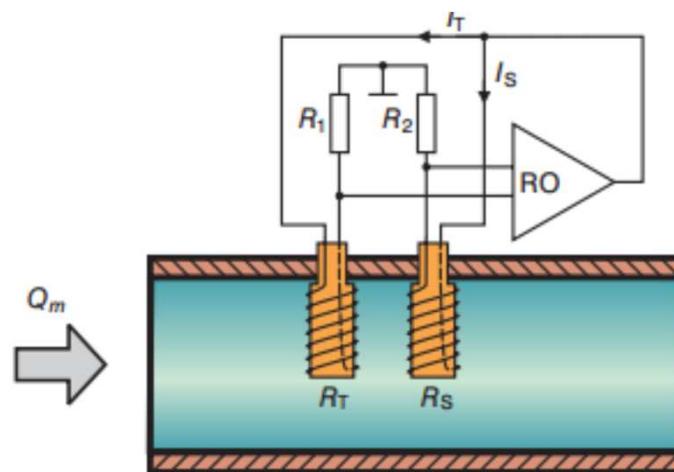


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



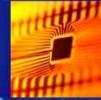
## Hmotnostní termoanemometr

- čidla teploty zasahují přímo do proudící tekutiny a vyhodnocuje se chladicí účinek nucené konvekce (způsobeno prouděním) na vyhřívané čidlo.
- Reg. obvod udržuje teplotu drátku konstantní – pokud je ochlazován, musí přes něj tечí větší proud



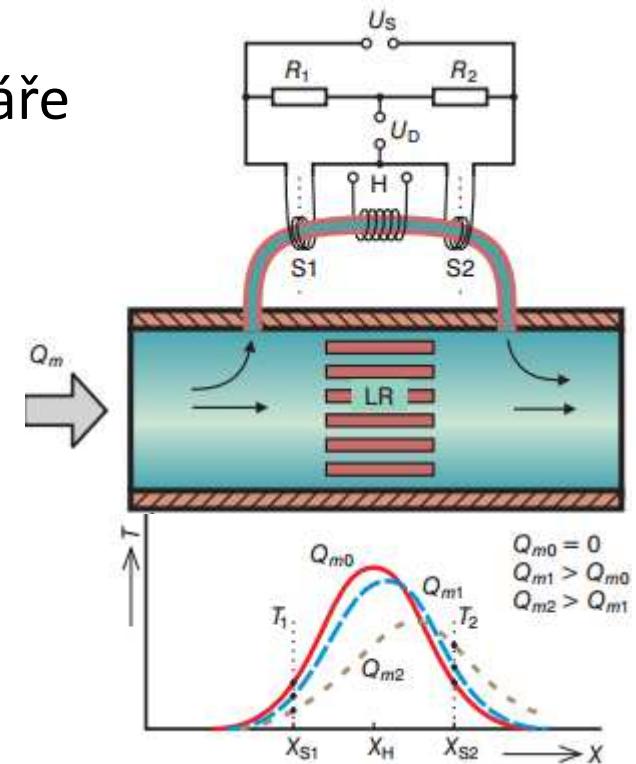


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



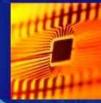
## Kalorimetrický hmotnostní průtok.

- Senzor vytvořen na tenké obtokové kapiláře kterou protéká jen malá část průtoku vzhledem k celkovému
- Kapilára je uprostřed opatřena topným vinutím H
- Teplota stěny je měřena čidly teploty označenými S1 a S2, která jsou umístěna symetricky po obou stranách topného vinutí.



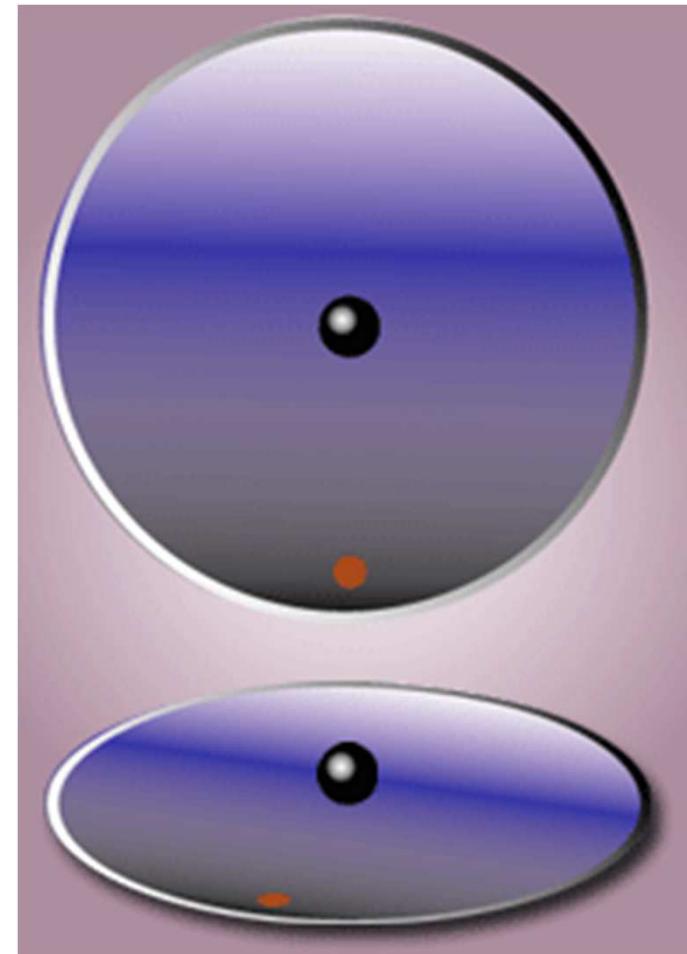


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



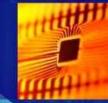
## Coriolisovův průtokoměr

- Coriolisova síla je setrvačná síla působící na tělesa, která se pohybují v rotující neinerciální vztažné soustavě tak, že se mění jejich vzdálenost od osy otáčení.
- Coriolisova síla má směr kolmý ke spojnici těleso – osa otáčení a způsobuje stáčení trajektorie tělesa proti směru otáčení soustavy (v případě pohybu tělesa od středu otáčení).



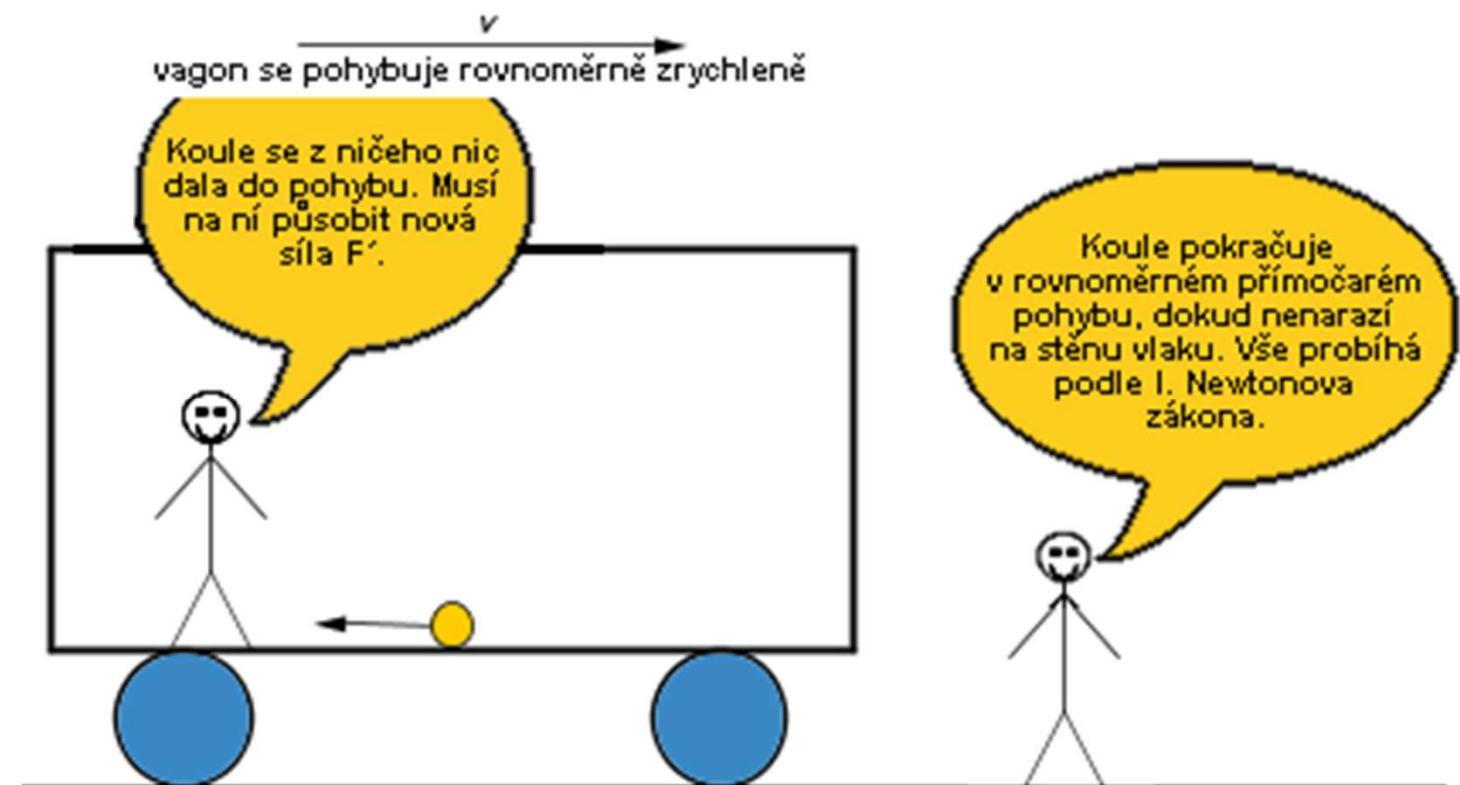


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Vztažné soustavy

- Inerciální soustava – vzhledem ke stálici se buď nepohybuje nebo pohybuje rovnoměrně přímočaře



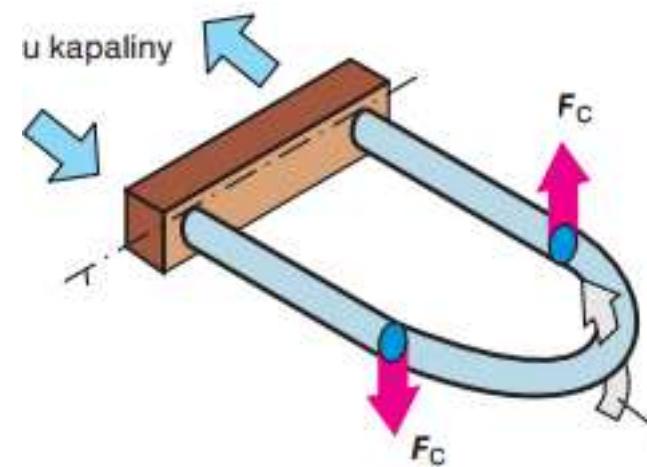
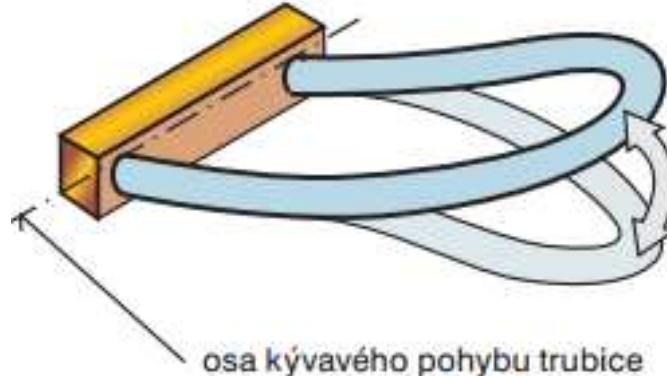


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Hmotnostní senzory průtoku

- Coriolisovův průtokoměr
- Využívá Coriolisovy síly  $\vec{F}_C$ , která působí na těleso o hmotnosti  $m$  pohybující se přímočaře rychlostí  $\vec{v}$  v soustavě otáčející se úhlovou rychlostí  $\vec{\omega}$ . 
$$\vec{F}_c = 2m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega}) = m \cdot \vec{a}_c ,$$



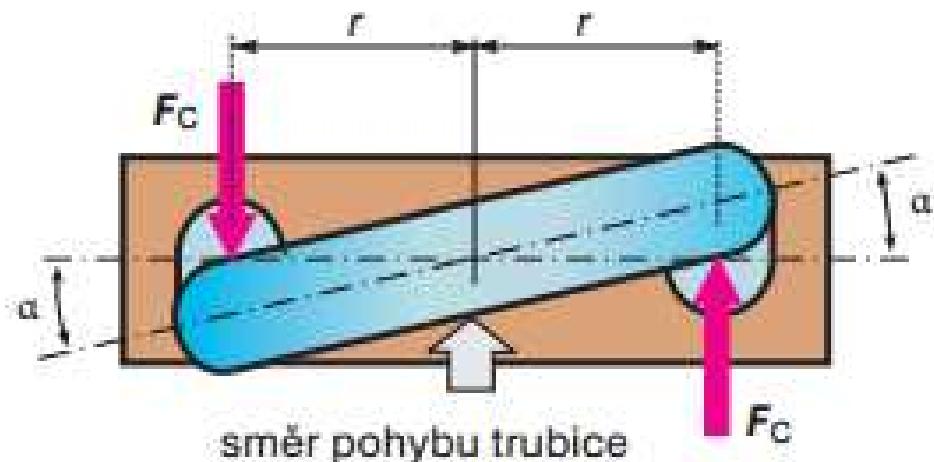


# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Hmotnostní senzory průtoku

- Při využití Coriolisovy síly v praxi k měření průtoku je otáčivý pohyb trubice nahrazen harmonickým kmitáním, tj. vektor  $\omega$  a také vektor  $\Delta FC$  mají periodicky proměnnou orientaci.





# Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Výběr průtokoměru

- respektováním daných podmínek měření, požadavků na nejistotu a dalších provozních podmínek
- nutné brát v úvahu přednosti a nedostatky a znát výhody a nevýhody jednotlivých typů průtokoměrů.
  
- Výběr průtokoměru je náročná úloha, při níž je třeba se řídit mnoha kritérii vyplývajícími z vlastností měřeného média a podmínek měření a z rozvahy požadavků



**zdroje: K.Kadlec, Automa**

**<http://cbe.vsb.cz>**