

# MĚŘICÍ TECHNIKA II – učební text

MT2; FMMIS; 3.ročník; 5.semestr; povinný pro studenty:

Studijní program: Elektrotechnika a informatika - bakalářské studium

Obor: Elektronické informační a řídicí systémy

Specializace: Řízení technických systémů

Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Garant kurzu

## **Anotace**

Tento kurz je pokračováním předmětu Měřicí technika I. Studenti se seznámí zejména s metodami měření neelektrických veličin, s převodníky těchto veličin a získají základní informaci o skladbě měřicích systémů a o principech dálkového měření.

## **Učební text – „nultá verze“**

Učební text vznikl pro podporu výuky kurzu Měřicí technika II. Na shromáždování informací spolupracovali posluchači FMMIS.

Text neprošel odbornou, typografickou ani jazykovou korekturou.

Studijní text pomůckou pro studenta navštěvující přednášky Měřicí technika II v akademickém roce 2008/2009.

## Obsah podle kapitol

1. Úvod do měření neelektrických veličin. Měřicí převodníky fyzikálních veličin. Měřicí řetězec. Statické a dynamické vlastnosti měřícího řetězce. Chyby měřícího řetězce. Metody zmenšení chyb snímačů.
2. Měření teplot a tepla. Základní principy měření teploty. Teploměry založené na mechanickém principu. Elektrické teploměry odporové, termoelektrické, polovodičové, krystalové.
3. Časová konstanta dotykových teploměrů. Měření nízkých teplot. Bezdotykové měření teploty, pyrometry. Termovize. Měřiče odběru tepla.
4. Měření tlaků. Piezoelektrické snímače, elektrometrické a nábojové zesilovače. Měření vakua.
5. Měření veličin v mechanice tuhých a poddajných těles. Měření deformací, tenzometry. Měření sil a točivého momentu, dynamometry.
6. Měření přímé a úhlové polohy, rychlosti, zrychlení.
7. Odporové, indukčnostní a kapacitní snímače. Měření otáček, stroboskopy, indukční a optoelektrické snímače.
8. Měření mechanického kmitání, absolutní a relativní snímače kmitání.
9. Měření veličin v mechanice tekutin. Měření rychlosti a průtoku.
10. Anemometrické snímače mechanické a elektrické. Základy laserové anemometrie.
11. Měření výšky hladiny. Měření vlhkosti. Analýza plynů, měření emisí.
12. Měření vodivosti kapalin. Měření pH.
13. Měření světelného záření, měření jaderného záření. Měření magnetických veličin. Měření hluku.
14. Dálková měření. Základní pojmy, rozdělení systémů dálkového měření. Přenosové cesty.

# 1.

## Úvod do měření neelektrických veličin

### Měřicí převodníky fyzikálních veličin.

### Měřicí řetězec. Statické a dynamické vlastnosti měřicího řetězce.

### Chyby měřicího řetězce.

### Metody zmenšení chyb snímačů.

## Témata

- Úvod do měření neelektrických veličin
- Měřicí převodníky fyzikálních veličin
- Měřicí řetězec
- Statické a dynamické vlastnosti měřicího řetězce
- Chyby měřicího řetězce
- Metody zmenšení chyb snímačů

- Sensory, snímače
- K vyhodnocení – měřicí řetězec
- Z ... poruchové veličiny
- X ... vstup
- Y ... výstup
- Indikátor – většinou osciloskop
- Obr.2 Blokové schéma měřicího řetězce

- Do převáděcího členu – vedení – měřicí cesta (ovlivňuje)
- Vyhodnocuje – můstky, zesilovače, LC obvody
- Měřicí řetězec
- Centralizovaný měřicí systém
- Decentralizovaný měřicí systém

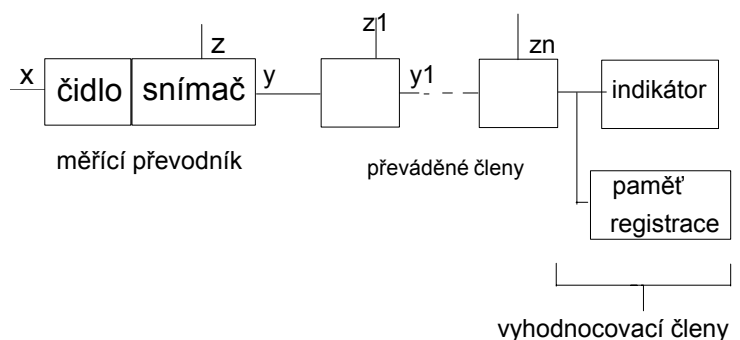
## Měření neelektrických veličin

### Historie

- velmi staré (starověk) – prvotní kvantitativní a kvalitativní ohodnocování - potřeba obchodu, rozvoj řemesel
- S rozvojem techniky se rozvíjí i měření – vědecký pokrok
- měření neelektrických veličin elektrickými metodami použito až po nalezení potřebných vztahů oblasti elektřiny a magnetismu
- Jedna z prvních metod – změna odporu v závislosti na teplotě
- Hlavní rozvoj v pol. 20. st. spolu s rozvojem automatizace
- Rozmach v konci minulého století - nové materiály, polovodiče, miniaturizace, výpočetní technika



## Měřicí řetězec

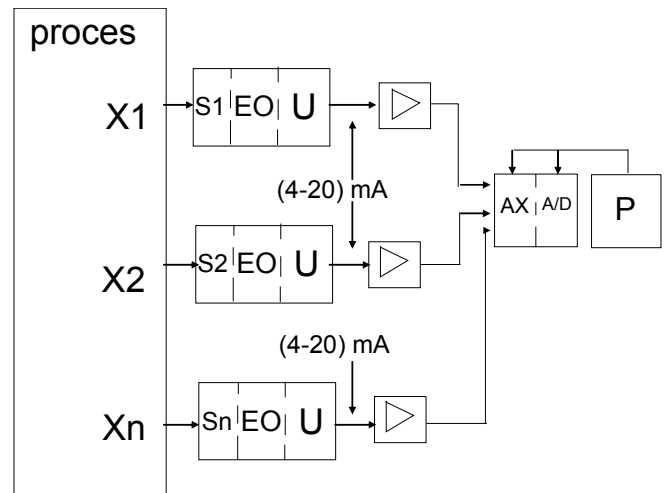
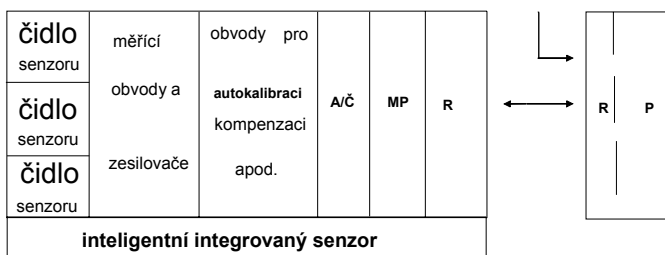


- Allometrie = Měření neelektrických veličin elektrickými metodami
- Řešení se sestává z nalezení:
  - fyzikálního charakteru děje
  - popisu fyzikálně-matematickými rovnicemi
  - sestavením měřicího obvodu
  - určením způsobu vyhodnocení výstupního signálu

- Y – el.veličina
- Z – poruchová veličina
- Převáděcí člen –úprava signálu z el.snímače
- El.napětí na indikátor(časový průběh)

- Regulovaná soustava pomocí integrátoru
  - Sledujeme průběh vizuálně
  - Reg.obvod zapíná nebo vypíná akční člen
- Převod proudovou linkou
  - Nevýhoda
    - Signál v analogové podobě
    - Cestou vystaven rušení

## Integrační senzor používaný dnes



- Integrační senzor
- Zpracovává více signálů

Senzor –vlastní čidlo + převáděcí člen

– Teplotní kompenzace senzoru

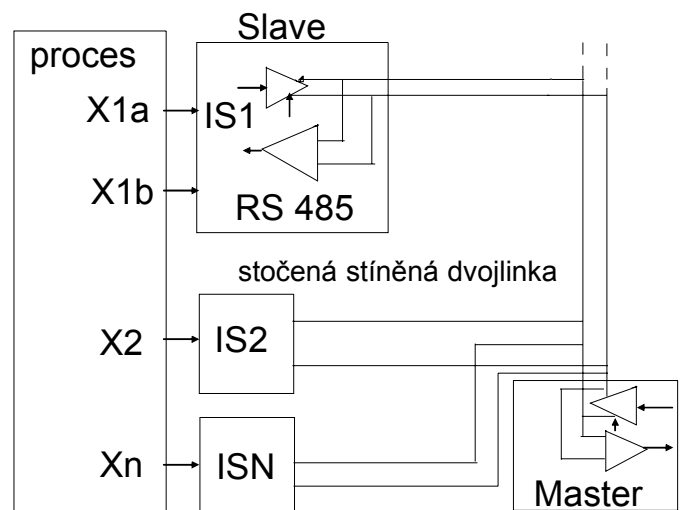
– Předává signál ven

## Integrační senzor přes zbernice

- Obousměrná adresovatelná zbernice
- Připojena paralelně k MASTER
- Kalibrace,různá nastavení
- Obousměrný provoz na velké vzdálenosti
- Na linkách číslicový signál

## Smart senzory

- Inteligentní
- Kalibrace
- Obousměrná komunikace s PC
- Více senzorů ve snímači
- Více měření najednou



- Statické vlastnosti

- Převodová charakteristika vztahu mezi výstupní a vstupní veličinou v časově ustáleném stavu
- Udávají chování v časově ustáleném stavu

Lze nahradit polynomem

$y=f(x)$  bezporuchový

$y=f(x, z_i)$  poruchový

Kvůli linearizaci  $y=k \cdot x$

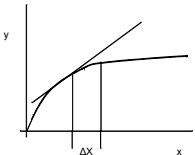
K-konstanta citlivosti

## Linearizace vstupního signálu



- Není-li charakteristika lineární musíme K určovat v každém bodě jako tečnu

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$



- Na poruchové veličině  $K = \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)$

- Volba náhradní charakteristiky

- Není důležitá vysoká přesnost (regresivní fce)
- Proložení náhradní fce

Kalibrační křivka

do PC kde se zpracovává v tabulce

## Regresivní funkce

- Používá se metoda nejmenších čtverců

$y = K \cdot x$

odchylka

$$\Delta y_i = y_i - K x_i$$

$$\sum_{i=0}^n (\Delta y_i)^2 = \min \quad K = \frac{\sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=0}^n x_i^2}$$

### Přesnost měřicích členů z hlediska statických vlastností

- Char. schopnost dávat na výstupu pravé hodnoty s min. odlišností od reálu
- Chyby
  - 1 absolutní
  - 2 relativní
- Relativní = mezi naměřenou a konečnou veličinou

$$\Delta y = y_n - y_s \quad \delta_s = \frac{y_n - y_s}{y_r}$$

### Chyby přístrojů

#### Metody zmenšování chyb přístrojů

Přesnost přístroje – schopnost udávat za stanovených podmínek pravou hodnotu

Chyby

- absolutní  $\Delta_y = y_n - y_s$

- relativní  $\delta_r = \frac{\Delta_y}{x_r}$  měřicího přístroje

$\delta_M = \frac{\Delta_y}{x_s}$  měření

Třída přesnosti – maximální relativní chyba na rozsah přístroje

$$T_p = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100$$

hodnoty se zaokrouhlují dle řady R5

## Chyby přístrojů

- a) aditivní
- b) multiplikativní
- c) kvantovací

Relativní chyba měření se skládá z multiplikativní a aditivní

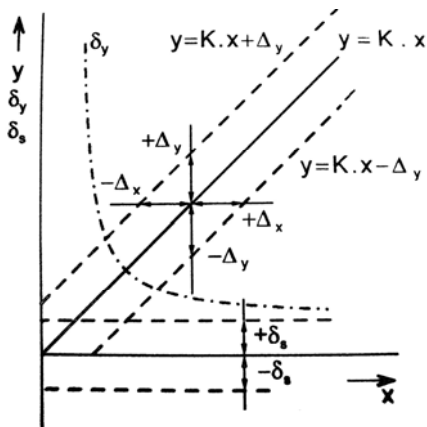
$$\delta_y = |\delta_K| + \left| \delta_S \frac{R}{M} \right|$$

## Aditivní chyba

způsobena posunem jmenovité lineární charakteristiky

u mechanických přístrojů např. tření ložisek  
tato chyba bývá dominantní – vyjádřena TP

aditivní chyba analogových přístrojů



## Multiplikativní chyba

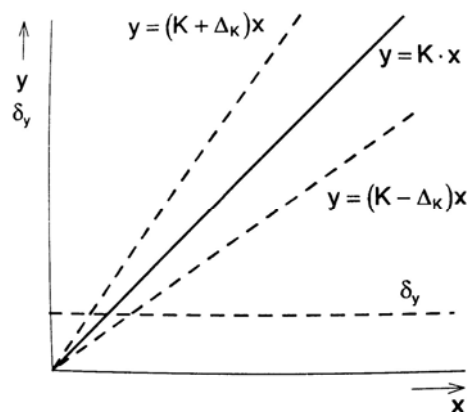
- ekvivalentní změně citlivosti senzoru

$$\Delta_y = \Delta_K \cdot x$$

chyba měření je konstantní

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{y} = \Delta_K \frac{x}{y} = \frac{\Delta_K}{K} = \delta_K = konst.$$

multiplikativní chyba



## Kvantovací chyba

- pro číselný výstup

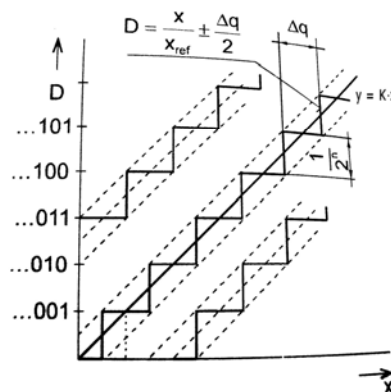
absolutní chyba  $(\Delta_y)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n} x_{\max} \cong \frac{\Delta q}{2}$

chyba se vyjadřuje v 1/2 LSB

relativní chyba

$$\delta_S = \frac{(\Delta_y)_{\max}}{x_{\max}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n}$$

kvantovací chyba



## Laplace

$$\begin{array}{c} X \\ \rightarrow \end{array} \boxed{F(s)} \begin{array}{c} \rightarrow \\ Y \end{array} \quad F(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

obrazový přenos

- vyjádření dynamických vlastností
- nereaguje okamžitě – časové prodlevy

podobně jako regulace

$$F(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

## úprava vzorce a výpočet kořenů rovnice

$$F(s) = K \frac{(1 + sT_{b_m})(1 + sT_{b_{m-1}}) \dots (1 + sT_{b_0})}{(1 + sT_{a_m})(1 + sT_{a_{m-1}}) \dots (1 + sT_{a_0})}$$

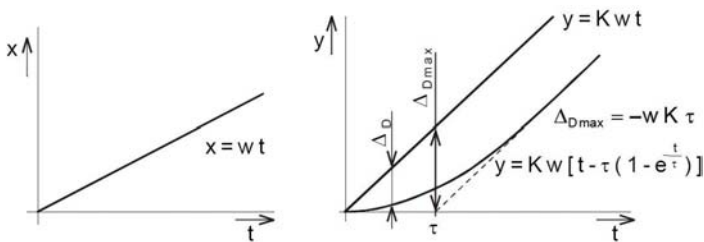
$$\frac{y}{x} = K \quad \text{statická konstanta}$$

zbylá část vzorce udává dynamické vlastnosti

chyby

$$\Delta_D = F(s)x_s Kx_s \quad \delta_D = \frac{\Delta_D}{Kx_s} = \frac{F(s)}{K} - 1$$

dynamická chyba pro přenos 1. řádu

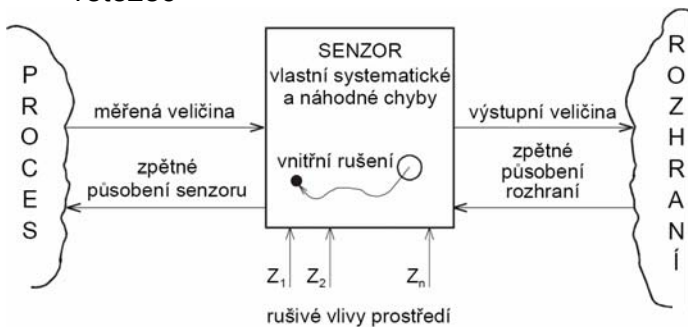


dochází-li k dopravnímu zpoždění

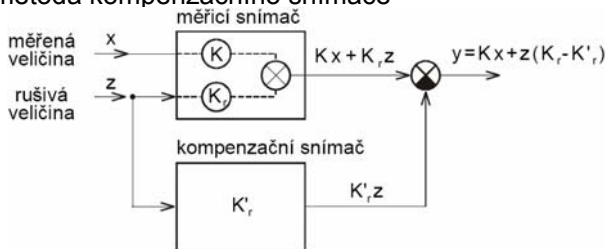
$$\Delta_D(t)_{\max} = -wK(T_D + T_1 + T_2 + \dots + T_n)$$

## Metody zmenšování chyby snímače

parazitní veličiny mají největší vliv na měřící řetězec



metoda kompenzačního snímače



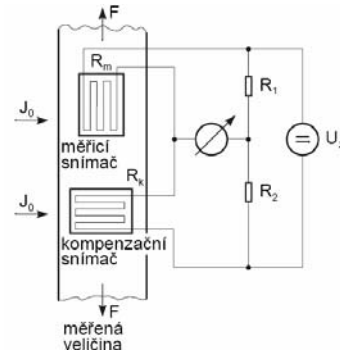
- R se mění s teplotou (parazitní vliv)

kompenzace – 2 snímače, každý v jiném směru – měří se tím závislost na teplotě

zajímá nás  $k_x$ ,  $k_x z$  je rušivá

$$\text{výstup } y = Kx + z(K_r - K'_r)$$

## konkrétní zapojení



Diferenčního snímače

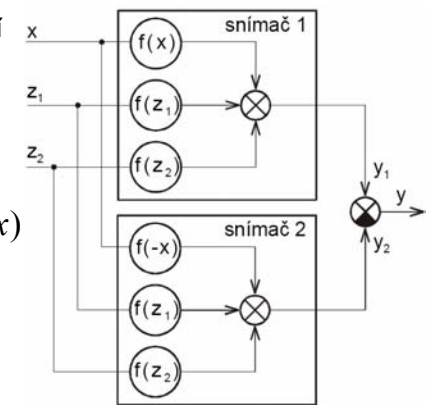
jeden směr pozitivní

druhý směr negativní (tlak – tah)

- tím měříme teplotu  $z_1$  a  $z_2$  se vyruší pokud jsou stejné snímače

$$y = 2f(x)$$

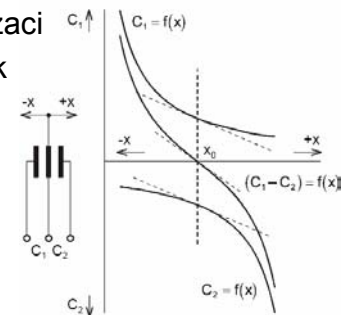
eliminujeme poruchy a zdvojnásobíme citlivost 2x



příklad použití – diferenciální kapacitní senzor

metoda slouží k linearizaci statických charakteristik

potlačuje aditivní chyby a zvyšuje citlivost



Metoda filtrace

- na výstupu se objevuje směs měřené a poruchové veličiny

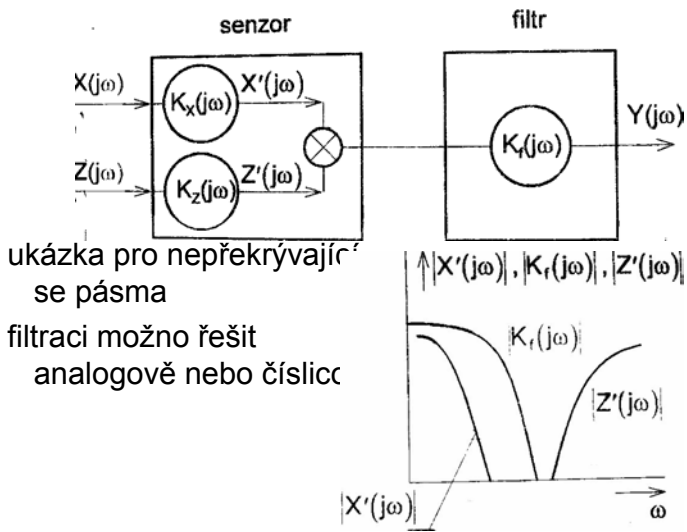
mohou nastat dva případy

- signály leží v nepřekrývajících se spektrech

- jejich spektra se překrývají

první možnost lze vyřešit např.

dolnoprostopustným filtrem (pokud je rušivá veličina vf)



ukázka pro nepřekrývající se pásma  
 filtraci možno řešit analogově nebo číslic

přenos zpětnovazebního senzoru

$$K = \frac{y}{x} = \frac{K_p K_z}{1 + K_p K_z K_k}$$

bude-li splněna podmínka  $K_p K_z \gg 1$

vyplývá 
$$K = \frac{1}{K_k}$$

pro relativní chybu pak platí

$$\delta_k = -\frac{1}{1 + K_p K_z K_k} \cong -\frac{1}{K_p K_z K_k}$$

Posun spektra

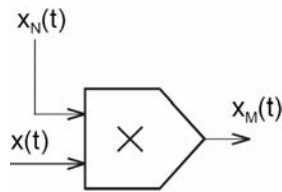
- řeší se amplitudovou modulací a demodulací

princip modulace

$$x(t) = X \sin(\omega_x \cdot t + \Omega_x)$$

$$x_R(t) = A \sin(\Omega t)$$

$$x_M(t) = \frac{1}{2} XA \cos[(\Omega - \omega_x) \cdot t - \Omega_x] - \frac{1}{2} XA \cos[(\Omega + \omega_x) \cdot t + \Omega_x]$$



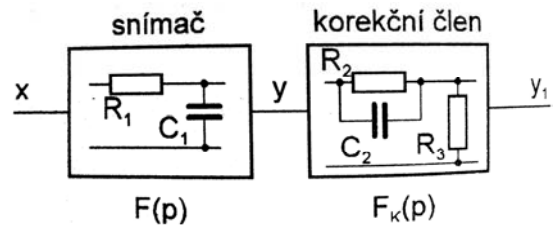
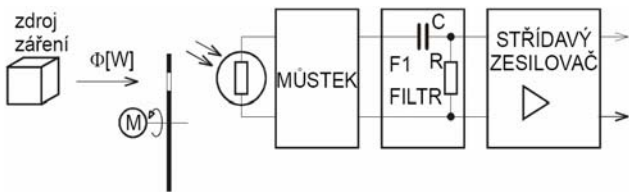
amplitudová modulace s potlačenou nosnou

Korekce měření snímače

- změna dynamických vlastností
- dnes se prakticky nepoužívá
- pasivní prvky zmenšují citlivost a časovou konstantu
- korekce dynamické chyby předpokládá stálost časové konstanty senzoru  $T_1$  v čase

příklad uspořádání pro měření záření

- rotující clonka frekvenčně moduluje signál, filtrem je posunut mimo poruchovou oblast



přenosy

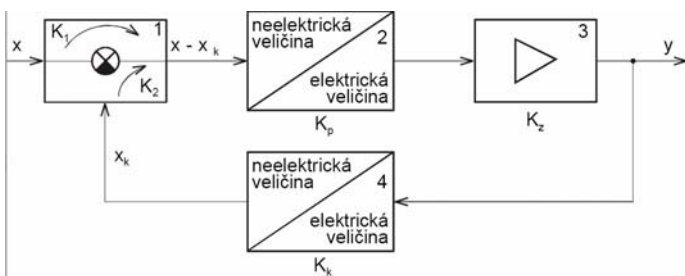
$$F(p) = \frac{1}{1 + pT_1}$$

$$F_k(p) = \frac{1 + pT_2}{1 + pT_3}$$

výsledný přenos (pro  $T_1 = T_2$ )

$$F_c(p) = F(p) \cdot F_k(p) = K \frac{1}{1 + pT_3}$$

Kompenzace zavedením ZV



předpokladem je znalost  $K_k$

Úvod do měření neelektrických veličin

Měřicí převodníky fyzikálních veličin

Měřicí řetězce

Statické a dynamické vlastnosti měřicího řetězce

Chyby měřicího řetězce

Metody zmenšení chyb snímačů



# Měření neelektrických veličin

## Historie

- první vědecký postoj měření G. Galilei
- zavedení jednotné soustavy fyzikálních veličin
- s rozvojem techniky se rozvíjí i měření – vědecký pokrok
- měření neelektrických veličin elektrickými metodami použito až po nalezení potřebných vztahů oblasti elektřiny a magnetismu
- hlavní rozvoj v pol. 20. st. spolu s rozvojem automatizace
- rozmach v koncem minulého století - nové materiály, polovodiče, miniaturizace, výpočetní technika

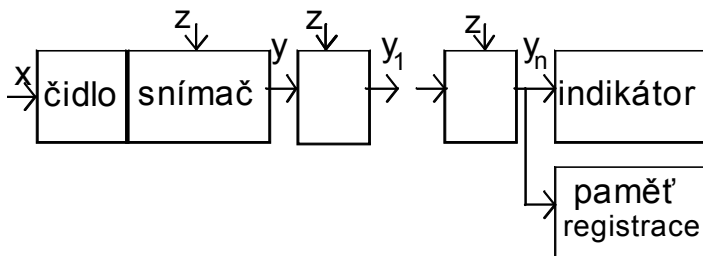
**Allometrie** = Měření neelektrických veličin elektrickými metodami

Řešení se sestává z nalezení:

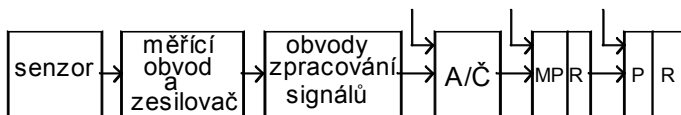
- fyzikálního charakteru děje
- popisu fyzikálně-matematickými rovnicemi
- sestavením měřícího obvodu
- určením způsobu vyhodnocení výstupního signálu

Měřicí řetězec – několik členů, zapojených spolu do měřícího obvodu

## Měřicí řetězec



Obr.1 Blokové schéma klasického měřícího řetězce



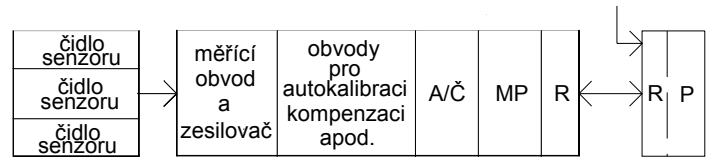
Obr 1.1 Blokové schéma měřícího řetězce se senzorem

Mezi poruchové vlivy nutno započítat i chyby vzniklé na měřící cestě a vyhodnocovacích členech

Měřicí cesta – členy pro přenos informace – vodiče  
 Vyhodnocovací členy – můstky, zesilovače, LC obvody apod.

## Inteligentní senzory (Smart Sensor)

-senzor obsahující obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu v jediném kompaktním provedení



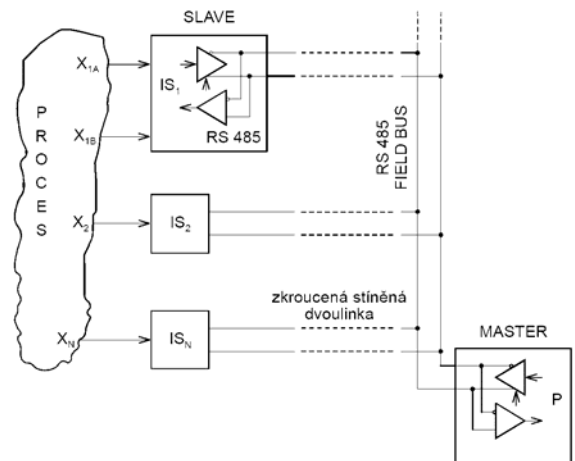
Obr. 1.2 inteligentní senzor

## Základní znaky IS:

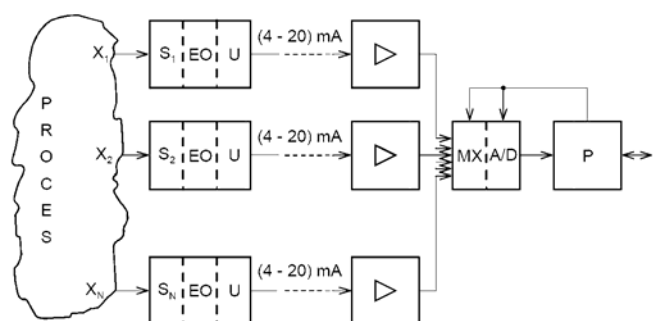
- obousměrná komunikace
- číslicová část
- diagnostika
- autokalibrace
- korekce chyb (linearizace, apod. )

Výstup - analogový  
 - číslicový  
 - kombinovaný

## Decentralizovaný měřicí systém



## Centralizovaný měřicí systém



# Části měřicího řetězce

- **Snímač** – nejdůležitější část
- nejvíce se na něm projevuje poruchová veličina
- vlastnosti vyjádřeny statickými a dynamickými vlastnostmi

## Základní **statické** parametry

- citlivost
- práh citlivosti
- dynamický rozsah
- reprodukovatelnost
- rozlišitelnost
- aditivní a multiplikativní chyba
- linearita
- parametry výstupu

## Základní **dynamické** parametry

- parametry časové odezvy
- časová konstanta
- šíře frekvenčního pásma
- frekvenční rozsah
- rychlost číslicového přenosu
- parametry šumu

## Převodní charakteristika

funkční závislost vstup - výstup

$$y=f(x) \quad \text{nebo} \quad y=f(x, z_i)$$

zapsáno polynomem

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n$$

obecná převodní charakteristika

ideální charakteristika  $y = Kx$

$K$  – citlivost (současně konstanta přenosové funkce)

Citlivost definována přírůstkem

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{df(x)}{dx}$$

Vzhledem k parazitním veličinám lépe definovat

$$K = \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{z=\text{konst.}}$$

Doplnění parametrů

**Práh citlivosti** – hodnota snímané veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadr. odchylce šumu senzoru.

Např. pro napětí

$$u_y = \sqrt{u_s^2}$$

**Dynamický rozsah** – interval snímané veličiny, dán prahem citlivosti a max. hodnotou měřené veličiny

**Reprodukovatelnost** – odchylka naměřených hodnot při krátkodobém časovém sledu měření neměnné vstupní veličiny a neměnných rušivých vlivů okolí

**Rozlišitelnost** – nejmenší změna snímané veličiny odpovídající absolut. nebo relativ. chybě senzoru při A/C převodu

-pro analogovou transformaci

$$r_a \cong 2\delta_s$$

- při převodu na číslicový signál

$$r_d \cong \frac{1}{2^n}$$

**Chyba linearity** – odchylka od ideální lineární charakteristiky

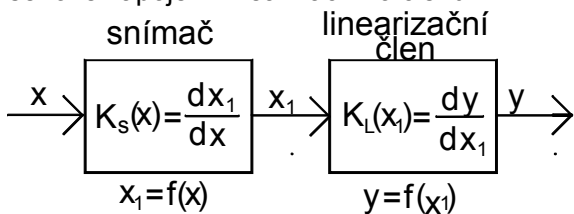
$$\delta_L = \left( \frac{y_N - y_L}{y_{\max} - y_{\min}} \right)_{\max}$$

Chyba hystereze – definována vztahy

$$\delta_S = \left( \frac{\Delta_{yH}}{y_{\max}} \right)_{\max} \quad \text{nebo} \quad \delta_s = \left( \frac{y - \bar{y}}{y_{\max}} \right)_{\max}$$

# Linearizace

sériové zapojení linearizačního členu

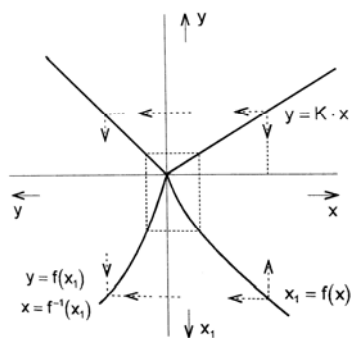


výsledná konstanta  $K = \frac{dy}{dx} = K_s(x)K_L(x_1)$

pro požadavek lineární statické charakteristiky

nutno splnit  $K_s(x)K_L(x_1) = konst$

## Grafická metoda řešení inverzní funkce



## Metoda nejmenších čtverců

výhodou je, že počítáme s kladnými i zápornými hodnotami

$$y = kx$$

## 2.

### Měření teplot a tepla. Základní principy

#### měření teploty. Teploměry založené

#### na mechanickém principu.

#### Elektrické teploměry odporové,

#### termoelektrické, polovodičové, krystalové.

#### • Teplota

- Je to termodynamická stavová veličina definovaná na základě účinnosti vratného Carnova cyklu
- Základní jednotka  $T = 1K$

$$-Pv = Rm * T$$

$$p = T * \frac{p_0}{T_0}$$

$$- 0^{\circ}C = 273,15K$$

#### ITS 90

mezinárodní stupnice  
využívá fyzikálních vlastností látek

#### Snímače teploty

teploměry –kontaktní  
piroměry –bezkontaktní

#### • Snímače

- Dotykové : v přímém kontaktu s veličinou (díltační,tlakové,el.teploměry....)
- Bezdotykové : pyrometry  
termovize,fototermometry

Dotykové – dilatační - pracují na mechanickém principu  
- roztažnost látky na změnu tepla  
- 2 materiály

#### • Základní teploměry

- Skleněná kapilára zatavená ve skleněné baňce kde je rtuť
- Velmi přesné na  $0,1^{\circ}C$
- Nevýhoda – ve vodě nutnost ponořit celý teploměr
  - špatná odečitelnost
  - kapilára oválná
  - do teploty  $39^{\circ}C$

#### • Jiná náplň

- Ethylalkohol - dá se obarvit
  - až do  $-100^{\circ}C$

#### - Nevýhody

- rozbitnost
- teplotní součinitel není stále stejný

#### • Bimetalový – jednodušší,spolehlivý u kotlů

#### • Tlakové – nádobka v ní kapalina

- mění se objem tekutiny a sní se mění tlak

#### -nevýhoda

- kapilára v jiném prostředí než měřená veličina
- mohutnější,přenos dat na jen trochu větší vzdálenosti

#### Elektrické snímače

##### 1) odporové

##### 2) termočlánky - zedekův jev

- spojeny rozdílné materiály ve spoji vzniká el.proud

##### 3) krystalové – el.Kristy mají rezonanční frekvenci závislou na teplotě

# Odporové

– Závislí na odpor materiálu a teplotě

a) kovové snímače

b) polovodičové

a) Kovové

- změna odporu s teplotou cca v přímé závislosti

T-teplota v K     $v$  – teplota ve °C

t – čas             $\tau$  - (tau)časová konstanta

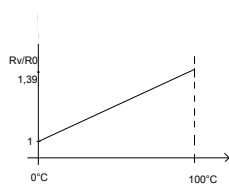
-rozsah -200°C až 850°C

$$R_v = R_0 * [1 + A v + B v^2 + C(v - 100) * v^3]$$

• Používá se platina PT 100

0°C = 100Ω

Nikl není tak přesný



• Monokrystalické

– Na dotovaném křemíku

– el.vlastnosti závislé na teplotě

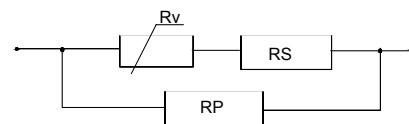
$$R v = R_{25} + K (v - 25)^2$$

# Termistory

- Pro měření NTC
  - S teplotou el.odpor klesá
  - Velmi citlivý pro nižší teploty(800-5000 K)
  - Nelineární charakteristika
- B-termitova konstanta na typ materiálu

$$R_T = R_{273,15} * e^{-B(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T})}$$

## Sérioparalelní zapojení



- Teoreticky - pro nekonečný teplo nekonečný odpor
- Pozistor - jako polohový snímač PTC
- Termistor - vedení má vlastní odpor se vzdáleností se zvětšuje
  - rj dovyvažující odpor
  - s teplotou se mění odpor vedení => chyba 2 vodičů
  - 3 vodičový přesnější
  - 4 vodičový s volnou smyčkou

## Měření teploty

termodynamická rovnice  $pV = R_m T$

plynová termometrie  $p = T \cdot \frac{p_0}{T_0}$

teplota tání ledu  $T_0 = 273,15K = 0°C$

trojný bod vody  $T_0 = 273,16K$

Fahrenheitova stupnice  $T_1(°F) = \left(\frac{9}{5}\right) \cdot T - 459,67$  pro  $T(K)$  nebo  $T_1(°F) = \left(\frac{9}{5}\right) \cdot t + 32$  pro  $t(°C)$

## ITS - 90

Mezinárodní teplotní stupnice (1990)

- definována od 0,65K do teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova radiačního zákona
- stupnice je empiricky stanovena a používá teplotní závislosti fyzikálních veličin na teplotě

$T_{90}$ (K)	$t_{90}$ (°C)	látka:	stav:
3 až 5	-270,15 až -268,15	He	a
13,8033	-259,3467	e-H <sub>2</sub>	b
17	-256,15	e-H <sub>2</sub>	a
20,3	-252,85	e-H <sub>2</sub>	a
24,5561	-248,6939	Ne	b
54,3584	-218,7916	O <sub>2</sub>	b
83,8058	-189,3442	Ar	b
234,3156	-38,8344	Hg	b
273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	b
302,9146	29,7646	Ga	c
429,7485	156,5985	In	d
505,078	231,928	Sn	d
692,677	419,527	Zn	d
933,473	660,323	Al	d
1234,93	961,78	Ag	d
1337,33	1064,18	Au	d
1357,77	1084,62	Cu	d

## Konkrétní senzory teploty

dotykové měření

- dilatační
- tlakové
- elektrické
- speciální

bezdotykové měření

- pyrometry
- termovize
- fototermometry

## Dilatační

- mechanický princip, senzory jsou založeny na principu změny objemu látek vlivem teploty
- měření teploty se převádí na měření délky, objemu nebo tlaku

## skleněné

- princip objemové roztažnosti teplotěrové látky
- přírůstek se odečítá rovnou v kapiláře, která vychází z teplotěrové nádoby

Nevýhody:

- špatná čitelnost
- přenositelnost
- nežádoucí z ekologického hlediska

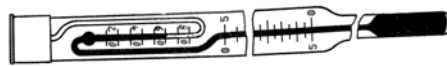
použité náplně

- pentanová (-200°C až 30°C)
- rtuť (-38°C až 350°C, je-li v kapiláře tlakový dusík 630°C)
- toluol (-90°C až 100°C)
- ethylalkohol (-110°C až 70°C)

podle konstrukce rozdělujeme teploměry na laboratorní, technické a speciální

Diferenční teploměry (Beckmannovy)

přesné měření malých teplotních změn na širokém rozsahu



Regulační teploměr Vertex

-rtuťový, stonkové provedení, slouží dvoupolohové regulaci



## Tyčové teploměry

využívají teplotní délkovou roztažnost dvou konstrukčně oddělených součástí (trubice – vnitřní tyč)

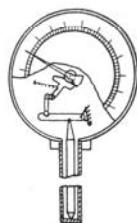
zahřátí soustavy: prodloužení trubice, volný konec tyče se v otevřeném konci trubice posune

$$\Delta L = L \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t$$

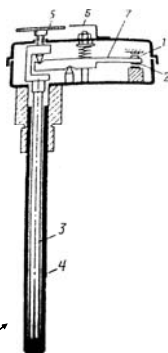
výhodou je velký teplotní rozsah, nízké pořizovací náklady, robustní konstrukce, velká přestavující síla

nevýhodou je menší přesnost

provedení tyčového dilatačního teploměru



termostat



## Bimetalové teploměry

deformace kovových pásků z rozdílných materiálů o odlišných hodnotách teplotní délkové roztažnosti

pásky po celé délce pevně spojeny

průhyb přímého pásku:

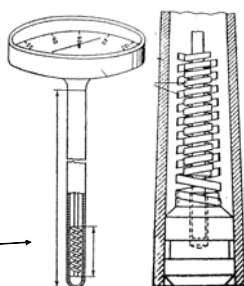
$$y = \frac{\Delta\alpha \cdot L^2 \cdot \Delta t}{b}$$

výhodou je nízké pořizovací náklady, jednoduchá údržba a obsluha, robustní konstrukce

nevýhodou je menší rozsah teplot (asi 400°C), menší přesnost, pomalá odezva

typy bimetalických pásků

provedení bimetalických teploměrů



## Tlakové snímače

skládají se z teploměrové nádoby, spojovací kapiláry, měřicího přístroje (deformační tlakoměr)

teplota vyvolá změnu objemu, změna objemu vyvolá změnu tlaku

bez kompenzace – po umístění teploměru se musí otevřít kryt ukazovatele - justáž

částečná kompenzace – mezi tlakoměrem a ukazatelem bimetalový pásek, na exponovaném místě nádobka s invariantním materiálem kompenzující změnu teploty okolí

úplná kompenzace – teploměr má dva shodné systémy

eliminuje okolní teplotu kapiláry a přístroje i vliv hydrostatického tlaku

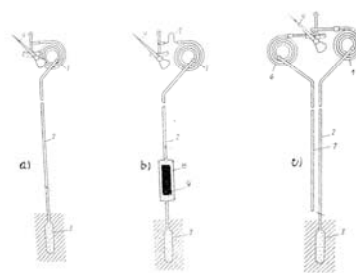
měření lze provádět i na vzdálenost do 50m

dle typu náplně – kapalinové, plynné, parní

výhodou je lineární stupnice

nevýhodou je stálý přetlak

tlakové kapalinové teploměry



## Elektrické principy

- odporové – využívají závislost elektrického odporu materiálů
- termoelektrické (termočlánky) – elektrický potenciál v místě spojení dvou materiálů
- krystalové – vlastní rezonanční frekvence závislá na teplotě

## Odporové

- kovové
- polovodičové

střední hodnota teplotního součinitele

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$

mění se dle polynommické rovnice

$$R_\vartheta = R_0 [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3]$$

platí pro rozsah -200°C až 850°C

pro teplotu 0 až 100°C postačí jen lineární část polynomu

základní materiál je platina

vyniká velkým součinitelem, časovou stálostí, vysokou teplotou tání a chemickou netečností

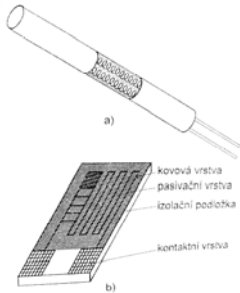
základní provedení je  $Pt_{100} \Rightarrow R = 100 \Omega$

mezi další materiály patří:

Nikl – větší teplotní součinitel než Pt  
levnější, citlivější, s menší čistotou  
větší zakřivení závislosti

$$A_{Pt} = 6,4 \cdot 10^3 K^{-1}$$

provedení platinového odporového snímače



### provedení $Pt_{100}$

- tělísko v ochranném pouzdře – chráněno proti mechanickému poškození a proti vnějšímu prostředí

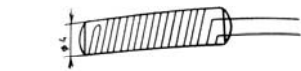
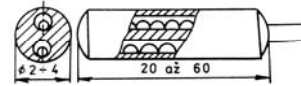
**Keramické** – drátek ve šroubovici zataven v keramické kapiláře

**Skleněné** – drátek bifilárně navinutý na skleněném válečku, povrchově zalit tenkou vrstvou skla

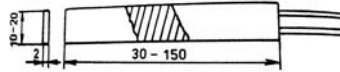
**Pertinaxové** – drátek bifilárně na ploché pertinaxové destičce, vně izolovaný papírem a lakem

měřicí odpory

- keramický



- skleněný



- pertinaxový

## Polovodičové

využívají teplotní závislost odporu

dominantní je teplotní závislost koncentrace nosičů

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

pro  $\alpha$  tedy platí:  $\alpha \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \frac{1}{T}$

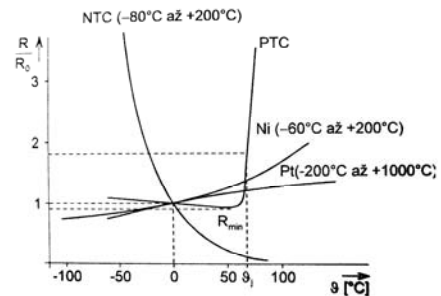
rozdělení - monokrystalické

- polykrystalické – termistory

- negastory

- pozistory

Teplotní závislosti odporových senzorů teploty



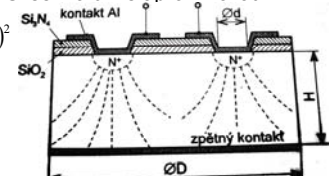
### monokrystalické

Realizovány z křemíku, germania, india a jejich slitiny; v praxi se sériově vyrábějí Si senzory pro měření od -50°C do 150°C

- nevlastní polovodič typu N, tj. s dominantní elektronovou vodivostí

- teplotní závislost Si senzoru lze aproximovat

$$R = R_r + k(\vartheta - \vartheta_r)^2$$





## termistory

negastor – záporný teplotní součinitel

výhody – malé rozměry, vyšší hodnota teplot. součinitele

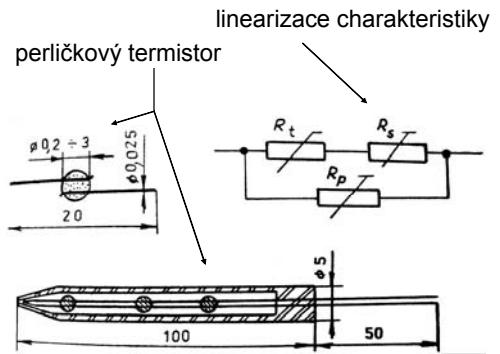
nevýhoda – značná nelinearita

vyrábějí se práškovou technologií ze směsi oxidů (např.  $Fe_2O_3 + TiO$ ), dále se slinují za vysoké teploty

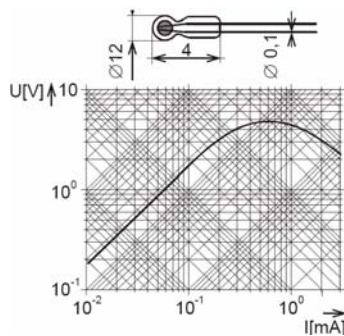
teplotní rozsah běžně  $-50$  až  $150^\circ C$ , extrémně v oblasti od  $4,2K$  až do  $1000^\circ C$

teplotní závislost

$$R_T = R_{25} e^{-\beta \left( \frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T} \right)}$$



perličkový negastor

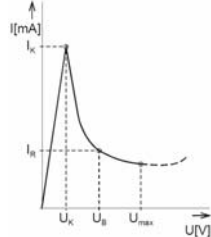


pozistor – kladný teplotní součinitel

vyrábějí se z ferroelektrické keramiky (např.  $BaTiO_3$ )

odpor nejprve mírně klesá, na curiovou teplotou prudce stoupá obvykle se používají jako dvoustavové senzory

charakteristika pozistoru



k měření teploty se používá perličkových termistorů, jelikož se nedají vyrobit se stejnými charakteristikami je nutno je jednotlivě kalibrovat

pro účel linearizace se používá sério-paralelní zapojení, termistory lze zaměňovat, charakteristika je pouze v úzkém rozpětí

## Způsoby zapojení snímače

odpor větve s měřicím odporem vyrovnán justačním rezistorem na  $16\Omega$  ( $20\Omega$ )

změnou teploty vedení se mění odpor

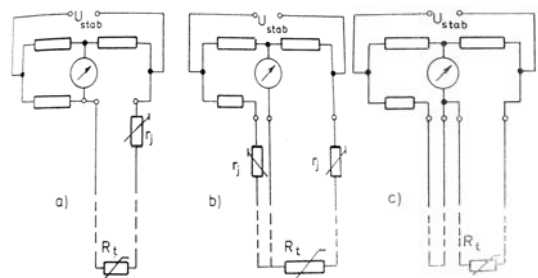
- zanáší do měření chybu

tj. dvojitě zapojení do můstku eliminace chyby

- třívodičové zapojení – vliv teploty ve dvou vedeních, které chybu vzájemně vyruší

- můstkové s volnou smyčkou – pro vzdálenost větší než  $50m$

dvojitě zapojení      třívodičové      s volnou smyčkou



## Měření nulovacím můstkem

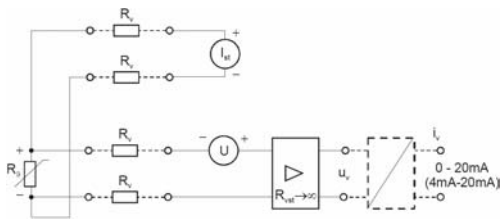
- napájecí napětí – nemusí být stabilní
- kalibrováno rovnou ve  $^\circ C$
- odpor vodičů ovlivňuje vyvážení
  - zpětné vyvážení se provádí pomocí  $R_x$
- kompenzace teploty se dosahuje obtížně
  - třívodičové zapojení nebo zapojení s volnou smyčkou

při nevyváženém můstku musí být stabilní napájecí napětí

- čtyřvodičové zapojení (kompenzační metoda) – proudové vodiče zapojeny v napájecím obvodu, napěťové v měřicím obvodu
- měří se úbytek napětí na měřicím odporu, porovnává se s úbytkem na etalonovém odporu

$$R_i = R_N \cdot \frac{U_i}{U_N} = k \cdot U_i$$

čtyřvodičový měřicí obvod se zdrojem proudu  $I_{ST}$



## Termoelektrické senzory

založeno na Seebeckovu jevu, tj. převodu tepelné energie na elektrickou

teplotní závislost termoelektrického napětí lze

$$E = \sum x_i t^i \quad (\mu V)$$

$$a \text{ určení teploty} \quad t = \sum y_j E^j \quad (^\circ C)$$

termoelektrické napětí – rozdíl potenciálů

$$U_g \cong A\theta + B\theta^2 + \dots \quad \theta = \theta_M - \theta_S$$

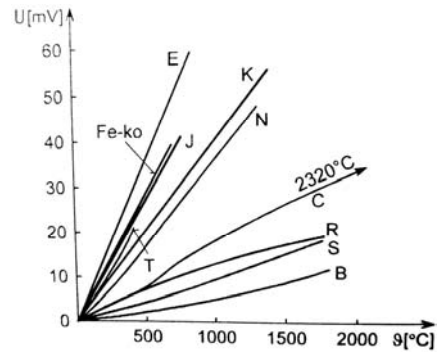
- dvojce materiálu na výrobu termoelektrických článků má vykazovat velký přírůstek termoelektrického napětí s teplotou, stabilitu údaje a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům

používají se

pro střední teploty: Fe-CuNi, Cu-CuNi, NiCr-Ni, NiCr-CuNi, NiCr-NiAl

pro vysoké: PtRh10(13)-Pt, PtRh30-PtRh6, WRe5(10)-WRe20, WRe5-WRe26

statické charakteristiky některých termoeel. článků



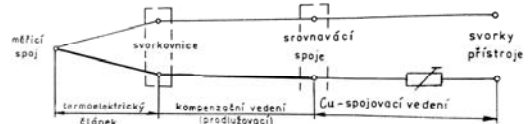
termoelektrické koeficienty - Seebeckovy koeficienty označujeme symbolem  $\alpha$

$$U = \alpha_1(\theta_1 - \theta_2) + \alpha_2(\theta_1 - \theta_2) = (\alpha_1 - \alpha_2)(\theta_1 - \theta_2) = \alpha_{12}(\theta_1 - \theta_2)$$

$\alpha_{12}$  je u vodičů řádově v jednotkách až desítkách mikrovoltů na  $^\circ C$

u polovodičů dosahuje hodnot vyšších než  $100 \mu V/^\circ C$

Zapojení termoelektrických teploměrů

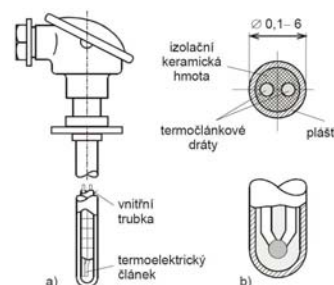


prodlužovací vedení – shodně složení jako vlastní termoelektrický článek

kompenzační vedení – pro články ze vzácných kovů

obě vedení mají shodné termoeel. vlastnosti

příklad konstrukčního uspořádání

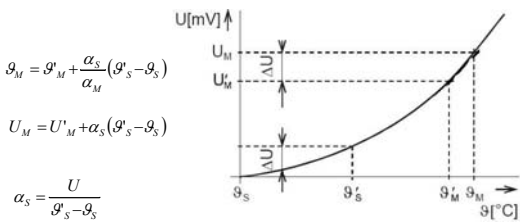


# měření termoelektrického napětí

požadavky:

- minimalizace vlivu kolísání srovnávacích teplot
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- potlačení rušivých signálů

měření při jiné teplotě vyžaduje opravu údajů teploty



$$\theta_M = \theta'_M + \frac{\alpha_s}{\alpha_M} (\theta'_s - \theta_s)$$

$$U_M = U'_M + \alpha_s (\theta'_s - \theta_s)$$

$$\alpha_s = \frac{U}{\theta'_s - \theta_s}$$

správné termoelektrické napětí

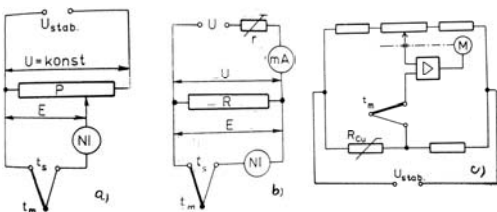
$$U = U_0 - \alpha_s \theta_s$$

vliv kolísání můžeme potlačit

- umístěním srovnávacích spojů do termostatu
- kompenzačními obvody (analogově)
- číslicovou korekcí

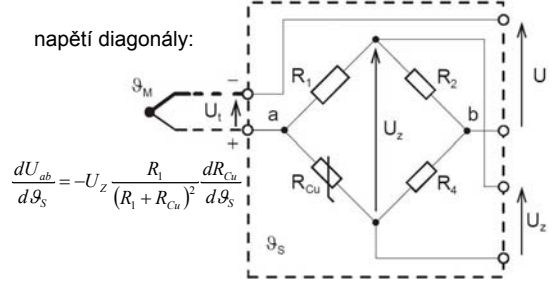
kompenzační metody měření termoele. napětí

- s konstantním proudem
- s konstantním odporem



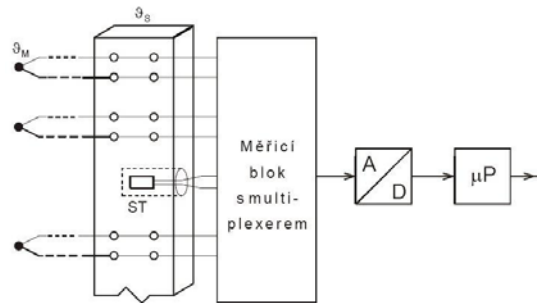
zapojení v kompenzační krabici

- odměřujeme teplotu srovnávacího konce
- zapojení v můstku, stabilizované napájení



$$\frac{dU_{ab}}{d\theta_s} = -U_z \frac{R_1}{(R_1 + R_{Cu})^2} dR_{Cu}$$

zapojení izometrické svorkovnice



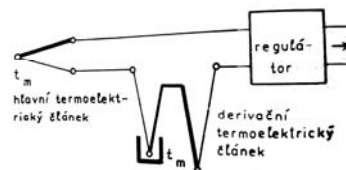
derivační termoelektrický článek

- dva termočlánky v jedné trubici
- první spoj přivařen ke dnu trubice, druhý izolován

změna teploty je rychlejší u jednoho spoje a tím vzniká rozdílný signál na výstupu podle orientace signálu poznáme zda se teplota zvyšuje nebo snižuje  
využití při regulaci

derivační termoelektrický článek

... zapojení v regulačním obvodu



## monokrystalické PN senzory

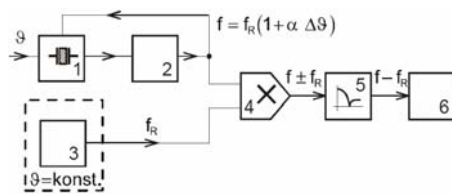
využívá se závislost napětí přechodu na teplotě

diodové – závislost  $U_D = f(I_D, T)$

tranzistorové – závislost  $U_{BE} = g(I_{BE}, T)$   
závislost přechodu báze-emitor

krystalový senzor teploty

- teplotní závislost rezonančního kmitočtu  
křemene



### 3.

## Časová konstanta dotykových teploměrů.

Měření nízkých teplot. Bezdotykové měření teploty, pyrometry. Termovize.

### Měřiče odběru tepla.

časová konstanta dotykových senzorů

- předpoklad nekonečně velké tepelné vodivosti, pak

$$S\alpha(\vartheta_m - \vartheta_t)dt = mc d\vartheta_t$$

pro skokovou změnu teploty z  $\vartheta_0$  na  $\vartheta_M$  dostaneme

$$\vartheta_t - \vartheta_0 = (\vartheta_m - \vartheta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

časová konstanta  $\tau = \frac{mc}{S\alpha}$

u reálného senzoru není  $\lambda = \infty$  a přechodová charakteristika nebude prvního řádu

pokud lze charakteristiku aproximovat přenosovou funkcí prvního řádu, lze místo  $\alpha$  dosadit součinitel prostupu tepla  $k [Wm^{-2}K^{-1}]$

### měření nízkých teplot

měření kryogenní techniky a supravodivých materiálů

Typy snímačů:

- Platinové – rozsah měření 2 až 20K

$$R(T) = R_{T_1} + AT^2 + BT^3$$

- Uhlíkové – rozsah 1 až 20K

mají negativní charakteristiku  $R = f(T)$

$$\log R + \frac{C}{\log R} = A + \frac{B}{T}$$

- Germaniové – zde záleží na dotaci polovodiče

- snímače jsou citlivé na magnetické pole

### Speciální termistory

- vhodnou volbou dotace můžeme měřit nízké teploty od 20K
- měření využívá elektronové vodivosti polovodiče

GaAs diody – lineární napětí při konstantním proudu

- málo citlivé na magnetické pole

termočlánky

CuKO-, Au-Cu, Au-chromel

- problémem je nestálost způsobená:
  - termoel. napětí je malé
  - referenční zdroj nutno stabilní
  - nehomogenita ve spoji (CuKO)

citlivé měření termoelektrického potenciálu

### kapacitní snímače

využívají teplotní závislosti

dielektrikakrystalické sklo (perovskit)  $SrTiO_2$

- magneticky stabilní
- rozsah 0,1K až 72K, do 5,2K lineární závislost

## šumové senzory

založeno na generování šumového napětí  
náhodným pohybem elektronů v odporu

$$U^2 = 4 k R \Delta f T$$

využití v oblasti velmi nízkých teplot

## indikční senzory

pro extrémně nízké teploty od 1mK až 5K  
- princip měření magnetické susceptibility  $\kappa$   
paramagnetických solí (např. dusičnan  
hořečnatý)

Kirwaisův vztah  $\kappa = \frac{C}{T - W}$

## Bezdotykové měření teploty

využívá se tepelného záření

základní dělení

- přímoměřící (pyrometry)
- zobrazovací (fotografické a termovizní)

pyrometry dělíme podle spektrální oblasti  
termovize podle rozkladu obrazu

## základní parametry senzorů záření

integrální citlivost  $K = \frac{U}{\Phi} [V \cdot W^{-1}]$

spektrální citlivost  $K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda}$

relativní spektrální citlivost  $S_\lambda = \frac{K}{K_{\lambda, \max}}$

NEP (výkonový ekvivalent)  $NEP = \Phi \frac{\sqrt{U_s}}{U} [W \cdot Hz^{-1/2}]$

detektivita  $D^* = \frac{\sqrt{S}}{NEP}$

spektrální emisivita

- zář  $E_{0\lambda}$  černého zářiče při vlnové délce  $\lambda$  a teplotě  $T$  dle Planckova zákona

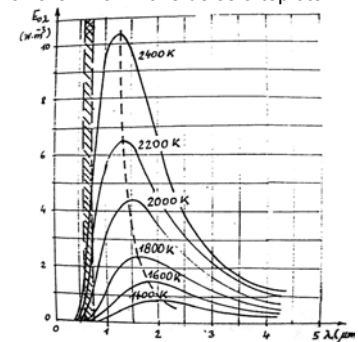
$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} [W \cdot m^{-3}]$$

$$c_1 = 3,69 \cdot 10^{-16} (Wm^2)$$

$$c_2 = 1,43 \cdot 10^{-16} (mK)$$

- měření ve viditelném spektru - vyšší teploty

závislost tepelného záření na vlnové délce a teplotě

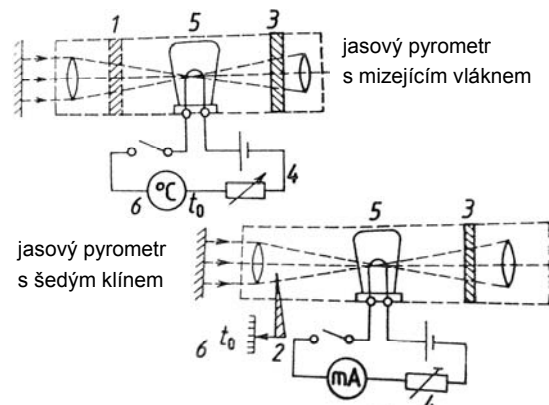


## jasové pyrometry

princip: srovnání jasu měřeného předmětu  
s jasem srovnávací (pyrometrické)  
žárovky

- měřič proudu je kalibrován ve °C
- R upravujeme tak, aby vlákno „zmizelo“ při porovnávání
- šedý klín – pevně nastaven proud, zasouváme klín pokud nezmizí

pro nečerné objekty  $\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_j} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_\lambda$

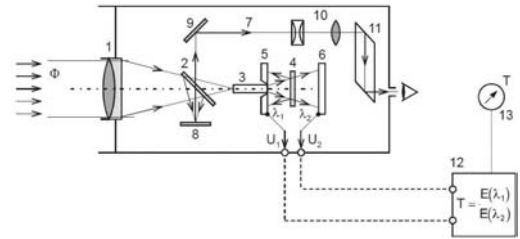


## pásmové pyrometry

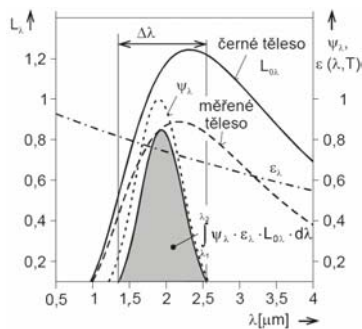
- širší spektrální pásmo než jasový pyrometr
- pásmo vymezeno optikou, filtry a citlivostí detektoru
- detektory:
  - fotonky, fotodiody, fototranzistory, fotoodpory
- výhodou je velká rychlost reakce na změnu teploty i u malých objektů

teplota nečerných zářičů  $\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda_p}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_p$

## dvoupásmový poměrový pyrometr



## spektrální charakteristiky pásmového pyrometru



## radiační (úhrnné) pyrometr

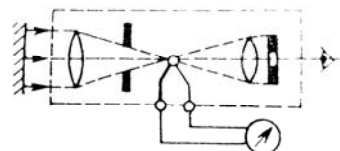
- využívají tepelného záření v celé oblasti vlnových délek
- celková energie dle Stefan-Bolzmannova zákona

$$E_0 = \sigma \cdot T_0^4 = C_0 \left( \frac{T_0}{100} \right)^4$$

- emisivita nečerných těles je značně závislá na jakosti povrchu, materiálu a teplotě

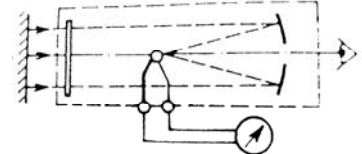
## pyrometry na spektrální rozložení

- srovnávací
  - obsahuje šedý, červený a bichromatický filtr
  - šedým srovnáme jas zářiče s jasným pyrometrickým žárovkou, červeným dosáhneme stejné barvy záření
  - vhodný pro pomalu se měnící teplotu



radiační pyrometr s čočkou

## radiační pyrometr s dutým zrcadlem



- poměrový
  - červený a zelený filtr
  - pracuje jako dva samostatné jasové pyrometry, každý filtr na jinou vlnovou délku

$$\frac{1}{T_b} = \frac{\frac{1}{\lambda_1 \cdot T_{j1}} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot T_{j2}}}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}$$

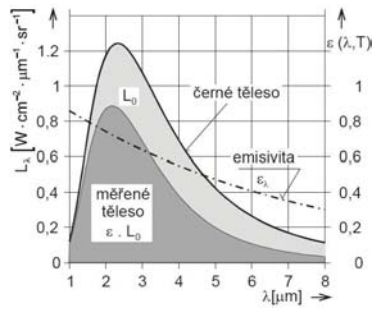
- automatický poměrový – na detektor dopadá střídavě světelný tok přes červený a zelený filtr

- korekce obtížná – používají se pro měření zářičů blízkých černým
- rozsah -40 až 5000°C
- odlišnost pyrometru od skutečné teploty

$$T_m = \frac{T_c}{\sqrt[4]{\varepsilon}}$$

- lze měřit téměř bodově, vzdálenost měření až 20m
- laser ukazuje místo měření, nutno viditelnou cestu

## spektrální charakteristiky úhruného pyrometru



## Termovize

- využívají infračerveného záření z povrchu těles
- velmi rychlé, umožňují přímé sledování změn
- snímání speciální kamerou na speciální monitor
- rozložení teplot zobrazeno termogramem
- základ – detektor infračerveného záření

- kvantové detektory
  - při dopadu infračerveného záření zvyšují elektrickou vodivost
  - selektivní, vyžadují chlazení na nízkou teplotu
  - komplikovaný a drahý systém

- Bolometrické detektory
  - dopad ič záření ohřívá detektor – mění se odpor
  - neselektivní, nevyžadují chlazení

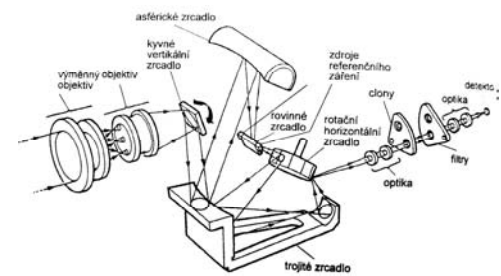
## snímací systém

- s postupným rozkladem obrazu
- výhodou je velká přesnost
- teplotní rozpětí
- kontrast termogramu

## přímozobrazující

- velkoplošné, rozložení odporu dle přijímaného záření

## princip termovizního systému fi Agema



## Měření nízkých teplot

- Platínové snímače – 2 + 20 K

$$R(T) = R_{T1} + AT^2 + BT^7$$

kde A, B, γ jsou konstanty získané měřením

- Uhlíkové snímače – 1 + 20 K

$$\log R + \frac{C}{\log R} = A + \frac{B}{T}$$

## Měření nízkých teplot

- Germaniové snímače
  - $R = f(T)$
  - Vynikající reprodukovatelnost hodnot
  - Závisí na dotovaných nečistotách
  - Značná citlivost na magnetické pole
- Speciální termistory – > 20K
  - Pro měření velmi nízkých teplot
  - Nutno dotovat nečistotami
  - Musí se vyvolat elektronová vodivost



## Měření nízkých teplot

- Galium-arsenidové senzory
  - Výhoda – Lineární závislost při konstantním proudě napětí na teplotě
- Termočlánky
  - Cu-Ko, Au-Cu, Au-chromel
  - Nevýhody
    - Časová nestálost
    - Závislost na magnetickém poli
    - Cu-Ko – časová nestálost kvůli nehomogenitě materiálu

## Měření nízkých teplot

- Kapacitní snímače – 0,1 ÷ 72K
    - Krystalické sklo (perovskit) – SrTiO<sub>2</sub>
    - Vhodné pro měření v magnetickém poli
    - Do 5,2K – lineární
  - Indukční snímače – 1mK ÷ 5K
    - S teplotou se mění magnetická susceptibilita
    - Využití paramagnetických solí
- $$\kappa = \frac{C}{T - W}$$
- C – Curiova konst.  
W – Weissova konst.

## Bezdotykové měření teplot

- Každé těleso vysílá elektromagnetické záření závislé na teplotě tělesa
- Emisivita – vyjadřuje odrazivost a propustnost tělesa
- Pro černé těleso – emisivita e=1, reálné e<1
- Pyrometry – bezdotykové senzory

## Bezdotykové měření teplot

- Spektrální pyrometry (jasové, monochromatické)
  - Měří jenom na jedné frekvenci elektromagnetického záření
- Plankův zákon
 
$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

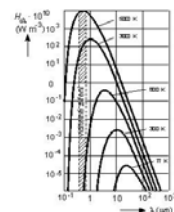
C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – Plankovy konstanty

C<sub>1</sub> = 3,69 · 10<sup>-16</sup> W · m<sup>2</sup>  
C<sub>2</sub> = 1,43 · 10<sup>-2</sup> m · K
- Porovnávání jasu měřeného tělesa s jasným tělesem, u něhož známe teplotu

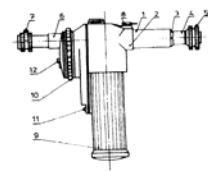
## Bezdotykové měření teplot

- Spektrální pyrometry (jasové, monochromatické)
    - Použití pro měření vyšších teplot (např. v hutích)
    - Vyjádření skutečné teploty
- $$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_{0\lambda}} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_{\lambda}$$
- T<sub>S</sub> – skutečná teplota  
T<sub>0λ</sub> – naměřená teplota

## Bezdotykové měření teplot



Vyzařování dokonale černého tělesa



Optický pyrometr

## Bezdotykové měření teplot

- Pásmové pyrometry
    - Neměří pouze na jedné vlnové délce, ale využívají úzkou šířku pásma
    - Vyjádření skutečné teploty
- $$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_P} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_p$$
- T<sub>S</sub> – skutečná teplota  
T<sub>P</sub> – teplota pásma

- Poměrové pyrometry
  - Měří na dvou různých vlnových délkách
  - Vyjádření skutečné teploty – soustava dvou rovnic

$$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_1} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_{\lambda 1}$$

$$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_2} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_{\lambda 2}$$

## Bezdotykové měření teplot

- Úhlné (radiální) pyrometry
    - Založeny na Stefan-Boltzmannově zákoně
- $$E_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{kde } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$
- Měří téměř bodově – závisí na kvalitě optiky a na vzdálenosti
  - Nejčastěji používané
  - Vyjádření skutečné teploty

$$T_S = \frac{T_0}{\sqrt[4]{\varepsilon}}$$

T<sub>S</sub> – skutečná teplota  
T<sub>0</sub> – naměřená teplota

## Bezdotykové měření teplot

- Termovize – slouží ke snímání teplotního obrazu tělesa
- Fototermometrie – místo klasického fotografického materiálu se používá materiál citlivý na infračervené světlo

## Mechanické napětí

Tenzometry

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu + \Pi_\epsilon \cdot E)$$

$\delta_R$  – relativní změna odporu

$$K = \frac{\delta_R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \Pi_\epsilon \cdot E$$

$K$  – tenzometrická konstanta

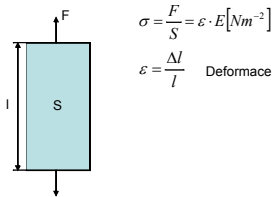
$K$  pro kov ~2

pro polovodič ~150

## Měření mechanických veličin

Mechanické napětí

## Mechanické napětí



## Mechanické napětí

Tenzometry

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

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

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l} \quad \mu - \text{Poissonova konstanta}$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \Pi_\epsilon \cdot E \frac{\Delta l}{l} \quad \Pi_\epsilon - \text{Piezorezistivní činitel}$$

4.

Měření tlaků. Piezoelektrické snímače, elektrometrické a nábojové zesilovače.

Měření vakua.

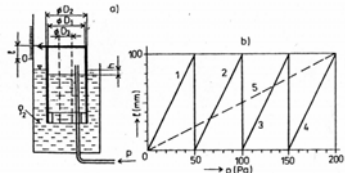
Měření tlaku

**Rozdělení tlakoměrů:**

Podle velikosti měřeného tlaku a podle použití:

- manometry – měří přetlaky
- vakuometry – měří malé absolutní tlaky
- manovakuometry – měří podtlaky i přetlaky
- tahoměry – měří malé podtlaky
- diferenční tlakoměry – měří tlakové rozdíly

**Zvonové tlakoměry**



Zvonový tlakoměr s účinkem vztlaku

a) funkční schéma

b) Statická charakteristika

$$p = [(S_2 - S_1) / S_1] \cdot L \cdot \rho_2 \cdot g = e \cdot L \quad \rho_2 \cdot g = k \cdot L$$

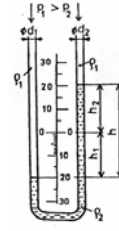


Zvonový tlakoměr provozní

a) zavěšený na váze

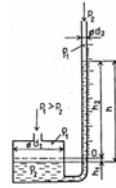
b) S pružinou

**Kapalinové tlakoměry - U-trubicové tlakoměry**

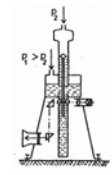


U-trubicový tlakoměr

**Nádobkové tlakoměry**



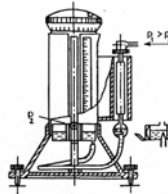
Nádobkový tlakoměr



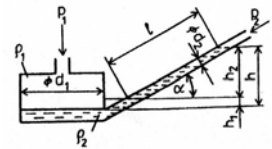
Betzův tlakoměr

$$\Delta p = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2)$$

**Mikromanometr se sklopnou trubicí**



Kompenzační tlakoměr nádobkový

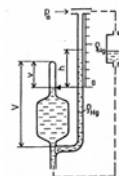


Mikromanometr se sklopnou trubicí

$$\Delta p = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2)$$

$$\Delta p = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot [(S_2 / S_1) + \sin \alpha] \cdot L$$

**Kompresní Mac Leodův vakuometr**

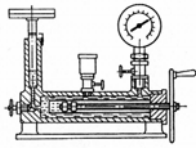


Mac Leodův kompresní vakuometr

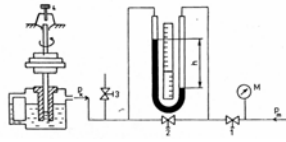
$$p_s \cdot V = v \cdot (p_s + \rho \cdot g \cdot h)$$

$$\Rightarrow p_s = [v / (V - v)] \cdot \rho \cdot g \cdot h = e \cdot \rho \cdot g \cdot h = k \cdot h$$

*Pístové tlakoměry*



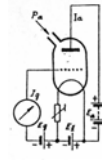
Kontrolní pístkový tlakoměr



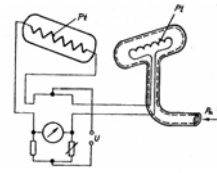
Kompenzační pístkový tlakoměr

$$p_m = (m/S) \cdot g \cdot V \cdot \rho_1 \cdot g + \rho_2 \cdot g \cdot h \cdot [(1 + \alpha \cdot t) / (1 + \beta \cdot t)]$$

**Elektrické tlakoměry - Elektrické vakuometry**

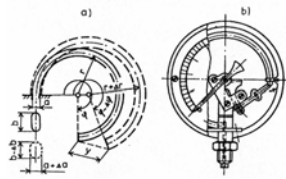


Ionizační vakuometr  
 $I_p = k \cdot I_s \cdot p_s$



Bolometrický vakuometr

**Deformační tlakoměry - Trubicové tlakoměry**



Trubicový tlakoměr  
a) deformace trubice  
b) Uspořádání přístroje

$$y = [(r \cdot S) / a] \cdot p \cdot \sqrt{1 + \varphi^2} = k \cdot p$$

*Odporový tlakoměr*

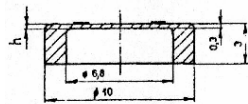


Odporový tlakoměr

*Membránové tlakoměry*

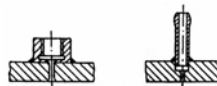


Membránový tlakoměr

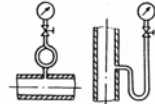


Křemíková membrána - hrníčková

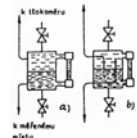
**Zabudování tlakoměrů**



Odběry statického tlaku



Kondenzační smyčky

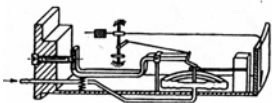


Oddělovací nádoby s oddělovací kapalinou



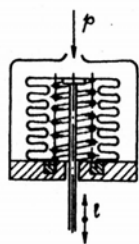
Oddělovací membrána

*Krabicové tlakoměry*

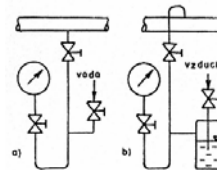


Krabicový tlakoměr

*Vlnovcové tlakoměry*



Vlnovcový tlakoměr



Oddělovací tekutina  
a) voda; b) vzduch

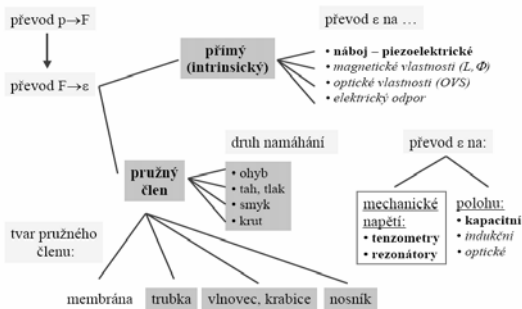
## Měření tlaku

- Osnova
  - Pár řádek úvodem
  - Principy senzorů
  - Snímače použití
  - Rozdělení snímačů
  - Absolutní a diferenční snímač
  - Tenzometry

## Tlak

- Patří k základním měřeným veličinám
- Lze měřit tlak plynu a kapalin
- Mechanické tlaky (zátěžové)
  - tenzometry
- Definice tlaku  $P = dF/dS$  [Pa, N, m<sup>2</sup>]

## Základní principy senzorů tlaku



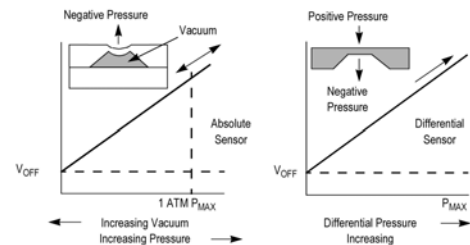
## Snímače tlaku se používají

- V chemickém průmyslu
- potravinářském průmyslu
- farmaceutickém průmyslu
- strojírenském průmyslu
- a v mnoha dalších odvětví

## Rozdělení senzorů tlaku

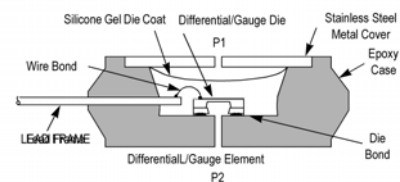
- Senzory absolutního tlaku
- Diferenční senzory tlaku
- Manometrické senzory tlaku

## Absolutní a diferenční snímač



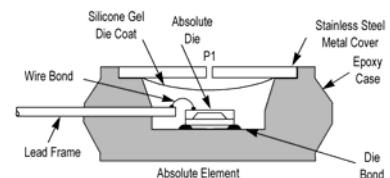
## Senzor absolutního tlaku

- Měří přímo externí tlak
- Měří tlak kapalin nebo plynů
- Porovnává s tlakem vakua uvnitř senzoru



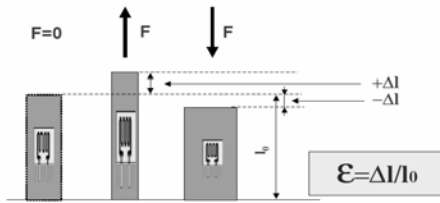
## Diferenční senzor tlaku

- Měří rozdíl tlaků mezi 2 vstupy

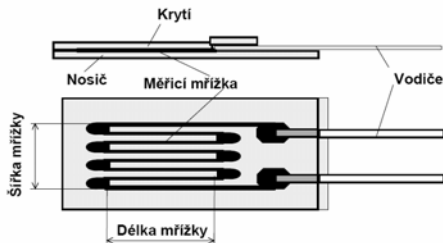


## Tenzometry

**Princip:** Vlivem zatížení materiálu se tento deformuje. Deformace se projevují i na povrchu materiálu. Tato změna se přenáší na tenzometr, který takto mění svůj odpor, jež je lineárně úměrné prodloužení na povrchu materiálu.



## Schema foliového tenzometru



## Tlakoměrné přístroje

Podle jejich použití je dělíme na:

- manometry - přístroje pro měření přetlaků
- barometry - přístroje pro měření tlaku barometrického
- vakuometry - přístroje pro měření podtlaků (pro malé podtlaky jsou totz. tahoměry)
- mano-vakuometry - přístroje pro měření podtlaků i přetlaků

## Použití tenzometrů

### ● Napěťová analýza

- zbytkové pnutí
- napětí způsobené externím zatížením
- napětí způsobené vlivem teploty
- monitoring procesů
- kontrolní měření

## Měření tlaků kapalin

- U tekutin se využívá hydrostatický tlak, který je úměrný výšce hladiny

$$p = g \cdot \rho \cdot h \text{ [Pa]}$$

kde  $p$  je hydrostatický tlak (Pa),  $\rho$  je hustota kapaliny (kg.m<sup>-3</sup>),

$g$  je tíhové zrychlení (m.s<sup>-2</sup>),  $h$  je výška hladiny od měřeného místa (m)

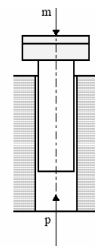
Podle principu měření je dělíme na přístroje:

- pístové
- kapalinové
- deformační
- elektrické



## Pístové manometry

- Tyto přístroje pracují na principu přivedení tlaku na jednu stranu pístu a vykompenzování tohoto tlaku na straně druhé vnější silou. Tato síla je vyvozena závažím nebo pružinou (obr.5.2), takže pro rovnovážný stav platí



## Kapalinové tlakoměry

- Tyto přístroje mají různé konstrukční provedení, ale většinou využívají stejného principu a spojuje je základní definiční rovnice.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = g \cdot \rho \cdot h$$

- kde  $\Delta p$  je tlaková diference,  $p_1$  vyšší a  $p_2$  nižší z obou srovnávaných tlaků,  $\rho$  je hustota tlakoměrné kapaliny,  $g$  tíhové zrychlení,  $h$  rozdíl výšek hladin.

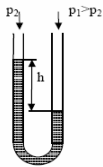
- Tlakoměrnou kapalinou bývá voda, rtuť, líh, tetrachlór a jiné.

## Kapalinové tlakoměry

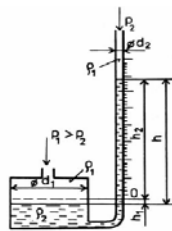
Ize rozdělit podle principu a provedení na manometry, barometry a vakuometry.

př. manometrů:

- U manometr - má tvar písmene *U* a výhodou je, že se dá řadit do série
- nádobkový manometr
- mikromanometr se sklonným ramenem



Obr. 5.4 Princip U manometru



Obr. 5.5 nádobkový manometr

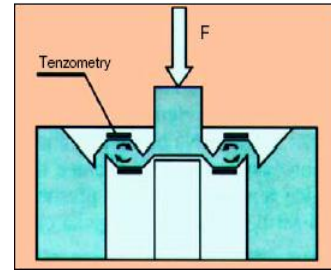
## Tenzometry

- Tenzometry se vyrábějí ve dvou základních provedeních, a to kovovém a polovodičovém (křemíkovém).
- Tyto dva typy nelze vzájemně porovnávat, protože každý z nich má své optimální využití, které odpovídá jeho metrologickým a technickým vlastnostem.

### Princip měření:

- Kovové i polovodičové tenzometry napájené stejnosměrným nebo střídavým proudem mění ohmický odpor, jsou-li vystaveny mechanické deformaci působené měřenou veličinou. U kovových tenzometrů je změna ohmického odporu způsobena změnou průřezu drátku (folie) měřicí mřížky a její délky, u polovodičových tenzometrů ve tvaru tyčinky je způsobena především změnou jejího měrného odporu – což je primární projev piezorezistentního jevu.

## Princip snímače zatížení



## Použití tenzometrů

- **Polovodičové** jsou téměř výhradně používány v senzorech mechanických veličin.
- **Kovové** jsou často využívány k měření povrchových deformací kriticky namáhaných součástí i pro měření rozsáhlých deformačních polí složitě namáhaných mechanických konstrukcí

Zdroje:

[www.automatizace.cz](http://www.automatizace.cz)

<http://www.quido.cz/mereni/tlak.htm>

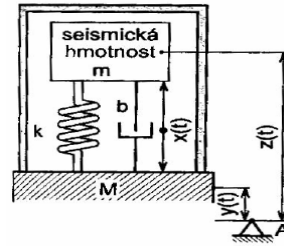
# 5.

Měření veličin v mechanice tuhých a poddajných těles.

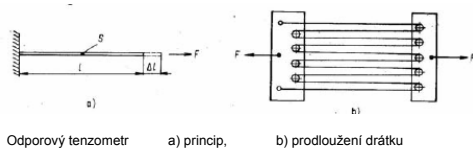
Měření deformací, tenzometry.

Měření sil a točivého momentu, dynamometry.

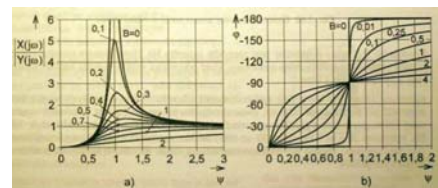
## Akcelerometry



## Snímače mechanického kmitání tenzometry

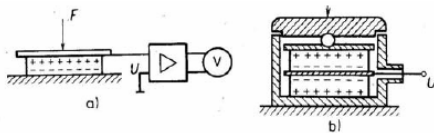


Odporový tenzometr a) princip, b) prodloužení drátku



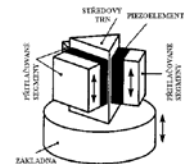
Amplitudová a fázová charakteristika (B poměrně)

## Piezelektrické tenzometry



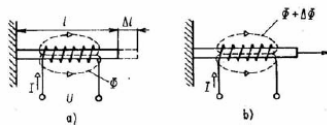
Piezelektrické tenzometry, provedení a) princip, b) příklad

## Piezelektrické akcelerometry

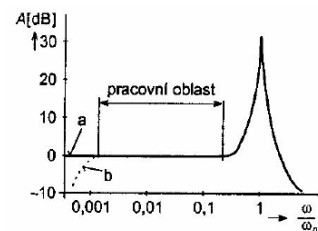


Piezelektrický akcelerometr se smykovým namáháním

## Tenzometry - magnetické



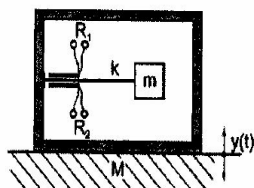
Magnetické tenzometry, a) princip magnetostricce, b) princip magnetoelasticity



Frekvenční charakteristika piezoakcelerometru

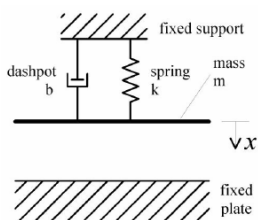


# Tenzometrické akcelerometry



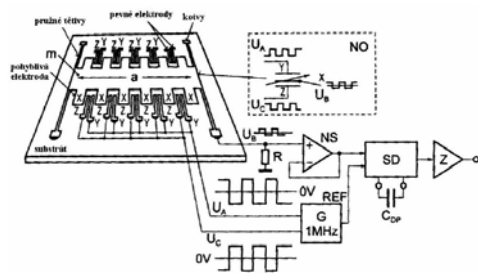
- Součásti**
- vetknutý nosník (k)
  - seismická hmota (m)
- Snímací prvky v místě deformace (vetnutí) nosníku (obvykle odporové – R1, R2)

# Kapacitní akcelerometry



Model deskového kondenzátoru s jednou pohyblivou elektrodou

# Integrovaná akcelerometr

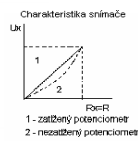
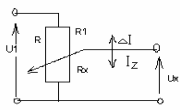


# 6.

## Měření přímé a úhlové polohy, rychlosti, zrychlení.

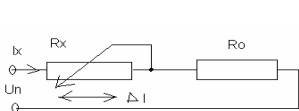
### Snímače polohy

#### Odporové snímače polohy - napětový



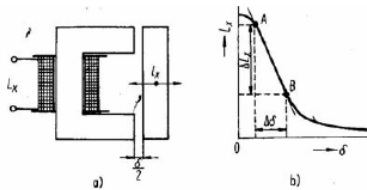
Rx – změna odporu způsobená změnou polohy  $\Delta 1$   
 $I_z = 0$  – nezátěžný potenciometr  
 $I_z > 0$  – zátěžný potenciometr

#### Odporové snímače polohy - proudový



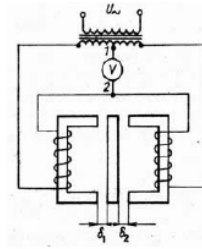
Rx – změna odporu způsobená změnou polohy  $\Delta 1$   
 $R_0$  – nastavovací odpor  
 $U_n$  – napájecí napětí  
 $I_{max} = U_n/R_0$

#### Indukčnostní snímače polohy s uzavřeným magnetickým obvodem



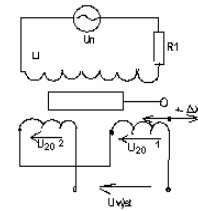
Indukční snímač s uzavřeným magnetickým obvodem

#### Diferenciální indukčnostní snímač polohy

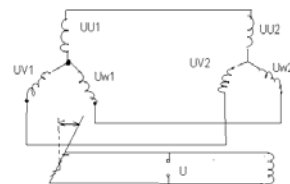


Diferenciální indukční snímač s uzavřeným magnetickým obvodem

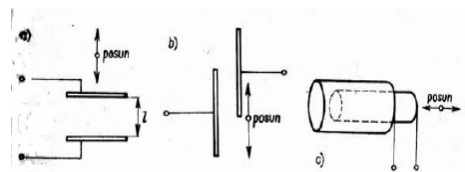
#### Transformátorový snímač polohy



#### Selsyny



#### Kapacitní snímače polohy



#### Druhy kondenzátorů

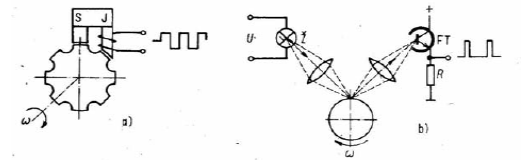
- a) rovinný kondenzátor s proměnnou vzdáleností elektrod
- b) rovinný kondenzátor s proměnnou záběrovou plochou
- c) válcový kondenzátor s zásvuným vnitřním válcem

Kapacitní snímače polohy



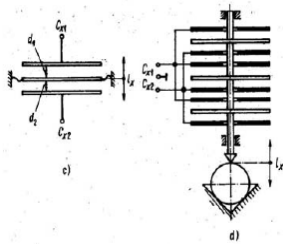
- a) průběh změny kapacity
- b) jednoduchý kapacitní snímač

Snímače otáček



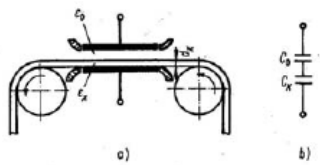
- Impulsové snímače otáček
- a) Indukční impulsový snímač
- b) Fotoelektrický impulsový snímač

Kapacitní snímače polohy



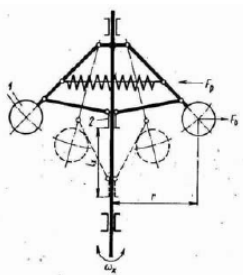
- c) diferenciální kapacitní snímač
- d) vícenásobný diferenciální kapacitní snímač

Kapacitní snímače polohy



Obr. 21: Kapacitní snímače se změnou dielektrika

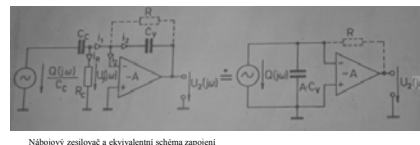
Kapacitní snímače polohy



Princip odstředivého snímače otáček

7.

Odporové, indukčnostní a kapacitní snímače. Měření otáček, stroboskopy, indukční a optoelektrické snímače.



Nábojový zesilovač a ekvivalentní schéma zapojení

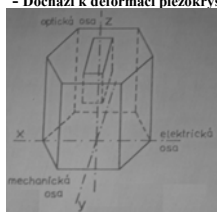
**Nábojový:**

- Více používanější, nezávisí tolik na celkové kapacitě  $C_c$ , při velkém zesílení  $A$  můžeme  $C_c$  zanedbat. Závisí jen na kapacitě  $C_v$  ve zpětné vazbě zesilovače.

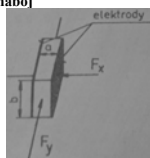
$$U_2(j\omega) = \frac{A}{C_c + (A+1) \cdot C_v} \cdot Q(j\omega)$$

### Piezoelektrické snímače tlaku:

- Dochází k deformaci piezokrystalu a vzniká náboj



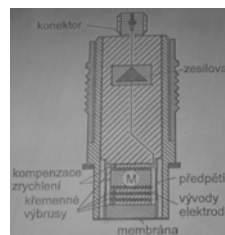
\* Krystal křemene a jeho výbrus



$$Q = d \cdot F_x; Q = d \cdot F_y \cdot (b/a)$$

$$(d_{SiO_2} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ C/N})$$

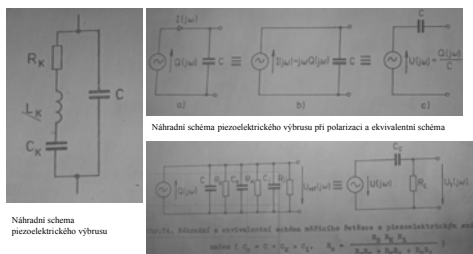
- Při působení ve směru osy mechanické => příčný piez. Jev
- Při působení ve směru osy elektrické => podélný piez. Jev



Piezoelektrický senzor tlaku s kompenzačním akcelerometrem

- Další příklad piezoelektrického snímače, ale již s integrovaným zesilovačem

- Používá se pro měření dynamických tlaků (např.: indikace tlaku ve spalovacích motorech)
- využívá tělíska pro kompenzaci zrychlení, kompenzuje případné vibrace a chvění



Náhradní schéma piezoelektrického výbrusu

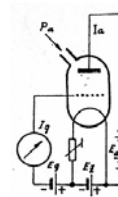
Obr. 74.  $C_k$  a  $R_k$  - zvodová kapacita a odpor kabelu,  $R_l$  a  $C_l$  - odpor a kapacita měřiče;  $R_c$  a  $C_c$  - celk. odpor a kapacita

- napětí se vybíjí přes  $R_c$ , chceme aby čas. konstanta co největší, aby v počátku co nejmenší strmost => signál se udržel co nejdelší
- Proto se tyto snímače používají pro měření statického tlaku, nevhodné pro měření dynamických tlaků

### Vakuometry:

- používají se pro snímání malých tlaků

**Ionizační vakuometr:**

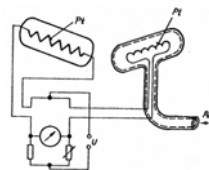


- základem je skleněná baňka bez vzduchu, v ní tróda => pracuje na principu elektronky
- Měřením mřížkového proudu  $I_g$  lze měřit malé tlaky (záleží kolik je vzduch v baňce)
- Možnost měřit tlaky v rozsahu  $p = (10^{-8} \text{ až } 10^2) \text{ Pa}$

$$I_g = k \cdot I_a \cdot p$$

$k$ ...konstanta, dána konstrukcí  
 $I_a$ ... Anodový proud

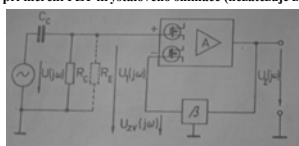
**Bolometrický vakuometr:**



Lze měřit tlaky v rozsahu:  
 $p = (10^{-4} \text{ až } 10^2) \text{ Pa}$

### Elektrometrický a nábojový zesilovač:

- využ., při měření PZT krystalového snímače (nezatěžuje zdroj náboje)



Blockové schéma elektrometrického zesilovače

**Elektrometrický:**

- velký vstupní odpor => proto na vstupu unipolární tranzistor
- Nevýhoda: výstup. napětí je i závislé na celk. kapacitě  $C_c$  a to zejména na kapacitě kabelu, která se může měnit

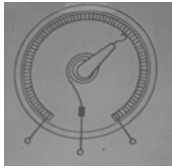
$$U_2(j\omega) = \frac{1}{C_c} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot Q(j\omega)$$

- 2 trubice: jedna se zatavený platinovým vláknem (referenční), druhá trubice také s platinovým vláknem, ale otevřená.
- Vláknem druhé trubice je napětím  $U$  zhaveno, prouděním vzduchu je toto vlákno ochlazováno => Místek vyhodnocuje s referenční trubicí

## Odporové snímače dráhy a polohy:

- jejich hlavní součástí je potenciometr, jehož běžec posouvající se po odporové dráze je mechanicky spojen s předmětem, jehož polohu snímáme
- vlastnosti potenciometru jsou dány: třídou přesnosti, rozlišovací schopností, linearity, životností, teplotním koeficientem odporu, šumem

Odporový vysílač s kruhovou dráhou:



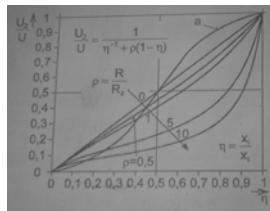
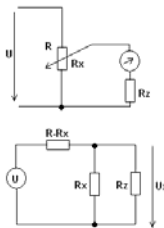
Odporový vysílač s kruhovou dráhou

a) Reostatové zapojení:

- Využívá jen dva vývody, jezdec a 1 koncový => měří odpor mezi nimi
- Nevýhoda: dráha může být znekalitněna => přechodový odpor ovlivní přesnost

b) Potenciometrické zapojení:

- Využívá oba konce dráhy a jezdec, měří napětí mezi oběma konci a
- Napětí mezi jezdcem a jedním koncem
- Pokud není odpor měřiče  $R_z$  v poměru odporu  $R$  velký => nenarůstá závislost lineárně ( $R = R_z$  převodní char. je přímka  $y = x$ )

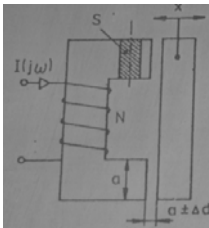


Převodní charakteristika odporového senzoru

## Indukčnostní snímače polohy:

- měřicí veličina je závislá na indukčnosti, nejsou to indukční snímače (využívají Faradayův zákon)

Indukční snímač s proměnnou mezerou:

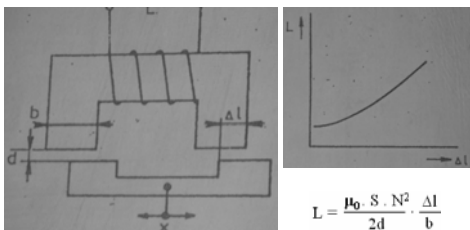


- přiloha mění polohu vzhledem k vlastnímu jádru
- Indukčnost nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti přilohy

$$L = \frac{N^2}{2d} \cdot \mu_0 \cdot S$$

- Vhodné pro měření malých pohybů a vzdáleností
- Nevýhoda: Závislost indukčnosti na délce vzduchové mezery je hyperbolická

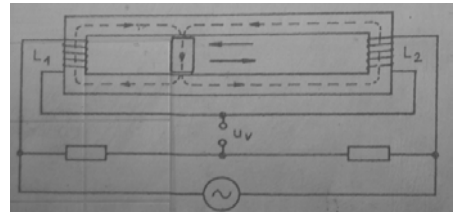
Indukční snímač s proměnnou plochou:



$$L = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot N^2}{2d} \cdot \frac{\Delta l}{b}$$

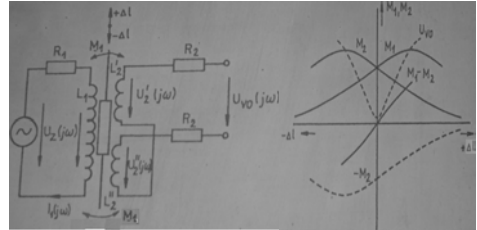
- vzdálenost zůstává stejná, ale mění se velikost překrývající se plochy
- nevýhoda: V blízkosti nějakého feromag. Materiálu se může ovlivnit měření

Indukční snímač s posuvným magnetickým "zkratem":



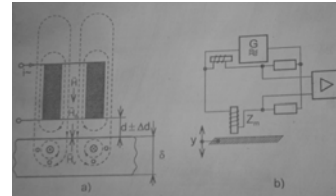
- Pohybující se bočník „zkratovává“ magnet => mění se  $L_1$  a  $L_2$  => tím se mění výchylka můstku => schopni měřit polohu
- ( $U_v = 0$  => můstek vyvážen a výchylka rovna nule)

Transformátorový snímač:



- Vyhodnocuje změny vzájemné indukčnosti. Jedno vinutí je napájeno střídavým napětím, ve druhém vinutí se vlivem změny mag. odporu a tím i toku a vlastní indukčnosti mění indukované napětí. Magnetická vazba mezi primárním a sekundárním vinutím je závislá na poloze jádra spojeného se snímanou součástí.

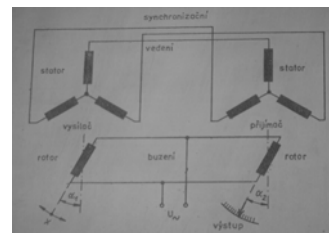
Indukční senzor s vířivými proudy:



Indukční senzory s vířivými proudy  
a) princip b) měřicí obvod

- Vířivé proudy => vznikají v magnetických obvodech => jádrem prochází mag. tok => v prostoru se rozkládá mag. Pole => elektrické pole sezkratuje
- Používá při vysokých frekvencích (velké vířivé proudy)
- Vhodné i pro měření větších vzdáleností

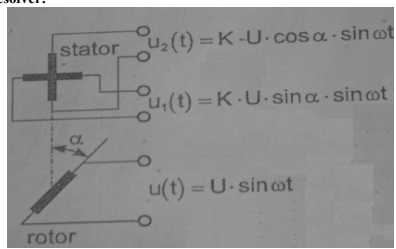
Selsyn:



Spojování selsyn vysílač – selsyn přijímač

- skládá se z trojfázového statoru s vinutím o 120° a jednofázového rotoru s vyvedenými vinutím
- Je použito dvou selsynů (přijímače a vysílače), dálkově přenášená výchylka z vysílacího místa na indikátor => změna pohybu rotoru vysílače se projeví i v u rotoru přijímače.
- Vhodné i pro větší vzdálenosti

Resolver:

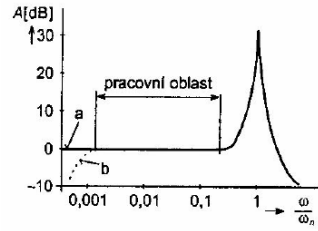


-Skládá se z dvoufázového statoru s vinutím o  $90^\circ$  a jednofázového rotoru s vyvedeným vinutím. Fázový posuv výstupního napětí resolveru je roven úhlu natočení pohyblivého vinutí rotoru.

- Využívá například k určení polohy různých servomechanizmů

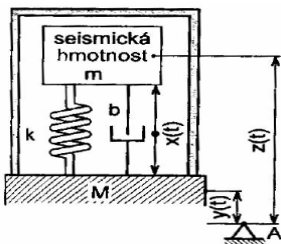
8.

# Měření mechanického kmitání, absolutní a relativní snímače kmitání.

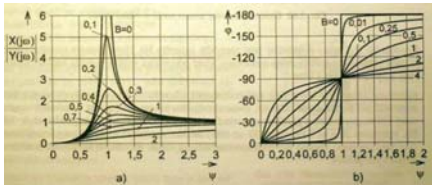
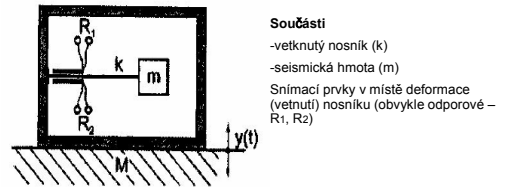


Frekvenční charakteristika piezoakcelerometru

## Akcelerometry

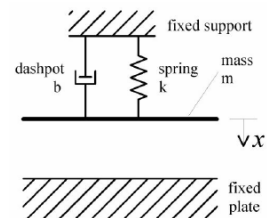


## Tenzometrické akcelerometry



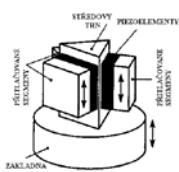
Amplitudová a fázová charakteristika (B poměrné)

## Kapacitní akcelerometry



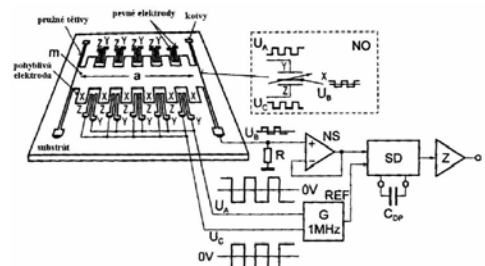
Model deskového kondenzátoru s jednou pohyblivou elektrodou

## Piezelektrické akcelerometry



Piezelektrický akcelerometr se smykovým namáháním

## Integrovaný akcelerometr

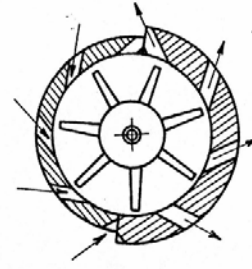


9.

Měření veličin v mechanice tekutin.

Měření rychlosti a průtoku.

## Lopátkový vodoměr



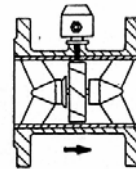
$Q = kv$

### Plováčkové průtokoměry (rotametry)

- Princip: Do potrubí je vložen plováčkový průtokoměr
- Podle vychýlení plováku lze poté určit velikost průtoku
- Plovák při průtoku tekutiny rotuje což eliminuje působení vnějších vlivů

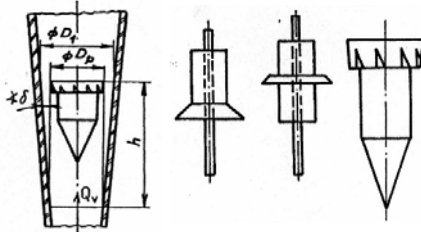
### Turbínkové průtokoměry

- Jsou založeny na stejném principu jako průtokoměry Lopátkové jen s tím rozdílem že namísto Lopatek je zde turbínka s listy.



Řez turbínkovým průtokoměrem

### plováčkový průtokoměr



Princip činnosti plováčkového průtokoměru

Tvary plováčků pro různé tekutiny

### Šroubový vodoměr

- Pracují na podobném principu jako Turbínkové jen s rozdílem Šroub na místo turbínky.
- Nejsou vhodné pro malé průtoky!!

### Lopátkové vodoměry

- Měří střední rychlost průtoku
- Jsou založeny na mechanickém principu
- Protékající kapalina roztáčí lopatky průtokoměru.

### Miskové Anemometry

- Jedná se o rotor umístěný na ose jenž je roztáčen 3-mi až 4-mi polokoulemi.
- Výstupem proudoměru je rychlost jeho otáčení
- Jsou k dispozici jak ve formě Mechanického tak i digitálního přístroje



## Deformační senzor průtoku

- Funguje na principu silové deformace.
- Do proudu je instalovaná překážka jež se vychyluje působením proudu
- Toto poté deformuje navazující mechanismus
- Čím větší deformace tím silnější proud

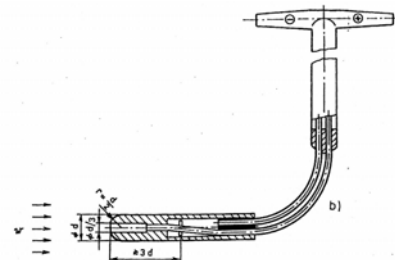
## Měření rychlosti proudění

- Prandlovy sondy:
- Jedná se o stejný princip jako u Pitotovy trubice
- Velikou výhodou této metody je její mobilita a malé rozměry sondy.

## Měření $Q_v$ pomocí škrtících orgánů

- Clony a Dýzy
- Fungují na základě rozdílných tlaků před clonou a za ní
- K měření tlaku se užívají Diferenční měřiče tlaku

## Prandlova sonda



## Měření rychlosti proudění

- Pitotova Trubice:
- Porovnává 2 rozdílné tlaky: - Statický  $P_s$   
- Celkový  $P_c$

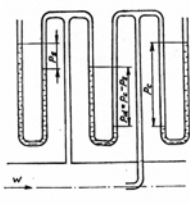
Tyto 2 tlaky jsou připojeny na diferenciální tlakoměr

Zde je z rozdílu dvou tlaků vyhodnocena rychlost proudění kapaliny

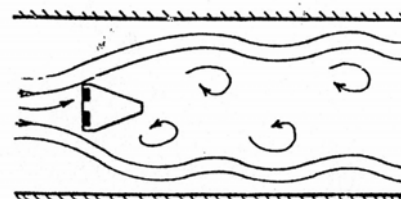
## Vírové senzory

- Jsou založeny na tvorbě vírů za překážkou jež překážku rozkmitají.
- Z tohoto kmitočtu se poté vypočte rychlost proudění
- Spjata rychlost proudění a  $f$  překážky
- Průmyslová výroba s velikou přesností

## Pitotova trubice



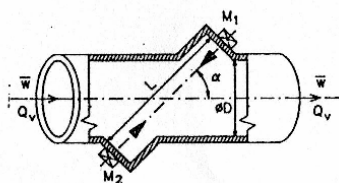
## Vírové sondy



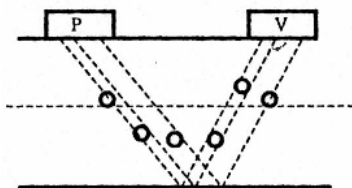
## Ultrazvukové senzory

- Senzor obsahuje 2 snímače a 2 vysílače ultrazvuku. Měří se časová prodleva s kterou se vyslaný signál dostane z jedné strany potrubí na druhou. Velikost proudění má totiž přímý vliv na tuto odchylku

## Ultrazvukové sondy – „leading-edge detection“



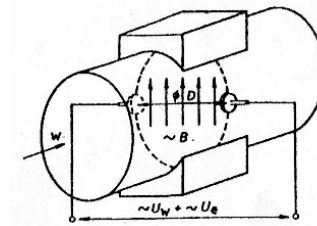
## Ultrazvukové sondy – dopplerův princip



## Indukční průtokoměry

- Jsou založeny na principu magnetické indukce.
- Kanál jímž proudí tekutina musí být nevodivý!!
- Velikost indukovaného napětí  $u = B \cdot D \cdot w$

## Indukční průtokoměry



## Korelační měření rychlosti proudění

- LDA a PIV---Laserové metody
- LDA:-Používá optických sond jenž vzniká při střetu 2 laserových paprsků.
- Pokud sondou prochází proud tekutiny pak bude odražen světlo, díky mřížkové struktuře se poté vyhodnotí frekvence odražení.
- Z této frekvence se zpětně určí rychlost proudění tekutiny.

## Korelační měření rychlosti proudění

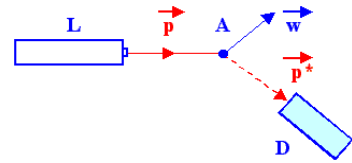
- PIV: - Tato metoda využívá výkonových impulsních laserů, jenž osvětlují určitou plochu.
- K určení rychlosti proudění tekutiny je zapotřebí 2 posobě jdoucích záblesků s co nejmenší časovou prodlevou.
- Dále je zapotřebí digitální kamery se schopností sejmut alespoň 2 posobě jdoucí záblesky v co nejkratším čase.
- Co nejkratší čas uzavěrky!!!!

10.

Anemometrické snímače mechanické  
a elektrické.

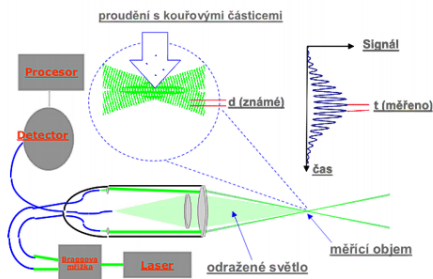
Základy laserové anemometrie.

### Laserová Anemometrie - princip

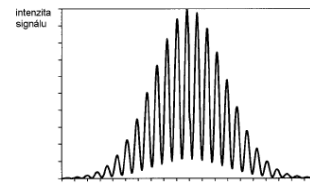


Optická sestava k pozorování Dopplerova jevu  
L laser, D detektor, A částice, w vektor rychlosti částice,  
p vektor paprsků dopadajícího záření,  
p\* vektor paprsků rozptýleného pozorovaného záření

### Laserová Anemometrie - princip

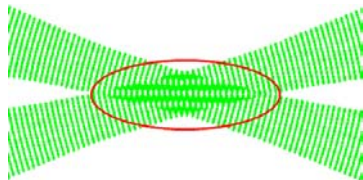


### Laserová Anemometrie Dopplerův zákmit

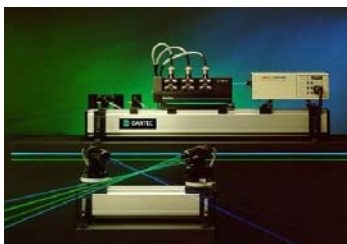


Obr. 2 Dopplerův zákmit

### Laserová Anemometrie - interference



### Laserová Anemometrie měřící aparatura

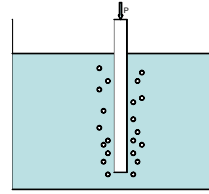


11.

Měření výšky hladiny. Měření vlhkosti.

Analýza plynů, měření emisí.

### Pneumatický stavoznak



$$P_h = \rho_K \cdot h \cdot g$$

$$P_C = P_h + \Delta P_Z$$

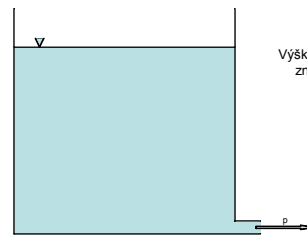
$\Delta P_Z$  - Ztráta tlaku při průtoku trubici

Pokud se hladina vzduchu v trubici drží zároveň s dnem trubice je tlak v trubici roven tlaku v hloubce, kde je dno trubice.

### Měření výšky hladiny

- Průhledové stavoznaky
- Plovákové stavoznaky
- Pneumatický stavoznak
- Hydrostatický stavoznak
- Ultrazvukové měření výšky
- Kapacitní stavoznaky
  - S izolovanou elektrodou
  - S neizolovanou elektrodou

### Hydrostatický stavoznak

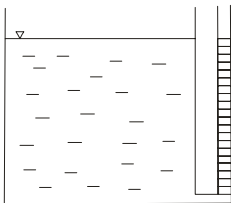


Výška hladiny se měří na základě znalosti tlaku na dně nádoby

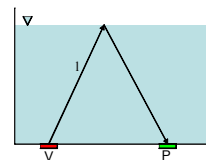
$$h = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

### Průhledové stavoznaky

- Používají se pro měření výšky hladiny ekologicky nezávadných kapalin
- Jsou náchylné na poškození, musejí být vně nádoby a průhledné

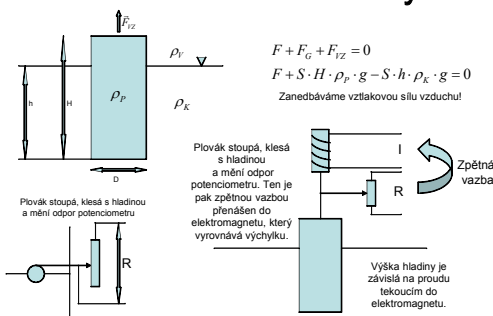


### Ultrazvukové měření výšky hladiny



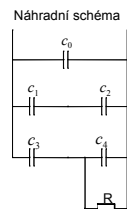
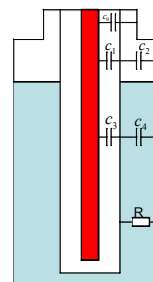
- Vyhodnocuje se čas odeslání a přijetí signálu
- Lze odesílat sinusový signál a měřit fázový posuv

### Plovákové stavoznaky



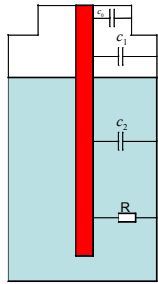
### Kapacitní stavoznaky

S izolovanou elektrodou

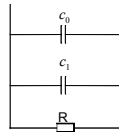


## Kapacitní stavoznaky

S neizolovanou elektrodou

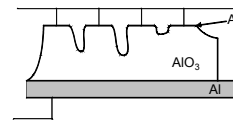


Náhradní schéma



- Jednodušší výpočet
- Nelze využít pro měření výšky hladiny vodivých kapalin (voda)

## Odporový senzor vlhkosti



- Se stoupající vlhkostí klesá odpor
- Nejsou lineární, ale jsou velmi přesné

## Kapacitní senzor vlhkosti



- Jsou lineární, ale méně přesné

## Měření vlhkosti

$$\Phi' = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \dots \text{absolutní vlhkost}$$

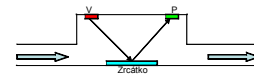
$$\Phi''(T) \dots \text{množství páry na mezi sytosti}$$

$$\varphi = \frac{\Phi'}{\Phi''} = \frac{p'}{p''} [100\%] \dots \text{relativní vlhkost}$$

parciální tlak

- Psychrometrické metody
- Hydrometrické metody
- Kondenzační metody

## Senzory rosného bodu



- Zrcátko je postupně zchlazováno a při dosažení teploty rosného bodu se orosí. Kapičky rozptylují světlo a na přijímač ho dopadá méně.

$$\varphi = \frac{\Phi'_s}{\Phi'_s(T)} = \frac{\Phi''_s(T)}{\Phi''_s(T)}$$

• Když určíme teplotu rosného bodu a normální teplotu, tak jsme schopni spočítat relativní vlhkost

$$\Phi' = \Phi''_s$$

## Psychrometrická metoda

- Založeny na adiabatickém sycení plynu
- Určí rozdíl teplot mezi teplotou suchého a mokrého teploměru
  - Suchý teploměr – umístěný ve vzduchu, kterého měříme vlhkost
  - Mokrý teploměr – obalen mokřým materiálem, z něhož se odpařuje voda a odebírá teplo

$$\varphi = \frac{p'_s}{p''_s} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \frac{p''_m}{p''_s} - \frac{A \cdot p_b}{p''_s} \cdot (g_s - g_m)$$

Výčteme z tabulky

Tep. suchého

Tep. mokrého

Konstanta

Barometrický tlak

$A = 6,56 \cdot 10^{-4} K^{-1}$  ...platí pokud je rychlost proudění  $w < 2,5 m/s$

Přístroje se nazývají **Aspirační Psychrometry**

## Měření průtoku

- Objemový

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad Q_V = \frac{V}{t} \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

- Hmotnostní

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad Q_m = \frac{m}{t}$$

$$Q_m = Q_V \times \rho \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

## Hydrometrická metoda

- Založena na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost na úrovni okolní vlhkosti a tím měnit svoje fyzikální, elektrické vlastnosti.

- Některé soli mění svůj odpor
- Lidský vlas se prodlužuje a zkracuje

## Střední průtok

$$Q_V = v \times s \quad Q_m = v \times s \times \rho$$

$$v 2\pi R^2 = \int_0^R v_s d\rho \pi$$

$$v = \frac{2}{R^2} \int_0^R v(r) r dr$$

## Měření v otevřených kanálech

- Pascalův žlab

$$Q_V = \frac{2}{3} k l \sqrt{2g} \cdot h \frac{3}{2}$$



## Měření v uzavřeném kanálu

- Dávovací měřidla  
(nastaven s určitým objemem => měříme počet objemů)

- Rotametry – polováčkové průtokoměry

$$Q_V = k \pi \left[ h \cdot D_p \cdot \operatorname{tg}(\Phi) + h^2 \cdot \operatorname{tg}^2(\Phi) \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_1}{\rho_1}}$$

- Lopátkový vodoměr
- Turbínový
- Šroubový
- Miskový anemometr (vrtulka na vzduch)A

- Škrťací orgány  
– Proudnicový  $p_1 - p_2 = \Delta p$

$$Q_V = \alpha \varepsilon \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}}$$

## Rychlostní sondy

- Pytotova trubice
  - Rychlost průtoku není lineární
  - pd – dynamický tlak
  - ps – statický tlak
  - pc – celkový tlak

$$W = \sqrt{\frac{2pd}{\rho}}$$

pd = pc - ps

Prandtlůva trubice

## Vírové senzory

Sr-Strouhalovo číslo  
W – rychlost

$$f = \frac{Sr}{a} \cdot w$$

Pro válec

$$f = \frac{Q_{21}}{d} \cdot w$$

## Ultrazvukové senzory

$C_0$  = Rychlost šíření ultrazvukem

$$C_0 + w \cdot \cos \alpha \quad (v_1) \quad C_0 - w \cdot \cos \alpha \quad (v_2)$$

$$\Delta t_1 = \frac{L}{C_0 + w \cdot \cos \alpha} \quad \Delta t_2 = \frac{L}{C_0 - w \cdot \cos \alpha}$$

$$w = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_2 \cdot \Delta t_1} \cdot \frac{L}{2 \cos \alpha}$$

## Indukční snímače

- Pro měření znečištěných kapalin

$$u = B \cdot D \cdot w$$

- Značkovací metoda (měření v otevřených kanálech)

$$w = \frac{l}{t}$$

- Laserové metody
  - a) LDA – bod po bodu
  - b) PIV

## Průtokoměry na bázi Coriolisovy síly

- Trubicí rotuje proudící tekutina, na element hmotnosti působí Coriolisova síla  
w = rychlost posuvu       $\omega$  = rotace      L = délka trubice  
 $Q_m$  = hmotnostní průtok

$$\Delta \vec{F}_c = 2 \Delta m (\vec{w} \times \vec{\omega})$$

$$w = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

$$\Delta \vec{F}_c = 2 \frac{\Delta m}{\Delta t} \omega \Delta L$$

$$M = \int_0^L 2 Q_m \omega l \, dl \quad M = Q_m \omega L^2$$

## Coriolisův senzor průtoku

$\Delta t$  = Časy průchodu trubici kolem snímače

$$Q_m = \frac{K}{8d^2} \cdot \Delta t$$

## Termoanemometry (žhavý drát)

- Parametry, které měříme záleží na parametru hmotnostního toku
- Pro laboratorní přístroje měření čistých tekutin
- Drátkem protéká proud => změna odporu
- Odváděné teplo je závislé na rychlosti a hmotnosti příslušné tekutiny

- Žhavení na konstantní teplotu - mírou rychlosti je proud
  - v = konstantní => I = f(w) jednoduché
- Udržení konstantního proudu - mírou rychlosti je velikost odporu
  - I = konstanta R = f(w) komplikovanější
- Udržení konstantního výkonu - mírou rychlosti je teplota
  - Komplikované, používá se méně často pro vyšší rychlosti

$$P = RI^2 \quad \Delta v = f(w)$$

## Kalorimetrická metoda

- Rozdíl teplot v místě S1 a S2 z kalorimetrické rovnice můžeme zjistit hustotu průtoku  
 $C_p$  = měrné teplo    P = příkon

$$Q_m = \frac{P}{C_p (v_2 - v_1)}$$

Thomasův válec snímač s ochlazováním

## Měření výšky hladiny

- Pro kapaliny a sypké látky
- Průhledové stavoznaky
  - Pro měření výšky vody, jen pro bezpečné látky
- Plováčkové stavoznaky
  - Vazby pro vztlakové těleso při měření se vztl. těleso téměř nepohybuje
  - Předpokládáme že vztlaková síla vzduchu je velmi malá a proto ji zanedbáme
  - Převádíme mechanickou na elektrickou veličinu

$$F + \underbrace{SH\rho_p g}_G - \underbrace{Sh\rho_1 g}_{Fvz} = 0$$

## Ultrazvukové měření

- vysílač a přijímač vysílají signály => odraz od hladiny
- vyhodnocuje se čas mezi vyslaným a přijmutým signálem
- doba závisí na výšce hladiny a rychlosti šíření ultrazvukem v dané tekutině
- c - rychlost šíření ultrazvukem

$$h = \frac{C \cdot \Delta t}{2}$$

## Kapacitní stavoznaky

- s neizolovanou elektrodou
  - pro kapaliny s izolačními el. vlastnostmi
  - válcová nádoba s elektrodou => kondensátor
  - kapacitor se mění s výškou
  - Dielektrikum - měřená kapalina, vzduch
- s izolovanou elektrodou
  - válcová nádoba s izolovanou elektrodou
  - měřená látka vodivá => uvažujeme nulovou kapacitu

## Měření plynů – emise

- analýza vzduchu
- emise pochází z: chemických reakcí (spalování – spalovací motory).
- analyzátory pracují na dvou principech
  - o chemický
  - o fyzikální

### 1. Fyzikální analyzátory

#### 1.1. Tepelně vodivostní

- většinou se používá ke zjištění obsahu  $\text{CO}_2$
- porovnává teplotní vodivost analyzovaného plynu a srovnávacího plynu

##### 1.1.1. Měřicí zařízení:

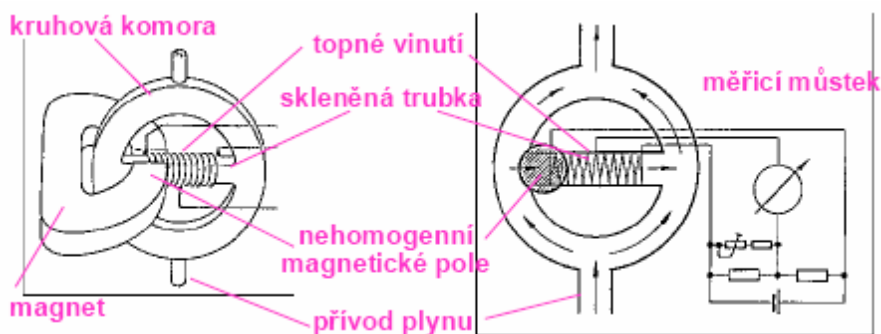
- komora válcového tvaru
- v ose komory je platinové vlákno elektricky vyhříváné na teplotu (100 až 150) °C
- 2 měřicí a srovnávací komory jsou zapojeny do Whetstoneovamůstku
- při změně tepelné vodivosti směsi dochází ke změně v odvodu tepla z měřicího vlákna
- vyhodnocuje se změna elektrického odporu



#### 1.2. Spalovací

#### 1.3. Magnetické

- kyslík obsažený v měřeném plynu je vtahován do magnetického pole
- v trubce je plyn ohříván, jeho magnetická susceptibilita klesá, teplejší plyn je vypuzován chladnějším plynem o vyšší susceptibilitě
- rychlost proudění, a tím i teplota a odpor vinutí jsou úměrné koncentraci kyslíku v analyzovaném vzorku
- analyzátory umožňují měření v rozsazích od (0-1) % až do (0-100) %  $\text{O}_2$

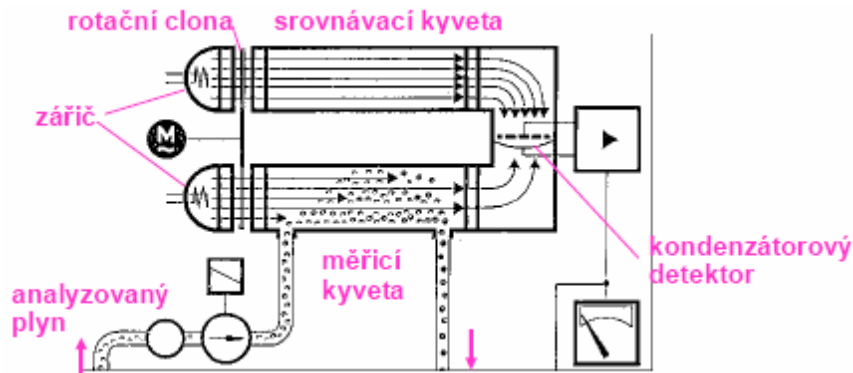


#### 1.4. Infračervené

- pro měření oxidu dusíku
- komory detektoru jsou naplněny měřeným plynem (selektivní detektor)
- komory jsou odděleny membránou, která tvoří jednu elektrodu kapacitního snímače tlaku
- při absorpci IČ záření se ohřívá náplň komory detektoru, tím dochází také ke změně tlaku, která je měřena kapacitním senzorem



- oba svazky paprsků jsou periodicky přerušovány rotační clonou, měřený výstupní signál je střídavý, amplituda závisí na koncentraci měřené složky



## 2. Chemické analyzátořy

### 2.1. Elektrolytický (lambda sonda)

- Lambda sonda je snímač přítomnosti kyslíku ve výfukových plynech.
- Jde o elektrochemický člen, který na základě chemické reakce vytváří elektrický signál.
- Jeho výstupní hodnota se mění v závislosti na přítomnosti kyslíku ve výfukových plynech.
- Princip činnosti sondy je založen na chování keramického materiálu na bázi  $ZrO_2$ , který se stává po dosažení určité teploty elektricky vodivým. Když vrstva keramiky při dané teplotě odděluje od sebe dvě plynné směsi s rozdílnou koncentrací kyslíku např. odděluje výfukové plyny na jedné straně od vzduchu na straně druhé, dojde k pohybu kyslíkových iontů uvnitř keramického materiálu a tím i ke vzniku el. napětí, které je úměrné rozdílu koncentrací kyslíku.

## Měření vodivosti kapalin. Měření pH.

## Metody měření

- Psychrometrická metoda
- Hydrometrická metoda
- Kondenzační metoda

## Psychrometrická metoda

- Základem metody je určení tzv. **psychrometrického teplotního rozdílu** = rozdíl mezi teplotou prostředí, které chceme měřit a teplotou vzduchu za užití mokrého teploměru

$$\vartheta_s - \vartheta_m = \frac{p_m'' - p_s'}{A \cdot p_b}$$

$p_m''$  = parciální tlak na mezi sytosti

$p_s'$  = parciální tlak

$A$  = psychrometrická konstanta =  $6,56 \cdot 10^{-4} [K^{-1}]$

$p_b$  = barometrický tlak

## Psychrometrická metoda 1

- Pro výpočet relativní vlhkosti tudíž platí vztah:

$$\varphi = \frac{p_m''}{p_s'} - \frac{A \cdot p_b}{p_s'} \cdot (\vartheta_s - \vartheta_m)$$

- **Aspirační psychrometry** – slouží k měření psychrometrickou metodou
  - Typicky složené ze dvou rtuťových teploměrů, mezi něž je vhnán měřený plyn
  - Je to starší model
  - **Psychrometrický senzor** – je moderní řešení, je složen ze dvou odporových teploměrů a výsledky jsou již zpracovávány počítačově

## Hydrometrická metoda

- Užívá se hydroskopické látky
- Zejména se užívá lidského vlasu, který mění svou délku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu
- Pro správnou funkci měřícího přístroje je třeba ho občas vložit do prostředí s téměř 100% vlhkostí
- **Odporový senzor vlhkosti:**
  - složen z oxidu hlinitého se zlatými elektrodami, jehož odpor exponenciálně klesá s rostoucí vlhkostí
- **Kapacitní senzor vlhkosti:**
  - CrNi a Au elektrody položené na vrstvě polymeru a skla
  - Časté užití
  - Měří jak vlhkost vzduchu tak i jeho teplotu

## Kondenzační metoda

- Funguje na principu měření teploty rosného bodu
- Určení vlhkosti prostředí na principu orosení zrcátka měřícího zařízení
- S větší vlhkostí je i větší orosení zrcátka a tudíž se světlo z diod méně odráží = určení vlhkosti
- Součástí měřícího systému je tepelná izolace, senzor teploty, Petlichův regulátor.

$$\Phi_s = \Phi_r$$

$$\varphi = \frac{\Phi_s'}{\Phi_s''} = \frac{\Phi_r'}{\Phi_r''}$$

## MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KAPALIN

$\gamma$  je měřm elektrická vodivost roztoku

$$\gamma = G \cdot \int_0^1 \frac{dl}{S} = G \cdot K = \frac{K}{R} \text{ kde } K \text{ je elektronová konstanta}$$

R je elektrický odpor mezi elektrodami

G je vodivost kapaliny

- **Elektrolyty:**
  - Slabé
  - Silné
- Měří se konduktometry a užívá se veliny konduktivita
- Pro slabé roztoky jsou závislosti koncentrace jsou při stejné teplotě přímkové
- Pro silné roztoky jsou nelineární
  - Mezi silné roztoky patří HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH, KCl,...
- Pro měření konduktivity se užívá střídavé napětí

## MĚŘENÍ KONCENTRACE VODÍKOVÝCH IONTŮ

- pH vychází z molekul vody, kde při 25 stupních je koncentrace  $[H^+]$  a  $[OH^-]$  rovna  $10^{-7}$  mol/litr
- Z toho vyplývá taky kyselé a zásadité prostředí
  - pH kyselé = 0 - 7
  - pH zásadité = 7 - 14
- Měří se potenciální rozdíl na elektrodách
- Elektrody:**
  - Skleněné elektrody
  - Antimonnové elektrody – nevýhodou je rychlé znečištění a je nutno čistit
  - Srovnávací elektroda – kalomelová elektroda  $Hg_2Cl_2$ 
    - Pro měření je třeba, aby na vstupu byl velký odpor a také aby citlivost měření byla vysoká

### Měření koncentrace vodíkových iontů 1

- Chloridostříbrné srovnávací elektrody
- Nernstův vztah:**

$$u = u_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln a_i = u_0 + \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \log a_i$$

$$u = u_0 - \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{F} \cdot pH$$

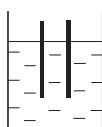
$$u = u_0 - S \cdot pH$$

$$S = 59 mV$$
- R = plynová konstanta
- T = absolutní teplota
- n = mocnost iontů
- F = Faradayova elektrolytická konstanta
- $a_i$  = koncentrace H<sup>+</sup> iontů

## Měření el. vodivosti kapalin

- G ... elektrická vodivost (S)
- A ... plocha elektrod (m<sup>2</sup>)
- L ... vzdálenost elektrod (m)
- $\sigma$  ... měrná elektrická vodivost (S m<sup>-1</sup>), převrácená hodnota se nazývá měrný odpor  $\rho$  ( $\Omega$  m)

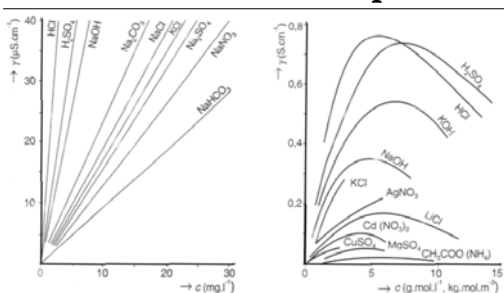
$$G = \sigma \cdot \frac{A}{L}$$



### $\sigma$ (konduktivita):

- závisí na koncentraci i teplotě
- Pro měření se používá střídavý proud (aby nedocházelo k elektrolyze)

## Měření el. vodivosti kapalin



Závislost měrné vodivosti vodného roztoku různých látek na jejich koncentraci

## Měření el. vodivosti kapalin

- Pro slabé roztoky –  $\sigma$  lineární charakter
- Pro silné roztoky – nelineární

(ionty jsou brzděny nejen nárazy do molekul rozpouštědla, ale rovněž nárazy a interakcemi mezi ionty opačné polarity)

## Měření pH

### Definice pH:

hodnota pH je definována jako záporně vzatý dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů

Kyselost:  $pH = -\log(c(H_3O^+))$

Zjednodušeně:  $pH = -\log[H^+]$

koncentrace =  $c = [ ]$

## Měření pH

- Obecně platí rovnice:
  - $pH = -\log(a(H_3O^+))$
- kde  $a$  značí aktivitu iontu ( $H_3O^+$ ).
- pH nabývá hodnot od 0 do 14 (platí pro vodné roztoky):
  - chemicky čistá voda má  $pH = 7$
  - kyseliny od 0 do 7
  - zásady od 7 do 14

Látka	pH
Kyselina v baterích	1,0
Žaludeční šťáva	2,0
Citronová šťáva	2,4
Coca-cola	2,5
Octet	2,9
Šťáva z pomeranče nebo jablka	3,5
Pivo	4,5
Říva	5,0
Čaj	5,5
Kyselý dešť	<5,6
Sliny onkologických pacientů	4,5-6,7
Mléko	6,5
Čistá voda	7,0
Sliny zdravého člověka	6,5-7,4
Křev	6,8-7,45
Moušková voda	8,0
Mýdlo	9,0-10,0
Čpavek pro domácí použití	11,5
Nehalšené víno	12,5
Louh sodný pro domácí použití	13,5

## Měření pH

- pH se měří pomocí rozdílu potenciálů na 2 elektrodách – měřicí a porovnávací.
- porovnávací (referenční) – neměnný potenciál při změně prostředí, v němž je ponořena.
  - Nejčastěji se zde uplatňuje kalomelová
  - nebo argentchloridová srovnávací elektroda.

## Měření pH

### ■ měrné elektrody:

- skleněné – tenkostěnná miniaturní baňka ze speciálního skla, naplněná pufrům, tedy roztokem o konstantním pH. Vnější povrch baňky je ve styku s měřeným roztokem a rovnováha mezi hydroxoniovými ionty ve zkoumaném roztoku a ionty v povrchu skla způsobují **změnu elektrického potenciálu** elektrody.
- antimonové – odolnější, na povrchu se může vytvořit vrstvička, způsobující zkreslení

## Měření pH

### pH-metry:

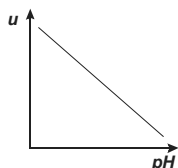
- Elektrický potenciál mezi měrnou a referenční elektrodou je měřen citlivým **voltmetrem**, který musí vykazovat vysoký vstupní **odpor**.
- minimální požadavek je  $10^{14} \Omega$ , kvalitní přístroje mají parametry o řád až dva lepší.
- Komerčně dodávané přístroje - **pH-metry** současně převádějí měřené napětí mezi elektrodami přímo na hodnotu pH, kterou zobrazují digitálně na displeji.

## Měření pH

- $u = u_0 + (R \cdot T) / (n \cdot F) \cdot \ln a_i$   $a_i$  – poměr koncentrací iontů  
 $T$  – termodynamická teplota
- $u = u_0 + (2.3 \cdot R \cdot T) / (n \cdot F) \cdot \log a_i$   $R$  – plynová konstanta
- $u = u_0 - (2.3 \cdot R \cdot T) / (n \cdot F) \cdot \text{pH}$   $n$  – mocnost iontů (H...n=1)  
 $F$  – Faradayova konstanta
- $u = u_0 - S \cdot \text{pH}$ 
  - $S = 59 \text{ mV}$

## Měření pH

- Teoreticky platí, že změna pH o jeden řád (např. z pH 6 na pH 7) vyvolá změnu potenciálu skleněné elektrody o 59 mV. V praxi je však potenciálový rozdíl individuálně měřen pro konkrétní elektrodu pomocí roztoků o přesně definovaném pH, tzv. **pufrů**. Naměřený potenciálový rozdíl (např. pufru o pH = 4 a pH = 7) pak slouží ke kalibraci elektrody a zpřesnění výsledných údajů.



## 13.

# Měření světelného záření, měření jaderného záření. Měření magnetických veličin. Měření hluku.

## Přednáška 13

Měření světelného záření, měření jaderného záření. Měření magnetických veličin. Měření hluku

## Měření světelného záření

### Úvod

Elektromagnetické záření může vystupovat ze zdroje všemi směry. Výkon přenášený zářením se nazývá tok záření  $\Phi_e$ . Viditelnou část toku záření nazýváme světelným tokem  $\Phi$ . Poměr světelného toku a toku záření  $\Phi_e$ , procházejících stejnou plochou, je světelná účinnost záření

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e}$$

přičemž K má nenulové hodnoty pro viditelný rozsah záření

Svitivost zdroje I ve volném směru je definována jako elementární světelný tok  $d\Phi$ , vysílaný do elementárního prostorového úhlu  $d\omega$ , dělený velikostí tohoto prostorového úhlu

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Jednotkou svítivosti je kandela (cd), jednotkou světelného toku je lumen (lm) a jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr).

Světelný tok při dopadu na těleso způsobuje osvětlení E, které definujeme jako poměr světelného toku  $d\Phi$  a osvětlené plochy  $dS$

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

Jednotkou osvětlení je lux (lx). Je to takové osvětlení, při kterém na plochu dopadá světelný tok rovnoměrně po ní rozložený. Pak platí mezi osvětlením E a svítivostí I bodového zdroje Lambertův vztah

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha$$

kde r je vzdálenost zdroje od plochy a  $\alpha$  úhel mezi normálou plochy a směrem dopadajícího světla

## Měření svítivosti pomocí fotometru

Na porovnání svítivosti dvou zdrojů se používá přístroj, který nazýváme fotometr.

Nejjednodušší je Bunsenův fotometr. Základní částí Bunsenova fotometru je bílé papírové stínidlo S, které má uprostřed mastnou skvrnu. Mastná skvrna má tu vlastnost, že propouští více světla než čistý papír. Proto se skvrna při pohledu ze strany zdroje (v odraženém světle) jeví tmavší než okolní papír a z druhé strany (v procházejícím světle) se jeví naopak světlejší. Je-li skvrna stejně světlá jako okolní papír, potom je osvětlení z obou stran stejné.

## Měření svítivosti pomocí luxmetru

Luxmetr je vlastně fotoočlánek (polovodič, který při osvětlení uvolňuje elektrony), spojený s citlivým galvanometrem, jehož stupnice je ocejchována v jednotkách osvětlení (v luxech). Jestliže známe vzdálenost r mezi zdrojem světla a luxmetrem, pak při kolmém dopadu světla na luxmetr pro svítivost I pak platí

$$I = E \cdot r^2$$

kde E je osvětlení, které měříme v luxech a odečítáme na luxmetru. Jestliže r měříme v metrech, pak svítivost dostaneme v kandelách

## Úvod

Nejstarší a dosud nejběžnější metody, kterými lze měřit a srovnávat aktivity radioaktivních zářičů, jsou založeny na ionizačních účincích záření v plynech. Plyny se stávají vodivými, prochází-li jimi ionizační záření. Vnikne-li ionizující částice do prostoru mezi desky kondenzátoru, na němž je přiložené napětí, vytvoří podél své dráhy kladné i záporné ionty, které jsou uváděny elektrickým polem do pohybu směrem k elektrodám, a mezi deskami kondenzátoru prochází ionizační proud. Ionizační proud závisí na intenzitě ionizačního záření, na energii ionizujících částic a na napětí mezi deskami kondenzátoru.

## Charakteristika plynového detektoru

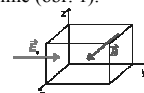
Závislost ionizačního proudu na napětí vloženém na desky kondenzátoru, charakteristika komory, je důležitá pro volbu způsobu a podmínek měření. V běžných případech má při konstantní intenzitě ionizujícího záření typický průběh, který lze rozdělit do následujících oblastí

- Oblast Ohmova zákona.
- Oblast nasyceného proudu
- Oblast proporcionálnosti
- Geigerova oblast

Protože ionizační ztráty závisí na druhu ionizující částice a na její počáteční energii, lze popsané zařízení využít pro rozlišení druhu částic nebo pro rozlišení mezi energiemi identického druhu záření.

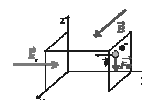
## Hallova sonda

Mějme polovodič typu N. Majoritními nositeli náboje jsou elektrony, počet děr zanedbejme. Polovodič umístíme do elektrického pole s intenzitou  $E_y$  a současně do magnetického pole s indukcí  $B$ , přičemž vektory  $E_y$  a  $B$  jsou na sebe kolmé (obr. 1).



obr. 1: Polovodič v el. a magn. poli. El. pole má směr osy y, magn. pole má směr osy x.

Jelikož se vzorek polovodiče nachází v elektrickém poli, působí na elektrony elektrická síla a ty se pohybují proti směru intenzity elektrického pole. Na pohybující se elektrony ale v magnetickém poli působí Lorentzova síla, která je kolmá na vektor rychlosti elektronů. Trajektorie elektronů se proto zakřívují a elektrony se "hromadí" u stěny vzorku. Tím se ale ve vzorku vytváří elektrické pole (vzorek je na jedné straně "zápornější" než na druhé) a na další elektrony působí nejen Lorentzova síla, ale i elektrická síla v tomto elektrickém poli - a ta má opačný směr než síla Lorentzova. Vzorek bude v rovnováze tehdy, až bude velikost elektrické síly stejná jako velikost Lorentzovy síly (obr. 2).



obr.2: Elektron se nachází v elektrickém a magnetickém poli, pohybuje se proti směru osy y a tudíž na něj působí magnetická síla proti směru osy z.

Pod vlivem magnetické síly  $F_M$  se dráha elektronů mírně zakříví a elektrony se dostaly ke spodní stěně vzorku. Tím je u spodní stěny více elektronů než u horní, proto ve vzorku vzniká elektrické pole se směrem opačným než je směr osy z. Na další elektrony tak působí nejen síla magnetická proti směru osy z, ale i síla elektrická ve směru osy z. Čím více elektronů je u spodní stěny, tím větší je elektrická síla.

Velikost elektrické síly  $F_e$  elektrického pole je stejná jako velikost magnetické síly  $F_M$ . Z-ová složka síly celkové síly působící na elektrony je tedy nulová a elektron se pohybuje po přímé trajektorii proti směru osy  $x$ . Vzorek je v rovnováze.



Podmínku rovnováhy vyjádříme vzorcem. Rovnováha nastane, je-li  $F_M = F_e$ . Je  $F_e = eE$ ,  $F_M = evB$ . Tedy v rovnováze  $eE = evB$  a z toho

Hallův jev se využívá pro měření magnetické indukce magnetického pole. Zařízení se nazývá *Hallova sonda*.

16

Zde vidíme detail stupnice a naměřenou hodnotu. Přepínáním rozsahu se mění číslo v okénku. Pravá část stupnice slouží pro kontrolu stavu baterie.



20

## Měření hluku

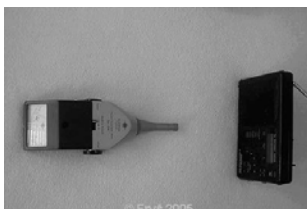
17

### Úvod

Asi každý víme, že zvuky kolem nás mohou být příjemné nebo nepříjemné. Obecně těm nepříjemným, které jsou nežádoucí a mají nepříjemné, rušivé nebo škodlivé účinky říkáme hluk. Takový hluk vzniká dvojím způsobem. Jednak chvěním povrchu strojů, zařízení, stěn budov atd. a jednak prouděním vzduchu, vody a pod. (ventilátory, čerpadla, výfukové potrubí). Z různých důvodů měříme tzv. hladinu akustického tlaku, který více odpovídá našemu sluchovému vjemu. Proto má tato hladina má logaritmický průběh a měří se v decibelech (dB).

18

Měřidlo, které se používá pro měření hladiny zvuku a akustického tlaku se nazývá zvukoměr. Zvukoměr je tvořen mikrofonem (vpravo na konci), zesilovačem, měřidlem (displejem) a filtry. Filtry se používají 3 pro různá omezení zvukové frekvence. Příklad měření je na fotografii. Měřidlo má, tak, jako téměř každé, několik rozsahů.

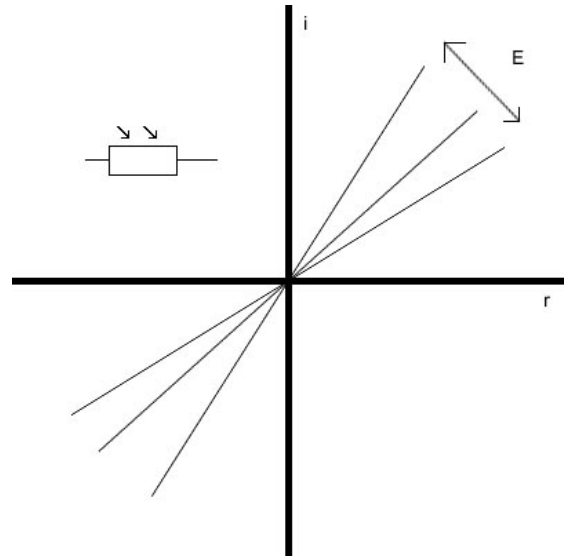


19

## Měření osvětlení

### 1. Fotorezistor

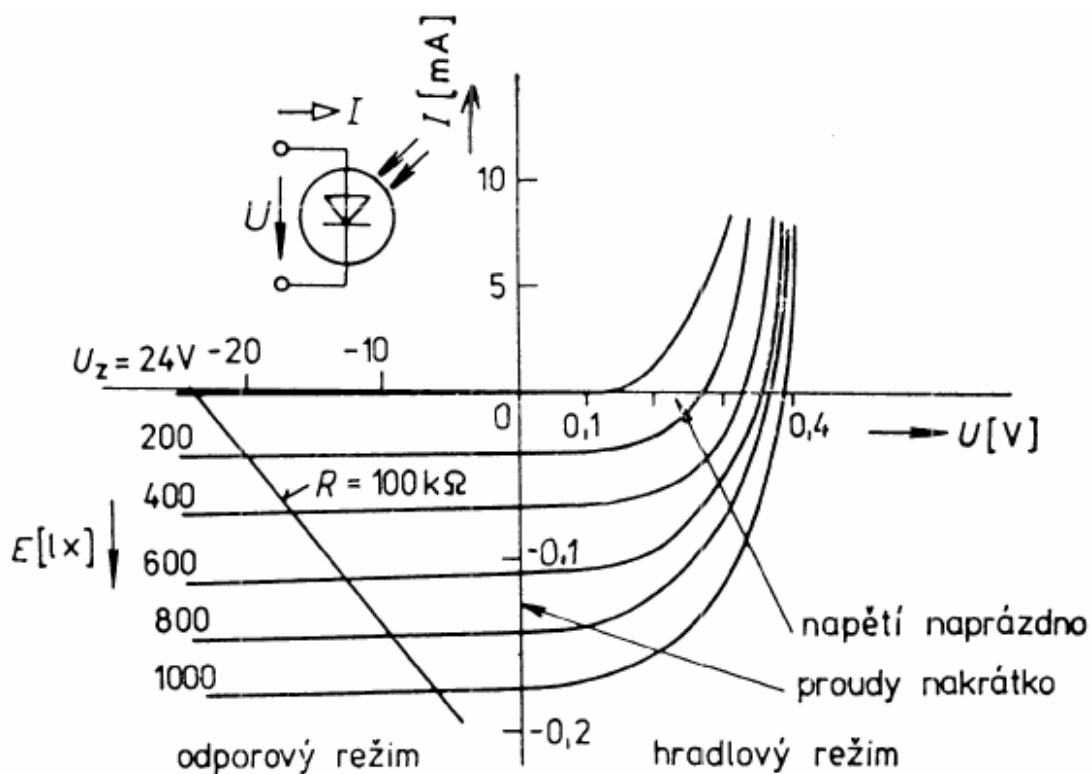
- Levný
- Využívá se například pro automatické rozsvěcení/zhasínání podle úrovně okolního světla.
- Pracuje na principu vnitřního fotoelektrického jevu.
- Poměrně pomalý (závisí na osvětlení).
- Snižuje svůj odpor s rostoucím ozářením.
- Spektrální oblast, v níž pracují, je dána absorpční hranou (maximální vlnová délka, při níž může ještě dojít k absorpci).



### 2. Fotodioda

- Fotodioda je plošná polovodičová dioda konstrukčně upravená tak, aby do oblasti PN přechodu pronikalo světlo.
- Není-li přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika stejný průběh, jako charakteristika běžné diody.
- Vliv osvětlení přechodu můžeme sledovat v polarizaci diody v závěrném směru, kdy dochází k lineárnímu růstu anodového proudu (anoda) při rovnoměrném zvětšování osvětlení.
- Dioda se tedy chová jako pasivní součástka, jejíž elektrický odpor v závěrném směru je závislý na osvětlení.

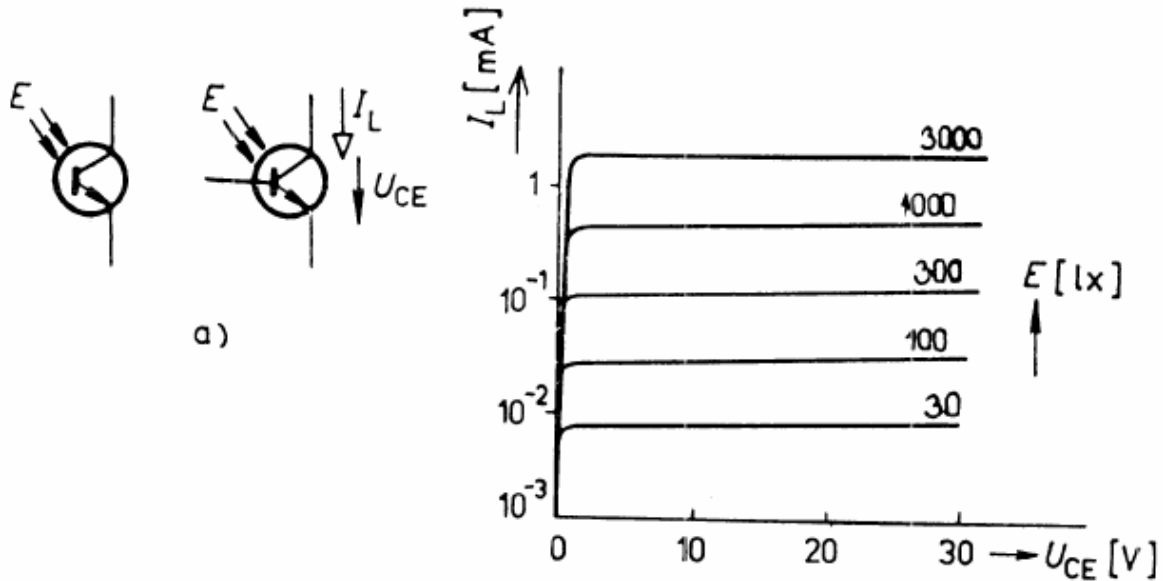
Fotodioda reaguje na změny osvětlení velmi rychle, řádově  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  s.





### 3. Fototranzistor

- Dopadajícím zářením do kolektorového PN přechodu se otevře přechod mezi bází a emitorem. Tranzistor se otevře a prochází jím proud z připojeného zdroje. Průchod nosičů náboje lze řídit velikostí dopadajícího záření.



### 4. Fotonásobič

- Je možno jím detekovat velmi malé úrovně osvětlení, jenom pár fotonů.

### 5. Scintilační detektory

- optický světlovou

### 6. Hallova Sonda

Polovodičový prvek s dvěma dvojicemi elektrod

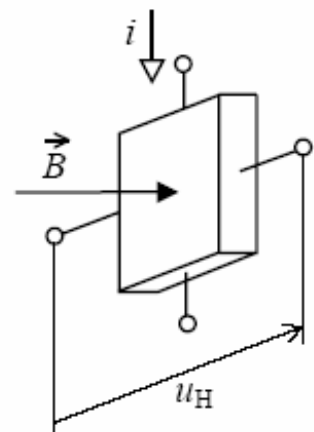
$$U_h = \frac{R_h}{d} * B * I$$

$U_h$  – hallovo napětí

$D$  – tloušťka materiálu

$B$  – magnetická indukce

$I$  – procházející proud



## 14.

# Dálková měření. Základní pojmy, rozdělení systémů dálkového měření. Přenosové cesty.

## Rozdělení dálkových měření

- elektrických veličin
- neelektrických veličin (teplota, vlhkost...)

## Měření elektrických veličin

- napětí
- proud

## Měření neelektrických veličin

- měření otáček
- měření teploty
- měření výšky hladiny
- měření tlaku

## Telemetrie

- služba dálkového měření umožňující naměřené hodnoty fyzikálních veličin přeměnit na tzv. měronosné veličiny, které se dálkově přenášejí telekomunikačním kanálem a ve vzdáleném místě se zpětně přemění na hodnoty původní fyzikální veličiny

## Přenosové cesty

- kabelové vedení
- optické vedení
- bezdrátové přenosové cesty

## Kabelové vedení

- měděný drát
- telefonní dvoulinka
- kroucená dvoulinka
- koaxiální kabel

## Měděný drát

- měď je kov, který velmi dobře vede elektrický proud. Z tohoto důvodu je měď často používána jako výchozí materiál pro nejrůznější "kovové" (metalické) vodiče, i když není zdaleka jediným kovem, který se k tomuto účelu používá. Použití mědi je však natolik charakteristické, že její jméno se stalo určitým symbolem pro "kovový charakter", a samotný termín "měď" (resp. "copper") je často používán jako protipól optických vláken či různých bezdrátových cest k vyjádření tohoto, že určitá přenosová cesta je realizována pomocí metalického (kovového) vodiče.

## Telefonní dvoulinka

- historicky největším "pokladačem" metalických přenosových cest jsou telefonní společnosti. Jejich podnikání totiž vyžaduje, aby mezi uživatelem jejich telefonní služby a nejbližší telefonní ústřednou vedl "samostatný drát", označovaný také jako tzv. local loop (doslova: místní smyčka). Konkrétní vodiče, uzpůsobené potřebám telefonie, jsou v zahraničí označovány jako "voice grade" (doslova: hlasové), a jsou vždy kládeny v párech, neboli jako dvojice vodičů (pro jednu účastnickou přípojku obvykle stačí jediný pár takovýchto vodičů).

## Kroucená dvoulinka

- každé dva vodiče, které jsou vedeny rovnoběžně vedle sebe, fungují jako anténa - vyzářují do svého okolí elektromagnetické vlnění, a stejně tak přijímají elektromagnetické vlny ze svého okolí. Míra tohoto "efektu antény" přitom samozřejmě záleží na mnoha okolnostech, včetně délky souběžného vedení obou vodičů a jejich vzdálenosti. V praxi pak tento efekt nebývá vůbec zanedbatelný, a proto se podnikají určité kroky k jeho snížení. Jedním z těchto kroků je i pravidelné (pravidelně se opakující) zkroucení obou vodičů (anglicky: twisting). Tím vzniká tzv. kroucená dvoulinka (twisted pair).

## koaxiální kabel

- podobně jako kroucená dvoulinka, je i koaxiální kabel tvořen dvojicí vodičů, zato ale v jiném vzájemném uspořádání. Jeden z vodičů je tzv. středový (tvoří středovou žílu), zatímco druhý vodič je realizován vodivým opláštěním, které obaluje izolační vrstvu kolem středového vodiče. Tento druhý vodič má současně i dobrý stínící účinek. Samotné označení "ko-axiální" (česky: souosý) pak vychází právě z faktu, že oba vodiče mají shodný geometrický střed, resp. stejnou geometrickou osu, a proto jsou označovány jako "souosé".

## Optické vedení

- optické vlákno
- optický kabel
- mnohovidové optické vlákno
- jednovidové optické vlákno

## Optické vlákno

- často používaným přenosovým médiem, řazeným mezi "drátové" přenosové cesty (a nikoli bezdrátové), je tenké vlákno z kysličníku křemíku, neboli ze skla. Každé takovéto vlákno je použitelné jen pro přenosy jedním směrem, a pro vytvoření obousměrné datové cesty je pak nutné použít dvojici takovýchto optických vláken.

## Optický kabel

- jednotlivá optická vlákna jsou velmi tenká a nesmírně křehká. Jsou sice obalena ochrannou vrstvou, ale ani ta obvykle nedokáže zajistit dostatečnou mechanickou ochranu. Proto se optická vlákna vyrábí v podobě celých optických kabelů, které typicky obsahují více jak jedno optické vlákno (někdy až desítky), a kromě toho mají i potřebné výztuže a další ochranné prvky, které dokáží zajistit požadované mechanické vlastnosti kabelů.

## Mnohovidové optické vlákno

- Užitečný signál se po optických vláknech přenáší ve formě impulsů světla. Tyto světelné impulsy se přitom šíří vláknem "po částech", označovaných jako tzv. vidy, anglicky modes (lze si je představit jako konkrétní frekvence). Lacinější optická vlákna přitom přenáší několik vidů současně (jsou tzv. mnohovidová), s tím že každé z nich se šíří vláknem poněkud jinou rychlostí a po poněkud jiné dráze, takže na přijímajícím konci je výsledný součet jejich světelné intenzity, odpovídající přenášenému signálu, zatížen určitou chybou (padající na vrub tzv. vidové disperze). Kvůli tomuto zkreslení dokáží mnohovidová vlákna přenášet data jen na menší vzdálenosti, řádově několik málo kilometrů (typicky jen 2 km). Na druhé straně jsou tato vlákna lacinější, a lacinější a jednodušší mohou být i nezbytné konektory, světelné zdroje atd.

## Jednovidové optické vlákno

- výkonnější variantou optických vláken jsou taková, která vedou světlo jen v podobě jediného vidu. Zde pak nedochází ke zkreslení v důsledku vidové disperze, a tudíž i dosah souvislého segmentu optického vlákna může být větší, typicky až desítky kilometrů. Na druhé straně je tento druh vlákna dražší než vlákno mnohovidové, a vyžaduje také dokonalejší konektory, světelné zdroje (optické lasery) a přijímače.

## Bezdrátové přenosové cesty

- rádiové přenosy
- mikrovlnné přenosy
- infračervené přenosy
- světelné přenosy
- bezšňůrový přenos
- mobilní přenos
- paketové rádiové přenosy

## Rádiové přenosy

- pro přenosy dat lze využít i šíření elektromagnetických vln v rádiové části spektra - díky svému šíření prostorem tyto vlny nevyžadují žádnou "pokládku" přenosových cest jako "drátová" přenosová média, což je jejich obrovskou předností. Na druhou stranu se vlastnosti rádiových vln mění v závislosti na použité frekvenci - při nižších frekvencích tyto vlny sice dokáží "obcházet" všelijaké terénní překážky, ale jejich "síla" rychle klesá se vzdáleností od vysílajícího zdroje. Vlny vyšších frekvencí zase mají tendenci šířit se více přímočaře, a lze je tudíž mnohem lépe směřovat, resp. přesněji zacílit na určitý konkrétní cíl. Na druhou stranu s rostoucí frekvencí jsou rádiové přenosy citlivější na atmosférické podmínky, například na déšť či mlhu, smog apod.

## Mikrovlnné přenosy

- jako "mikrovlnné" se obvykle označují rádiové přenosy na frekvencích nad 100 Mhz. Při těchto frekvencích již je možné soustředit energii rádiových vln do poměrně úzkého svazku a ten cíleně nasměrovat (pomocí vhodné parabolické antény) na konkrétní cíl. Ten ale musí být v dosahu přímé viditelnosti, protože takovýto svazek jen velmi těžko či vůbec nedokáže obcházet ani procházet terénní ani jiné překážky, například budovy. Jelikož se takovýto svazek šíří po ideální přímce, vadí mu i zaoblení zemského povrchu. Proto se v praxi umísťují vysílače i přijímače na vhodně vyvýšená místa, například na anténní stožáry či věže. Kvůli zakřivení zemského povrchu a terénním překážkám se pak musí budovat mikrovlnné přenosové trasy na větší vzdálenosti jako řetězce přijímačů a vysílačů, které fungují jako retranslační stanice.

## Infračervené přenosy

- přenosy pomocí vln v infračervené části spektra jsou dnes oblíbeným řešením na velmi krátkou vzdálenost, například pro komunikaci mezi notebooky, tiskárnami, mobilními telefony, osobními organizéry atd. Infračervené vlny neprostupují skrz překážky, a tudíž přenosy v jedné místnosti nemohou ohrozit eventuelní souběžný přenos v jiné místnosti (a ze stejného důvodu jsou i relativně odolné vůči vnějšímu odposlechu). Na otevřeném prostranství, mimo budovy, však infračervené přenosy nejsou použitelné, protože naše slunce svítí v infračervené části spektra stejně intenzivně, jako v jeho viditelné části.

## Světelné přenosy

- použití optických vláken představuje "vedenou" variantu přenosů ve viditelné části spektra, kdy světelný paprsek je veden optickým vláknem až na místo svého určení. Stejně tak je ale možné nasměrovat úzký paprsek světla ve viditelné části spektra (typicky pomocí vhodného laseru) a nechat jej šířit vzduchem. Takovéto laserové přenosové systémy jsou již ze své podstaty jednosměrné, a v praxi se proto používají dvojice "protisměrných" paprsků. Nevýhodou je relativně velká závislost na atmosférických podmínkách, které mohou změnit cílené nasměrování úzkého laserového paprsku tak, že mine svůj cíl.

## Bezšňůrový

- tímto přívlastkem se označuje takové provedení různých domácích spotřebičů, které nahrazuje klasickou "šňůru" pomocí bezdrátových přenosů - jde například o bezšňůrové telefony, jejichž sluchátka komunikují se svou základnovou stanicí bezdrátovým způsobem. Mobilita je zde možná, ale jen ve velmi malém dosahu (např. sluchátko bezšňůrového telefonu lze použít do vzdálenosti kolem stovky metrů od vlastní základnové stanice).

## Mobilní přenos

- takto se označuje přenos, při kterém se alespoň jeden z účastníků bezdrátového přenosu pohybuje. Základním problémem takovýchto komunikací je kromě dosahu a kvality přenosy také problém s použitím frekvencí, tak aby každá komunikující dvojice mohla používat samostatnou frekvenci a jednotlivé přenosy se neovlivňovaly navzájem. Pokud se totiž počet vzájemně komunikujících dvojic může dynamicky měnit, není možné jim potřebné frekvence přidělit (alokovat) staticky.

## Paketové rádiové přenosy

- klasické rádiové přenosy, používané pro potřeby přenosu dat, odpovídají svým způsobem fungování přenosům na principu přepojování okruhů - což znamená, že celá přenosová cesta se chová jako "souvislý kus drátu" s určitou přenosovou kapacitou, skrz kterou je možné přenášet data charakteru bitového či bytového proudu (tzv. stream). Existují však i takové rádiové přenosy, které jsou uzpůsobeny přenosu malých digitálních bloků, obsahujících mimo jiné i adresu svého odesílatele a příjemce. Při jejich použití je možné využít sdílených přenosových tras (například i satelitních), a naopak odpadají problémy s přidělováním frekvencí, které jsou nepřijemné hlavně u mobilních rádiových komunikací.