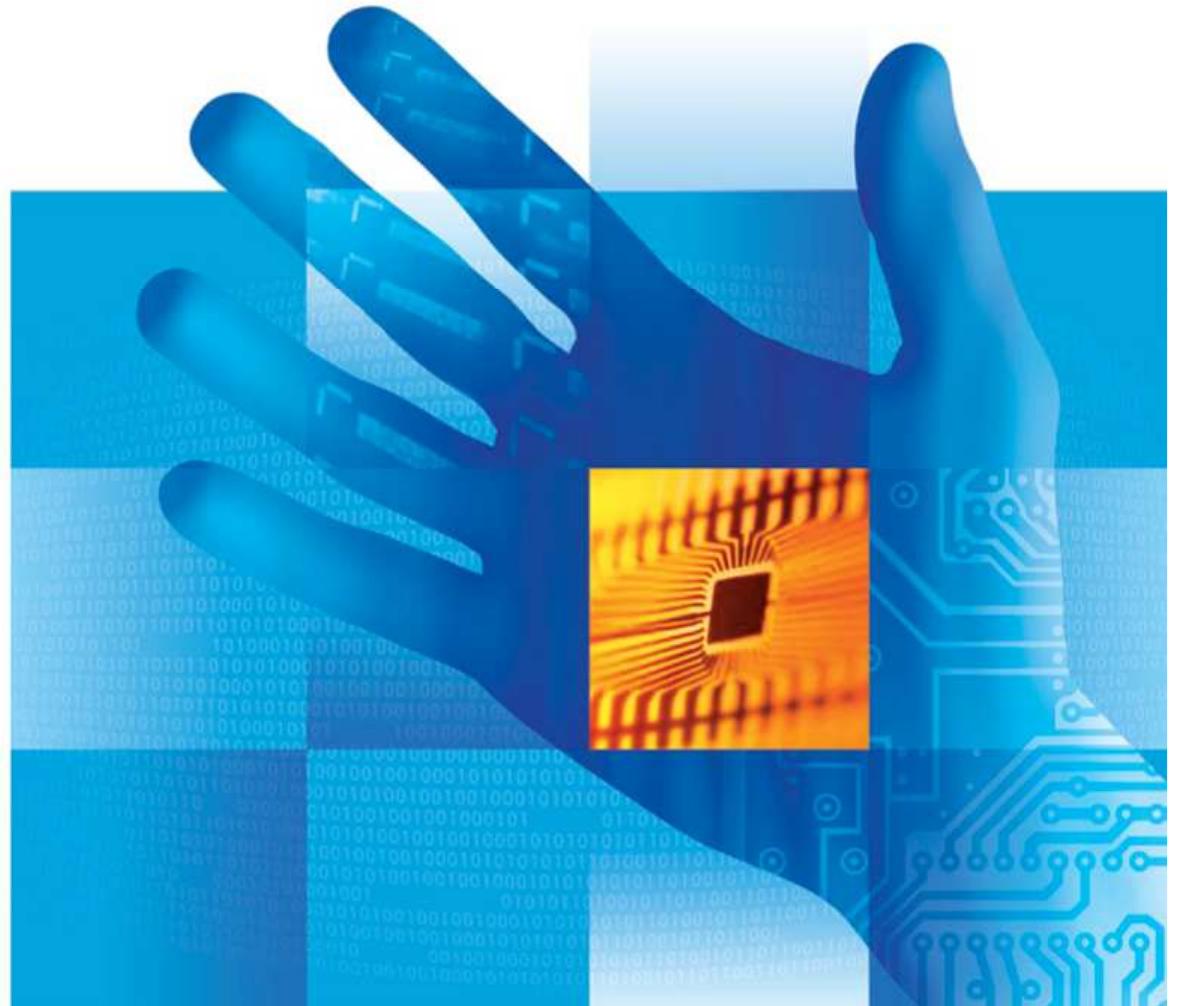




Katedra měřicí a řídicí techniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
**VŠB-TUO**

# Senzory a Měření

## 1 – Úvod do problematiky snímačů





# Úvod

Cíl předmětu:

- s problematikou a metodami měření neelektrických veličin používanými v průmyslové praxi
- seznámit se základními principy využívanými při převodu neelektrických veličin na elektrický signál (výhody, nevýhody)
- vysvětlit základní vlastnosti a konstrukční provedení snímačů (senzorů)
- uvést využití snímačů pro měření nejběžnějších technologických veličin v praxi





# Terminologie

- **Čidlo neboli senzor** (detektor, receptor) je převodníkem jedné fyzikální veličiny na jinou fyzikální veličinu.
- **Snímač** – (senzor + obvod pro zpracování signálu) je to člen pro sběr informací. Technické zařízení, které je určeno pro snímání a detekci různých fyzikálních veličin, vlastností látek a technických stavů v mnoha oborech lidské činnosti
- **Proč se o snímače zajímáme?**
  - Vědecké důvody
  - Praktické důvody

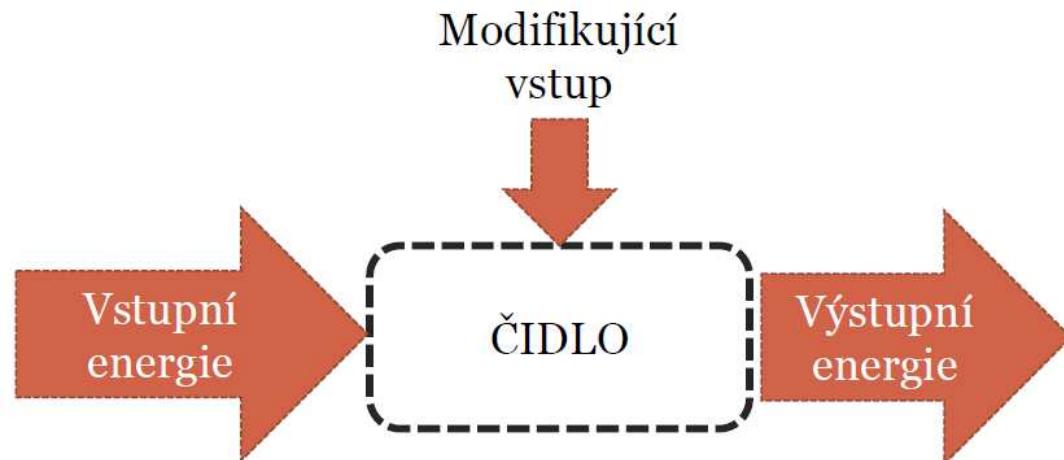




## Rozdělení snímačů - dle formy energie nesoucí informaci o měřené soustavě

### Vstupní energie:

- Elektrická
- Mechanická
- Magnetická
- Tepelná
- Radiační
- Chemická



**Nejhodnější výstupní energie je elektrická**  
spolehlivý přenos, možnost automatizace měření





# Výhody a nevýhody převodu na el. signál

## Výhody

- větší přesnost
- větší citlivost
- možnost dálkového měření
- větší rychlosť měření
- možnost záznamu
- výstupní signál v analogové (spořité) nebo digitální (číslicové) podobě
- možnost strojového zpracování výsledků
- možnost měření na velkém počtu míst
- další (malá hmotnost snímače, malá časová konstanta)

## Nevýhody

- větší náklady na měřicí kanál
- vyšší náklady na údržbu
- vyšší kvalifikace obsluhy
- větší složitost – méně spolehlivé





# Úloha a postavení snímačů v systému

Elektronické měřicí a řídicí systémy = Měřící a řídicí systémy

- Podskupina obecných informačních systémů - systémy pro zpracování informací



např.  
síla  $F \Rightarrow$  dráha  $s \Rightarrow$  odpor  $R \Rightarrow$  napětí  $U$





# Inteligentní snímač (Smart Sensor)

- Inteligentní snímač obsahuje obvody pro
  - Zpracování
  - Analýzu
  - Unifikaci
- Někdy vše na jednom čipu, jindy senzor oddělen od mikroelektroniky
- Základní znaky Smart Sensoru:
  - Obousměrná komunikace
  - Diagnostika
  - Autokalibrace
  - Korekce chyb





## Rozdělení snímačů – podle měřené veličiny / principu

- Magnetické Indukce, intenzita, magnetický tok, magnetický odpor,
- Mechanické Délka, dráha, rychlosť, zrychlení, hmotnosť, síla, mechanické napětí, otáčky, výška hladiny, ...
- Optické Zářivá energie, intenzita, jas, ...
- Tepelné Teplo, teplota, tepelný tok, tepelný odpor, tepelná kapacita, ...
- Pneu – hydraulické tlak, tlaková differenčia, prútok, ...
- Akustické hlučnosť, akustický tlak, akustický odpor, ...
- Nukleární intenzita záření, ...
- Chemické koncentracia, pH, ...
- Biologické Energetický obsah, teplota, mozková aktivita





## Rozdělení snímačů – podle generací

- **Strojírenské technologie** – samostatný snímač sestavovaný ze strojírenských dílů (odporové, kapacitní, induktivní snímače)
- **Polovodičové** - jevy v polovodičových strukturách
- **Mikroelektronické snímače** – inteligentní (smart senzory)
- **Optické vláknové snímače** – využití fyzikálních principů šíření světla v optických vláknech





# Terminologie

- **Aktivní vs. pasivní snímač**
  - Aktivní – chová se jako zdroj elektrické energie.
  - Pasivní – potřebuje ke své funkci napájení, snímač moduluje dodanou elektrickou energii
- **Relativní vs. absolutní snímač**
  - Relativní – výstupní veličina je **úměrná** měřené veličině, konstanta úměrnosti je dána modifikujícím vstupem
  - Absolutní – výstupní veličina **odpovídá přímo** hodnotě měřené veličiny





## Rozdělení snímačů – podle transformace signálu

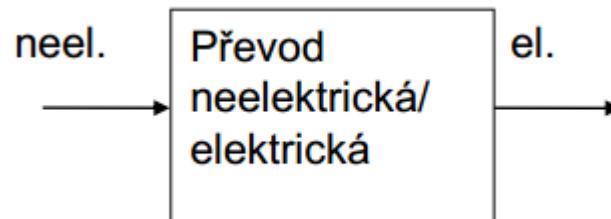
- **aktivní** (generátorové) – při práci snímače vzniká elektrická energie (termočlánek – na styku dvou kovů s rozdílnými teplotami konců vzniká napětí vlivem rozdílné výstupní práce obou kovů, piezoelektrické, indukční,...)
- **pasivní** (modulační) – snímač upravuje moduluje dodanou energii (změnou odporu snímače vlivem teploty protéká větší proud obvodem, kapacitní, indukčnostní,...)



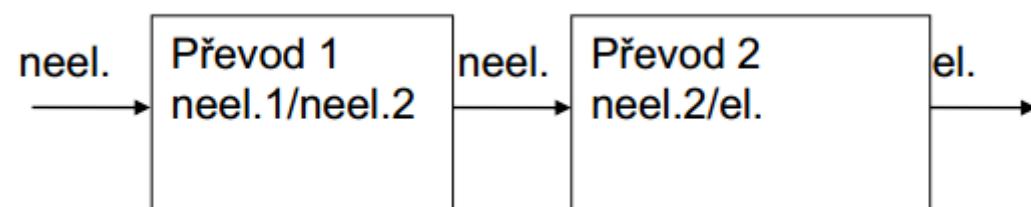


## Rozdělení snímačů – dle převodu měřené neelektrické veličiny na elektrickou

- **jednoduchý** (měřená veličina je přímo převedena na elektrickou veličinu - termočlánek)



- **několikanásobný** (měřená veličina je nejprve převedena na pomocnou veličinu a poté na elektrickou veličinu – výška hladiny je převedena na tlak a ten na odpor)





# Rozdělení snímačů – dle provedení

- snímače **diskrétní**
- snímače **hybridní** – část obvodu (nebo celý) pro zpracování signálu je konstrukčně spojen se snímačem
- snímače **integrované** (monolitické – část obvodu nebo celý obvod je vytvořen v integrované formě ve snímači.  
(Polovodičový tenzometr s integrovaným zpracováním)
  - Tenkovrstvá technologie: napařováním vrstev křemíku, izolantů a kovů, dále se aplikuje litografie a selektivní leptání
  - Tlustovrstvá technologie: pasta nanášená technologií sítostisku na keramickou či umělohmotnou podložku





# Metody měření

## Podle styku s měřeným objektem

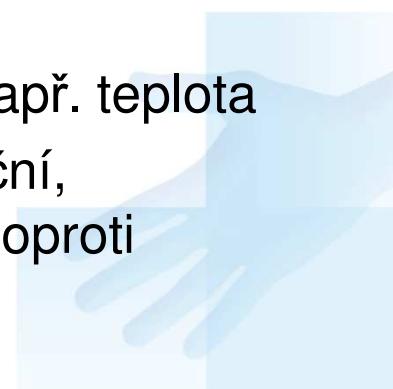
- **dotykové** – přímé spojení s měřeným objektem
- **bezdotykové** – na principu měření vyzařování nebo odrazu od měřeného předmětu
- **nitrotělní** – vložené do měřeného objektu

## Podle postupu

- **přímé** z měřené veličiny přímo získáváme její velikost
- **nepřímé** měřenou veličinu převádíme na pomocnou veličinu, kterou poté převádíme na měřený údaj

## Podle rozsahu

- **absolutní** – měříme celkovou velikost dané veličiny – např. teplota
- **srovnávací** (přímá, výchylková, substituční, kompenzační, diferenční) – např. tlak v pneumatikách je vlastně rozdíl oproti atmosférickému tlaku





# Rozdělení snímačů podle tvaru výstupního signálu

- **analogový** napěťový 0-10V, Proudový 0-20mA, 4-20mA, (spojitý)
- **digitální** (číslicový, diskrétní)
- **impulzní**
- **periodický** (kmitočtový)

## Podle přesnosti

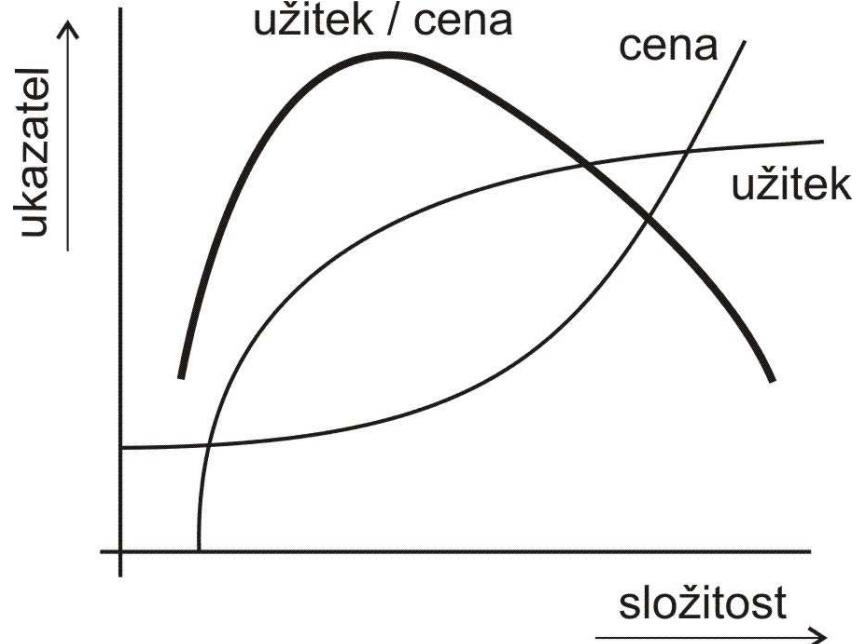
- **nižší** - pro všeobecná provozní použití
- **vyšší** - pro vědecké laboratorní účely dle veličiny chyba pod 0.1%





## Výběr snímače – obecné parametry

1. Jednoznačnost
2. Citlivost
3. Setrvačnost
4. Přesnost
5. Stálost (časová, teplotní)
6. Malá závislost na okolních vlivech
7. Minimální zatížení měřeného objektu
8. Spolehlivost
9. Konstrukce x složitost údržby
10. Cena náklady pořizovací a provozní





## Výběr snímače – další parametry

- Statické parametry
  - citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah
  - reprodukovatelnost, rozlišitelnost
  - aditivní a multiplikativní chyby, linearita
- Dynamické parametry
  - časová konstanta, mezní kmitočet
  - parametry časové odezvy
  - frekvenční rozsah
  - šumové parametry
- Parazitní vlivy
  - skladovací podmínky
  - krátkodobá a dlouhodobá teplotní stabilita
  - vliv teploty, tlaku, vlhkosti, kolísání napájení ...





## Průběžná kontrola studia - laboratoře

- V průběhu semestru absolvují studenti 10 laboratorních úloh. Cílem laboratorních úloh je praktické ověření přednášené problematiky.
- Před započetím laboratorní úlohy jsou studenti vždy přezkoušeni ze znalostí problematiky související s měřenou úlohou. Po změření úlohy vypracovávají protokol o úloze. Odevzdání protokolu je podmínkou pro zahájení měření další úlohy.
- Bodové hodnocení laboratorní úlohy se skládá z hodnocení přípravy na úlohu a hodnocení protokolu. Za každou laboratorní úlohu lze získat max. 3 body. Celkem lze za semestr získat 30 bodů. Podmínkou pro získání zápočtu je získání min. 15 bodů.





## Semestrální projekt

- Vyberte si neelektrickou veličinu. Najděte zařízení v průmyslu, které tuto neelektrickou veličinu měří. Seznamte se se způsobem měření této neelektrické veličiny. Zpracujte zprávu v rozsahu 10-20 stran A4. Použijte řádkování 1 a velikost písma 11. Používejte jednoduché formátování nejlépe výchozí nastavení programu Microsoft Word.

V této zprávě:

- Popište způsob měření vybrané veličiny v daném zařízení včetně obrázků a fotografií
- Popište další metody měření této veličiny
- Najděte nejméně tři další dodavatele měření této veličiny a doložte podklady výrobce nebo dodavatele včetně přibližné ceny.





## Zkouška a hodnocení

- Závěrečná zkouška: Podmínkou je udělený zápočet. Do bodového hodnocení závěrečné zkoušky se započítává semestrální projekt (max. 20 bodů). Závěrečná zkouška má část písemnou (max 40 bodů) a část ústní (max 10 bodů).
- Podmínkou pro uznání závěrečné zkoušky je zisk min. 35 bodů. Výsledné hodnocení předmětu je součtem bodů za semestr a závěrečnou zkoušku.
- Zápočet = laboratoře 30 bodů (10 úloh po 3 bodech)
- SP semestrální projekt 20 bodů
- ZK zkouška 50 (40 písemný test +10 ústní zkouška)
- SP + ZK > 35
- = Celkem 100 bodů





## Literatura

- Dubec, M., Skotnica, J., *Senzory a měření*. Elektronické skriptum, VŠB Ostrava, 2012, 318 stran
- RIPKA, P., ĎAĎO,S., KREIDL,M.: *Senzory a převodníky*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005, 135 stran
- ĎAĎO,S., KREIDL,M.: *Senzory a měřicí obvody*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996, 315 stran
- BEJČEK,L.: *Měření neelektrických veličin*. Skriptum, VUT Brno, 1988
- 5ti-dílná edice „Senzory neelektrických veličin“, BEN Praha, 2005-2007





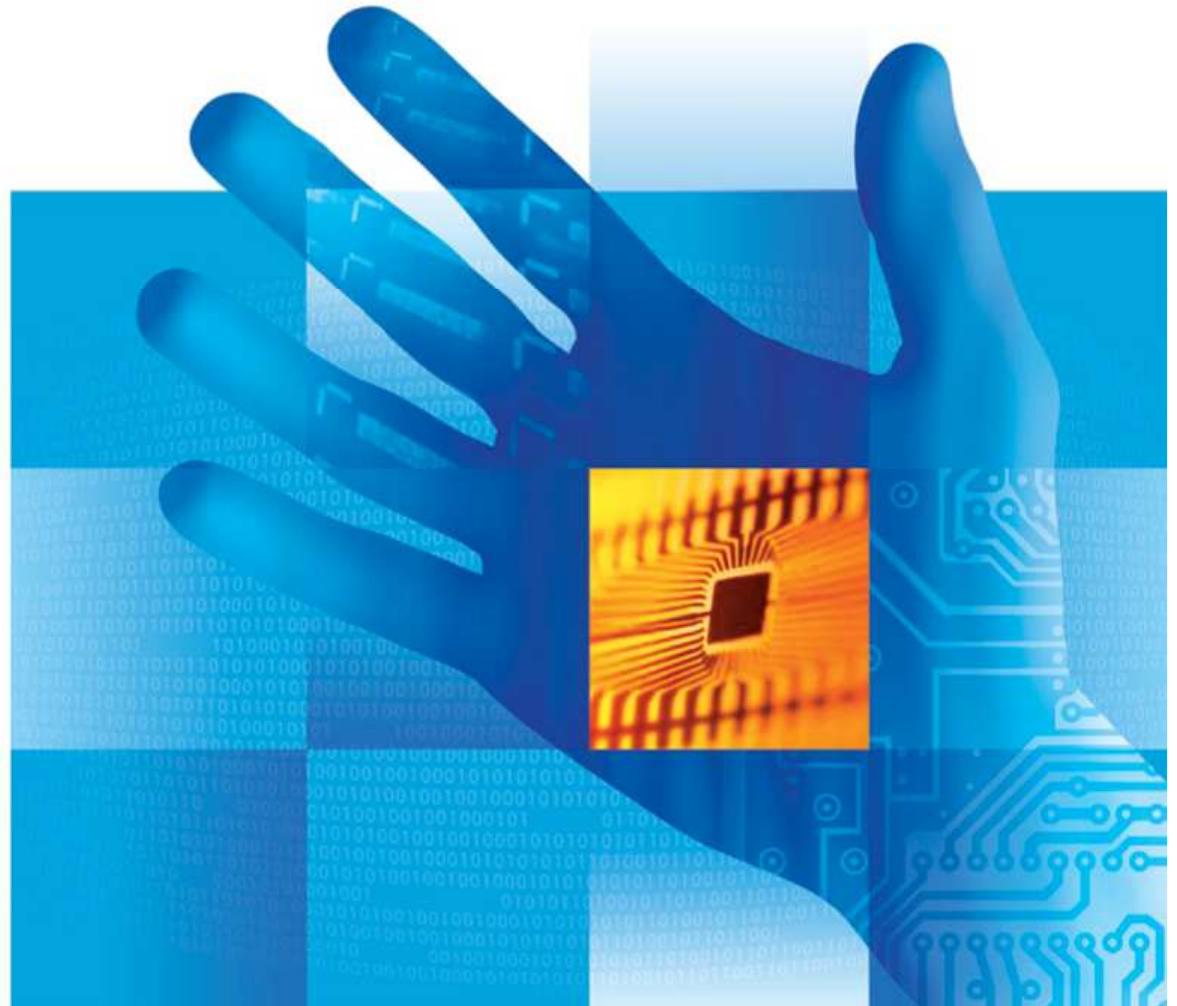
# Senzory a Měření

## 2 – Fyzikální a matematický model

Katedra 450

Fakulta elektrotechniky a informatiky

VŠB-TUO





# Obsah

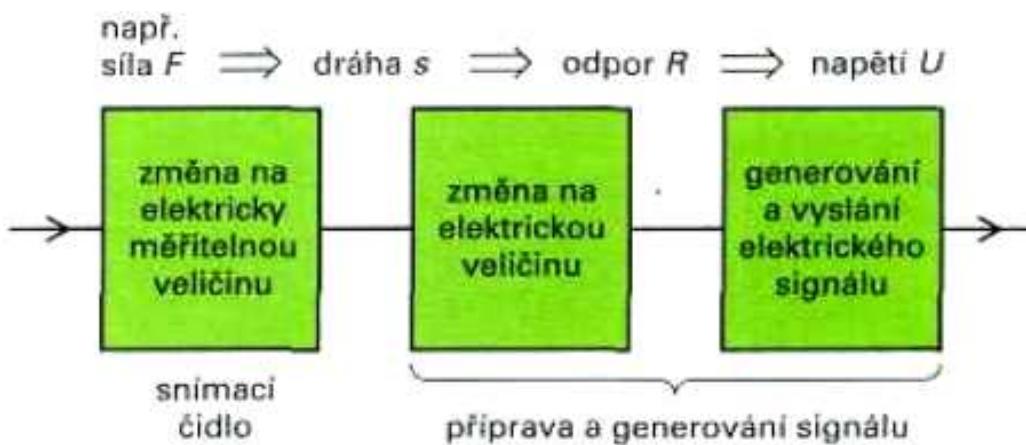
1. Fyzikální model snímače
2. Matematický model snímače
3. Statické vlastnosti snímačů
4. Dynamické vlastnosti





## Rekapitulace pojmu

- **Snímač** – (senzor + obvod pro zpracování signálu) je to člen pro sběr informací
- **Čidlo / senzor** (detektor, receptor) je převodníkem jedné fyzikální veličiny na jinou fyzikální veličinu
  - Odporový teploměr
  - Termočlánek
  - Senzor vlhkosti
  - Hladina





## Určení a princip snímače

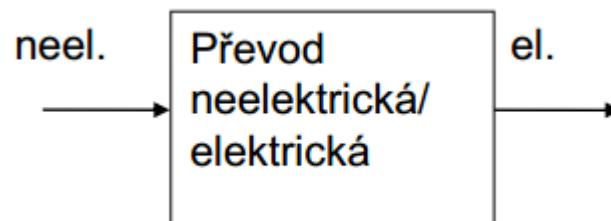
- Snímač je zařízení pro zpracování informace vázané na některý druh energie
- Snímač je primární zdroj informace v informačním řetězci.
- Nositelem informace je signál což je může být libovolná fyzikální veličina: tlak, teplota, hladina, poloha
- V průběhu funkce senzoru (měření) dochází k toku informace o měřené veličině a k toku energie mezi jednotlivými částmi snímače.



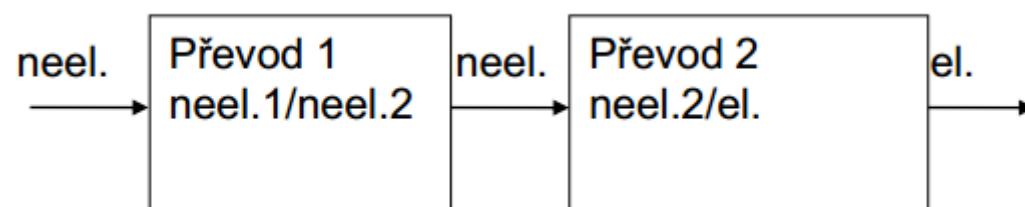


# Převod měřené neelektrické veličiny na elektrickou

- **jednoduchý** (měřená veličina je přímo převedena na elektrickou veličinu - termočlánek)



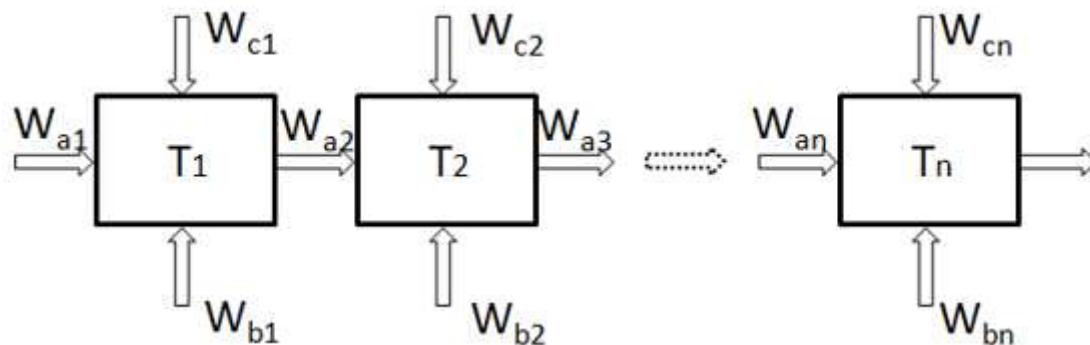
- **několikanásobný** (měřená veličina je nejprve převedena na pomocnou veličinu a poté na elektrickou veličinu – výška hladiny je převedena na tlak a ten na odpor)





## Fyzikální model snímače

- Znázorňuje a popisuje tok informace snímačem.
- Znázorňuje podrobně jednotlivé *vnitřní* stupně z hlediska toku a *přeměny energie a informace*



- $W_a$  – energie, (zobecněná síla) určující tok informace do snímače
- $W_b$  – energie rušení narušující transformaci vstupní informace (vliv okolí)
- $W_c$  – energie z pomocného zdroje pro zajištění transformace (pro pasivní snímače)





# Matematický model snímače

- Sestavení modelu je závislé na znalosti fyzikálního jevu a jeho matematického popisu.
- Komplexní matematický popis je velmi složitý – obvykle několik transformací vstupní energie, proto rozdělujeme komplexní model do dvou modelů:
  - model základních vztahů mezi ustálenými hodnotami vstupního a výstupního signálu (citlivost, linearita, stálost, vliv okolí, časová stálost) – **statický model**.
  - **model dynamického** chování (časové a frekvenční závislosti).





# Statické a dynamické vlastnosti snímačů

- **Matematický popis vlastností při současném uvažování statických i dynamických vlastností senzoru je velmi složitý**, proto se volí raději přístup, při kterém se statické a dynamické chování senzoru popisuje odděleně.
- **Statická charakteristika** popisuje chování v ustáleném stavu. (převodní char.)
- **Dynamická charakteristika** popisuje chování při rychlých změnách měřené veličiny.





## Statická převodní charakteristika

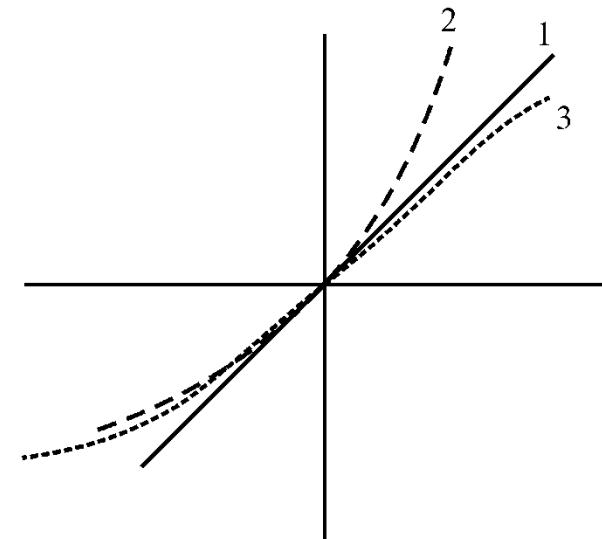
- Vztah mezi vstupní  $x$  a výstupní veličinou  $y$  členu v časově ustáleném stavu.
- Obecně funkční závislost:  $y = f(x)$   $y(x) = F(x(t)) + x_d(t)$
- Popis polynomem  $y = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n)$
- Zjednodušení (K – citlivost)  $y = K \cdot x$
- V praxi lze ideální převodní charakteristiku nahradit **kalibrační křivkou** senzoru.

$$1. y = a_0x$$

$$2. y = a_0x + a_1x^2 + a_3x^4 + \dots$$

$$3. y = a_0x + a_2x^3 + a_4x^5 + \dots$$

$$3. y = a_0x + a_1x^2 + a_2x^3 + a_3x^4 + \dots$$





## Statická převodní charakteristika

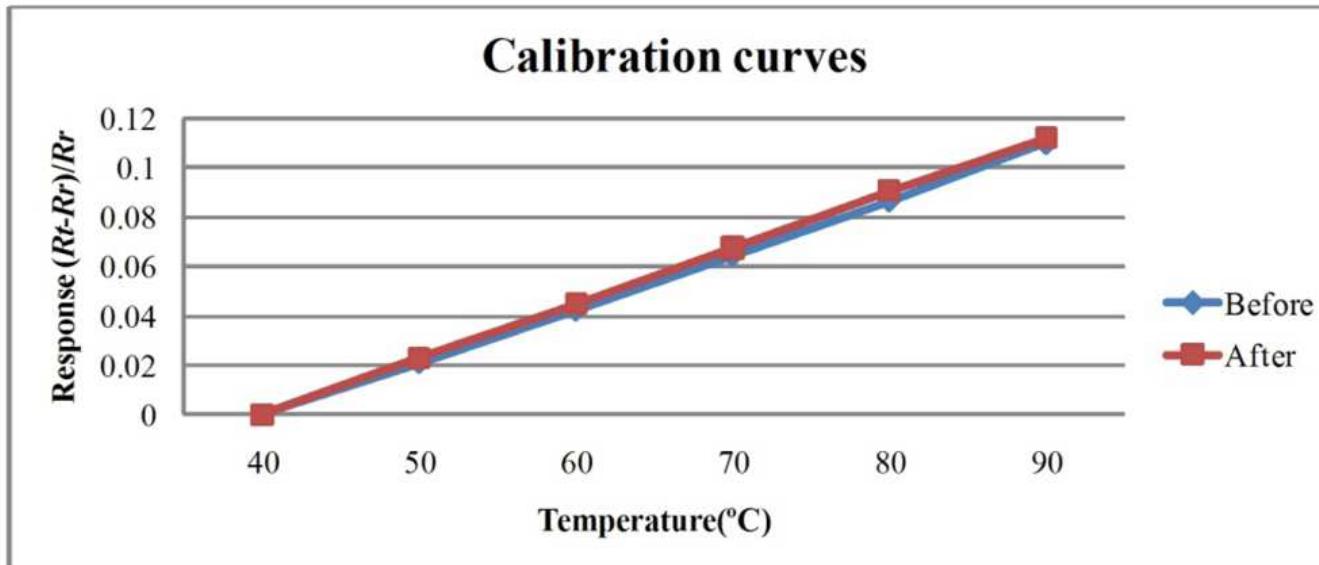
- Zjednodušení ( $K$  – citlivost)  $y = K \cdot x$

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

- Je-li fce  $f(x)$  složitá – regresní funkce metoda nejmenších čtverců

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

- Kalibrační křivka





# Chyby snímače podle způsobu vyjádření

- **Absolutní**

$$\Delta_T = y_N - y_S$$

- **Relativní ( poměrná )**

$$\delta = \frac{y_N - y_S}{y_{FS}} \quad ; \quad \delta_T = \frac{\Delta_T}{y_{FS}}$$

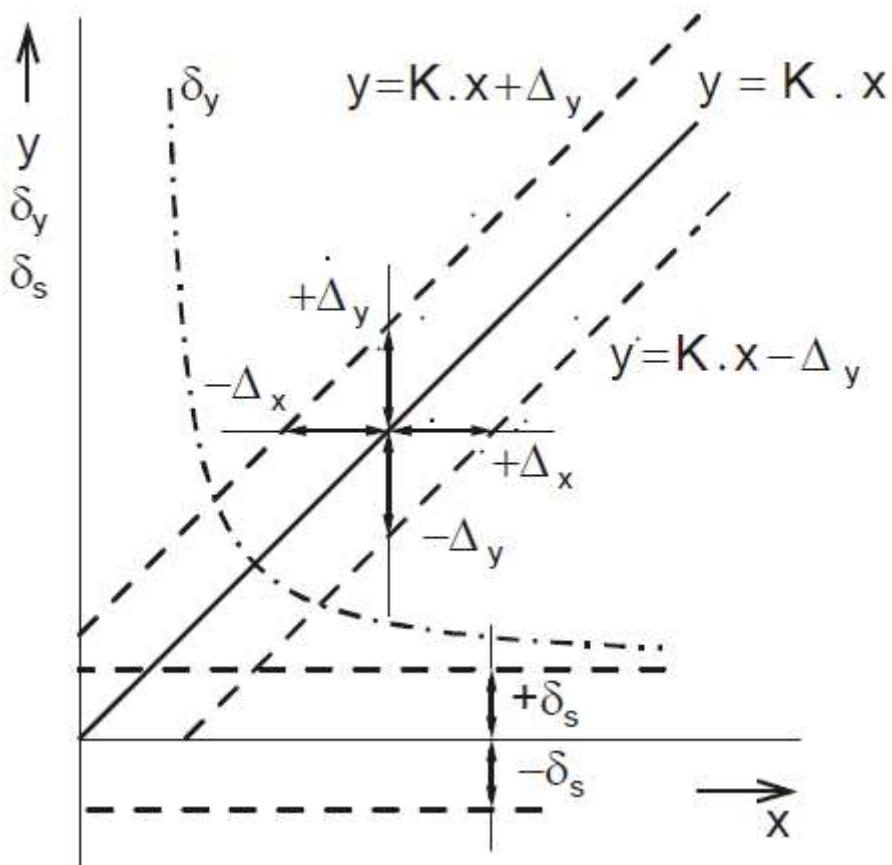
- $\Delta_T$  největší možná absolutní chyba snímače,
- $y_N$  je naměřená hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_S$  konvenčně pravá hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_{FS}$  maximální hodnota měřícího rozsahu,
- $\delta_T$  největší možná relativní chyba snímače.





# Chyby převodní charakteristiky - aditivní

Chyba **aditivní** (offset, posun nuly),  $\Delta_T$



$$|\Delta_y| \leq |\Delta_T| = \text{konst}$$



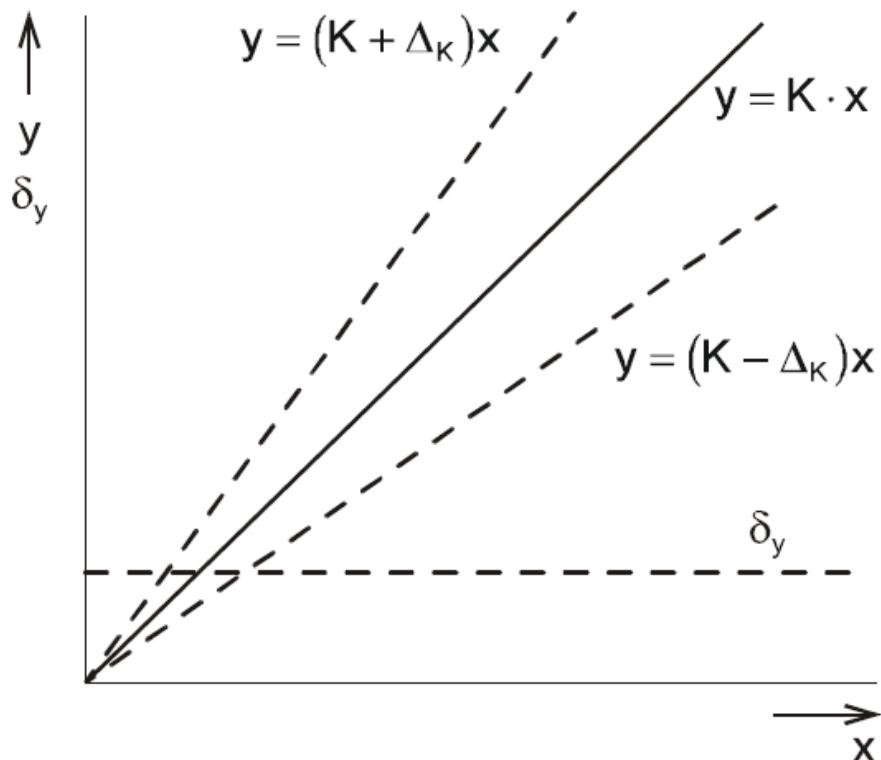


# Chyby převodní charakteristiky - multiplikativní

Chyba **multiplikativní** (zesílení, změna citlivosti, závislá na hodnotě měř. vel.)

absolutní odchylka  $|\Delta_y|$  od ideální charakteristiky je úměrná veličině  $x$  nebo relativní chyba  $\delta_y = \text{konst}$

**multiplikativní chyba** absolutní  $\Delta_k$  nebo relativní  $\delta$





## Chyby převodní charakteristiky

1) ideální charakteristika

$$K_S = \frac{y}{x}$$

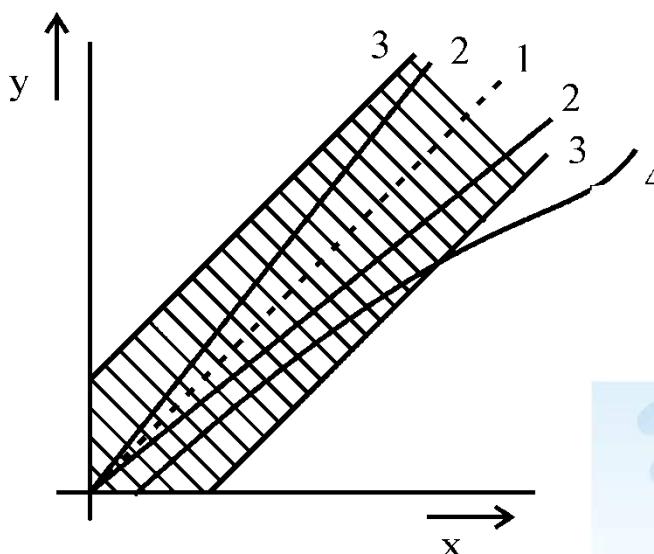
2) skutečná char.

$$\Delta_y = K_N x - K_S x = \Delta_K x$$

absolutní odchylka  $|\Delta_y|$  od ideální charakteristiky je úměrná veličině  $x$   
neboli relativní chyba  $\delta_y = \text{konst}$  **multiplikativní chyba** absolutní  $\Delta_k$  nebo  
relativní  $\delta_k$

3) skutečná char.  $\Delta_T$  **chyba aditivní**  
obecná charakteristika.

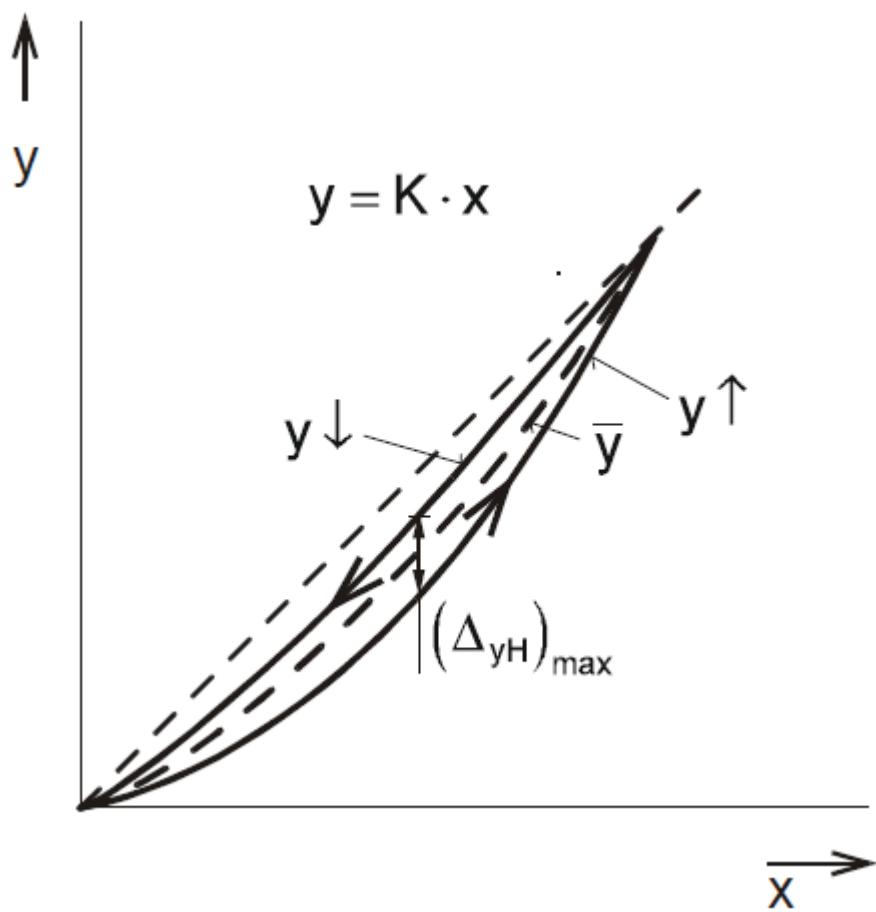
$$|\Delta_y| \leq |\Delta_T| = \text{konst}$$





## Další statické vlastnosti snímačů

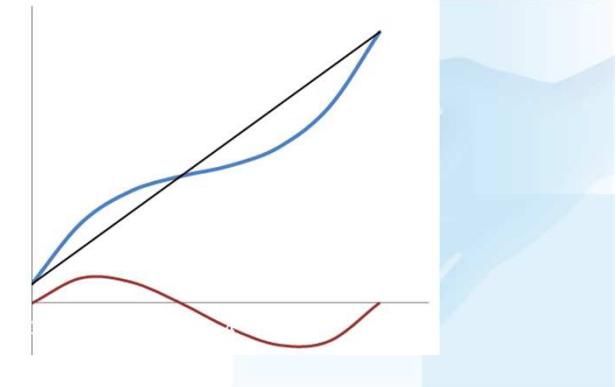
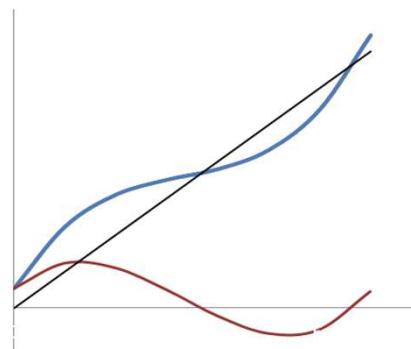
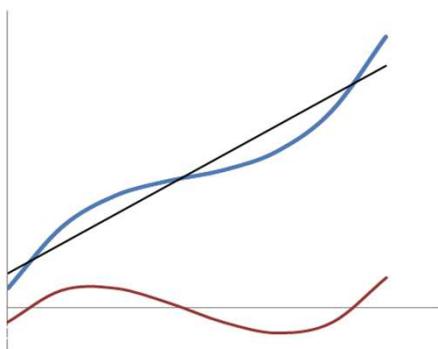
- **Chyba hystereze** je závislost výstupního údaje snímače na směru změny velikosti vstupního signálu





## Chyba linearity

- **Chyba linearity** je odchylka skutečné charakteristiky od ideální (přímkové).
- Lineární charakteristika znamená, že citlivost na vstupní signál je konstantní v celém měřicím rozsahu
- Odchylka čili chyba linearity  $L$  je dána maximální odchylkou  $\delta$  od přímky v intervalu měření.





## Přesnost snímače (accuracy)

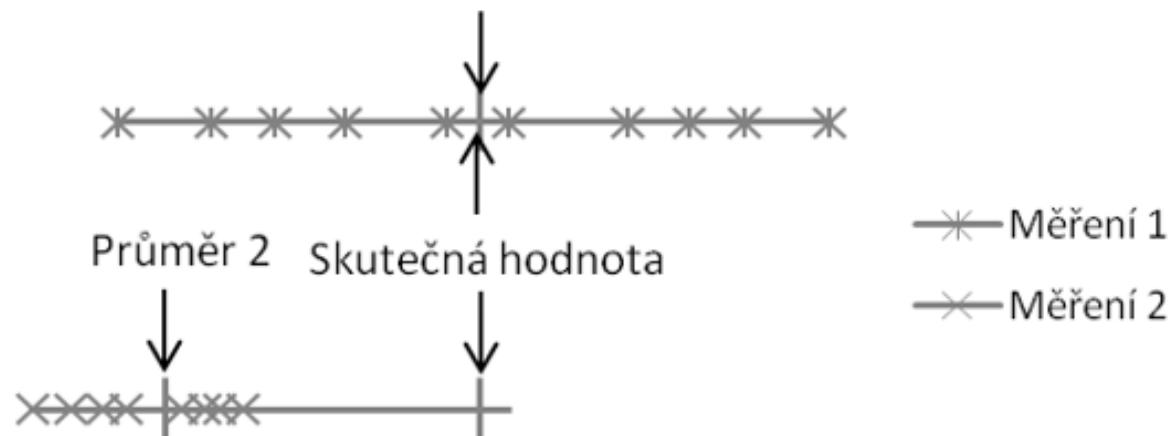
- Schopnost snímače dávat na výstupu **pravé hodnoty** signálu (tj. hodnoty, které se zanedbatelně liší od skutečné hodnoty).
- **Základní chyba** - chyba při dodržení předepsaných referenčních (vztažných) podmínek ( $^{\circ}\text{C}$ , %, f)
  - Dle charakteru nasazení snímače vybíráme snímač s požadovanou přesností, řešíme dilema cena vs. přesnost
- **Vedlejší chyba** - dodatkové, přídavné – snímač se používá za jiných podmínek než referenčních
- Přesnost se většinou vyjadřuje celkovou chybou tedy součtem základní a vedlejší ch.





# Preciznost (precision)

Schopnost dávat **stejnou** hodnotu při opakovém měření **stejné** veličiny za **stejných** podmínek. Vypovídá o opakovatelnosti měření.





# Chyby snímače podle způsobu vyjádření

- **Absolutní**

$$\Delta_T = y_N - y_S$$

- **Relativní ( poměrné )**

$$\delta = \frac{y_N - y_S}{y_{FS}} \quad ; \quad \delta_T = \frac{\Delta_T}{y_{FS}}$$

- $\Delta_T$  největší možná absolutní chyba snímače,
- $y_N$  je naměřená hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_S$  konvenčně pravá hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_{FS}$  maximální hodnota měřícího rozsahu,
- $\delta_T$  největší možná relativní chyba snímače.





## Chyby snímače dle výskytu

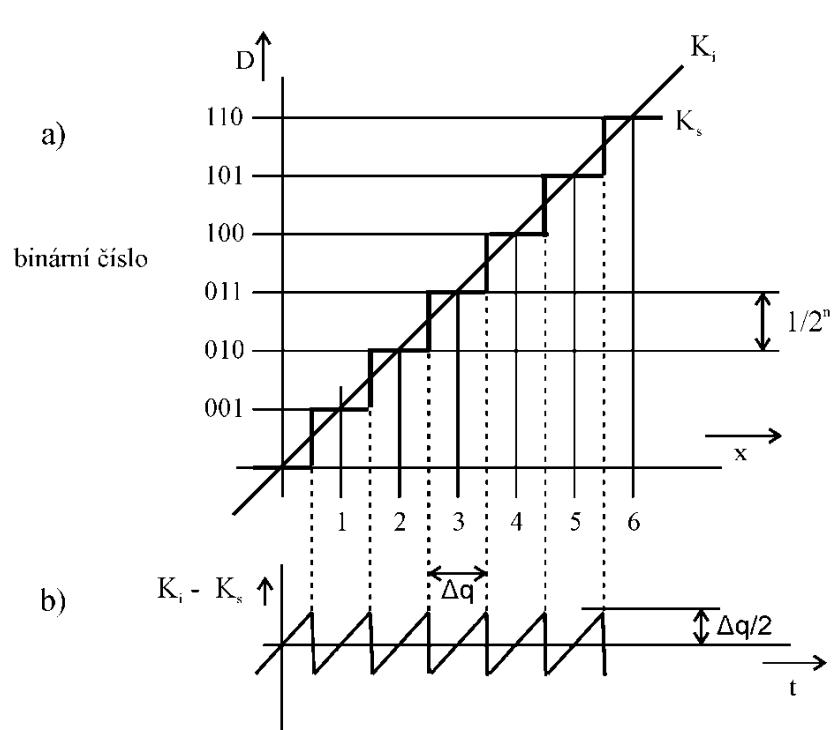
- **Soustavné** (systematické) - určující tzv. správnost údaje, způsobeny nedokonalostí snímačů, při opakovaném měření za stejných podmínek mají stejné znaménko a absolutní hodnotu, nebo se periodicky mění. Lze je odhalit ...
- **Nahodilé** - určující tzv. stálost snímače. mění náhodným způsobem znaménko i absolutní hodnotu, normální, gausovo rozložení pravděpodobnost





# Chyby snímače u digitálních signálů

- **Kvantování - N pásem**, ( $x_M$  měřicí rozsah)  
 $\Delta_q = \frac{1}{N} x = \frac{1}{2^n} x_M$
- Max. hodnota kvant chyby       $\Delta_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n} x_M$
- Max. relat. kvan. chyba (rc – rozlišovací schopnost)  
 $\delta_k = \frac{\Delta_k}{x_M} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n} = r_c$
- Výsledná chyba       $\delta_V = \delta_a + \delta_{kvM}$
- např.  $\delta_V = 0.002\% + \frac{1}{2} \text{ LSB}$
- U digit přístrojů  
d – počet jednotek s nejmenší váhou  
zobr. zařízení       $\delta_V = \delta_a + d$





## Vlastnosti snímačů

- **Dynamický rozsah** je interval přípustných hodnot snímané veličiny. Dole začíná na práhu citlivosti a nahoře končí maximální hodnotou měřené veličiny
- **Práh citlivosti** (Threshold) snímače je hodnota snímané veličiny, při níž je na výstupu snímače signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu snímače. Pro napěťový signál je práh citlivosti
- **Rozlišitelnost** je dána hodnotou snímané veličiny při níž je na výstupu snímače signál odpovídající směrodatné odchylce (efektivní hodnotě) šumu snímače. Navíc u snímačů s číslicovým zpracováním je rozlišitelnost omezena na 1 LSB.
- **Práh citlivosti** (mrtvé pásmo, threshold) statické tření





## Další pojmy

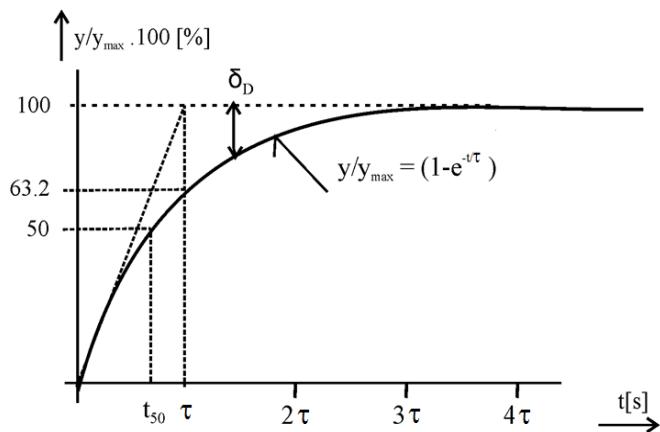
- **Rozlišení** (resolution)
- **Opakovatelnost** (repeatability)
- **Reprodukční** (reproducibility)
- **Drift** (drift)





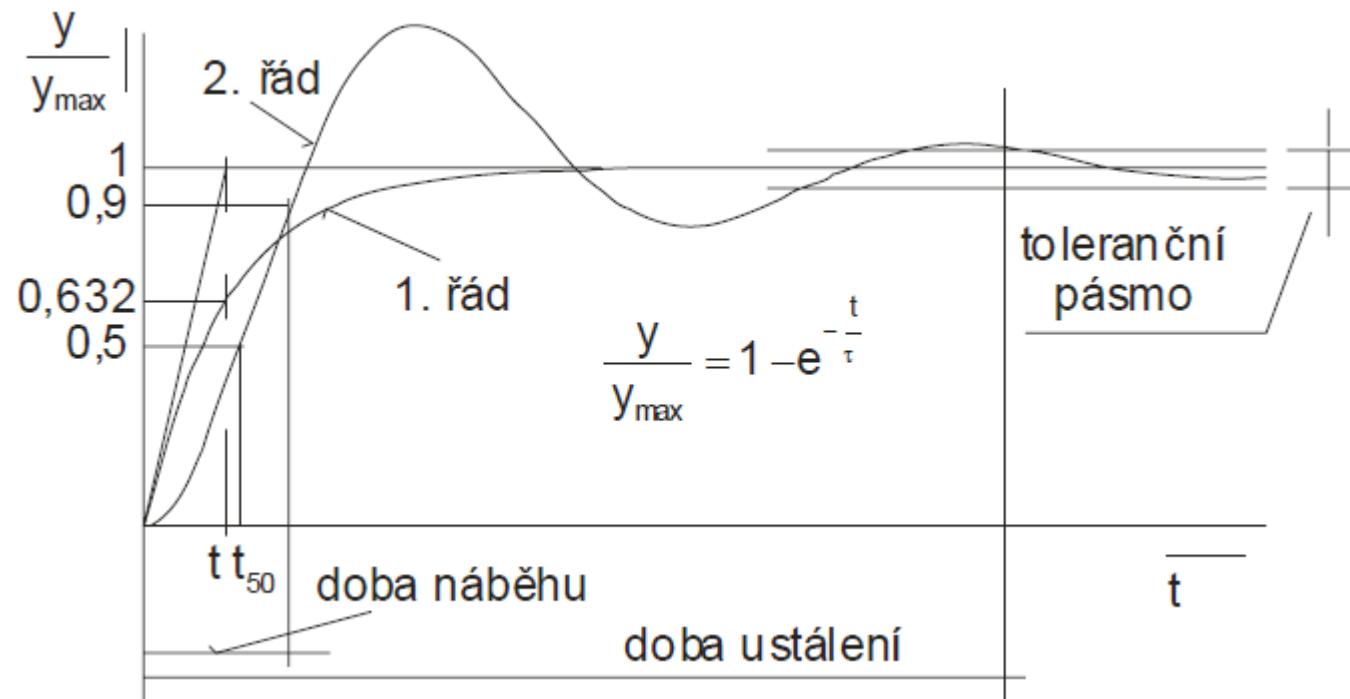
## Dynamické vlastnosti snímačů

- Měřená veličina se mění s časem
- Ideál: výstupní signál  $y(t)$  ze snímače musí sledovat s minimálním zkreslením vstupní signál  $x(t)$ .
- Musíme znát časové konstanty, zesílení a průběh měřené veličiny
  - Dynamická chyba při konstantní rychlosti změny měřené veličiny.
  - Dynamická chyba při skokové změně vstupní veličiny.



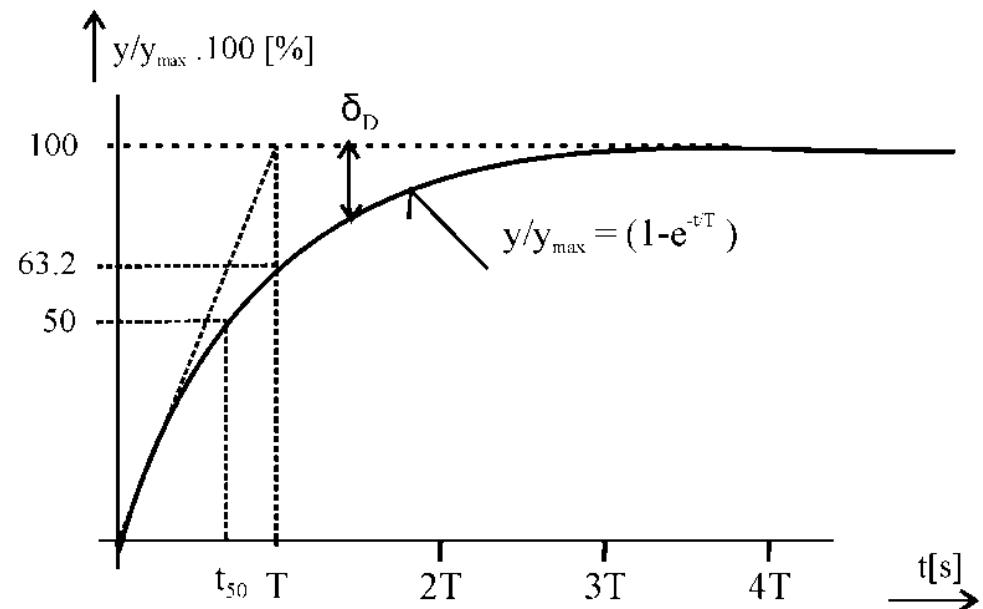


# Dynamické vlastnosti snímačů – skoková změna



# Dynamická chyba při skokové změně

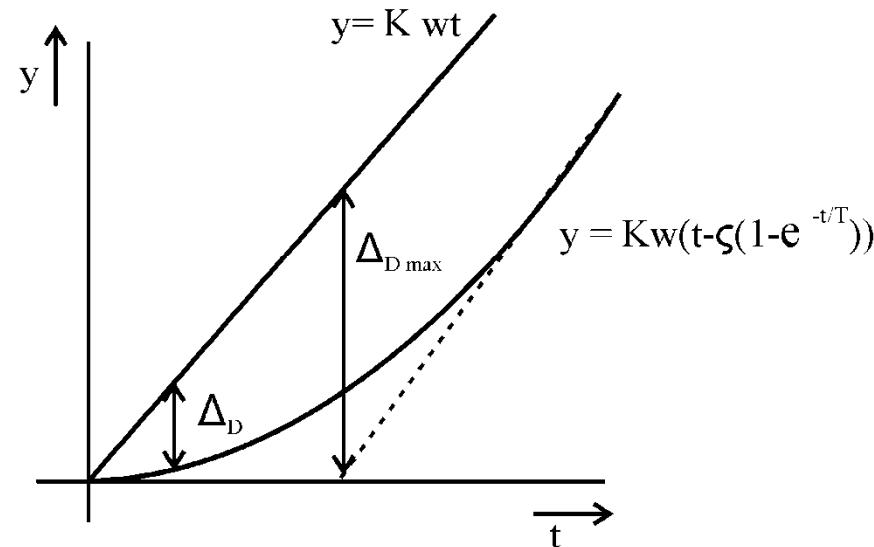
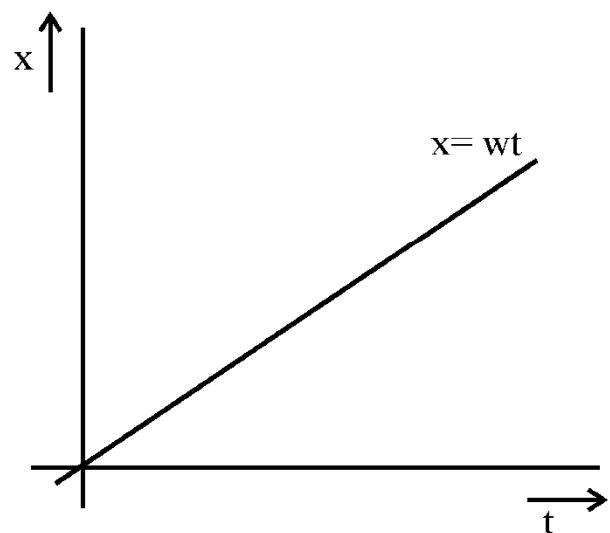
- Skoková změna měřené veličiny a vyšetřování reakce snímače na ni
- V časové oblasti:
  - Časová konstanta (Time constant) 0-63%,
  - Doba náběhu (Rise Time) 10-90%
- Ve frekvenční oblasti:
  - Frekvenční charakteristika,
  - Šířka pásma (pro pokles o 3dB),





## Dynamická chyba při konst. rychlosti změny

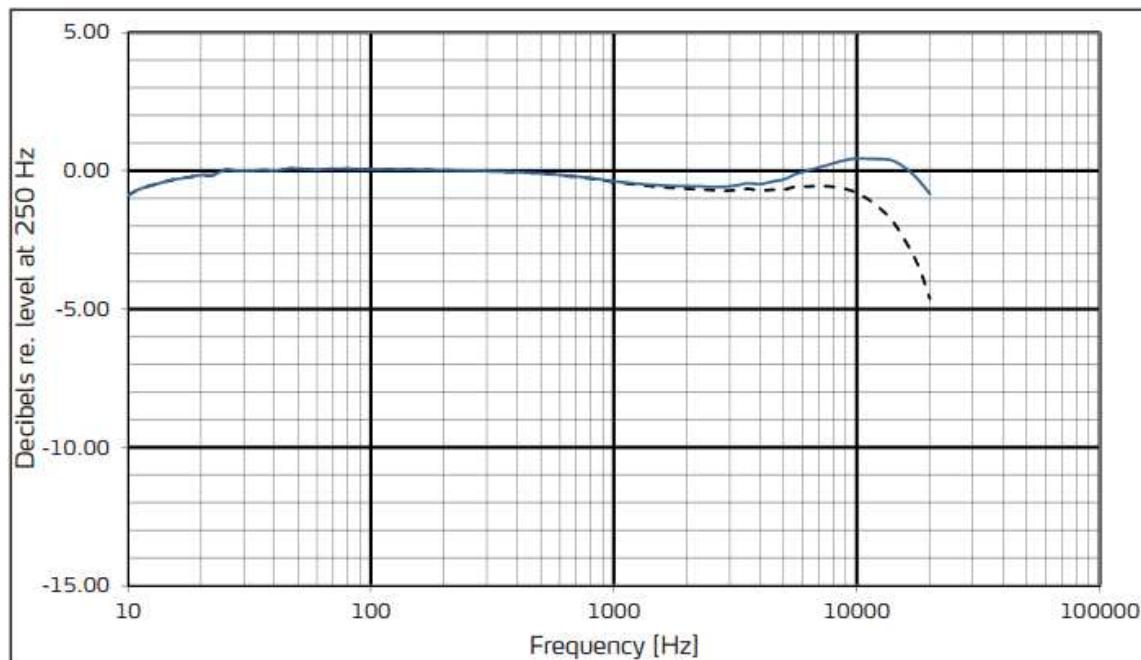
- Měřená veličina roste konstantní rychlostí v čase.





## Frekvenční charakteristika snímače

- Výstupní signál snímače v závislosti na frekvenci změny měřené veličiny



### Frequency Response (re. 250 Hz):

±3dB .....	10Hz - 50Hz
±1dB .....	50Hz - 5kHz
±2dB .....	5kHz - 20kHz

### Phase Match:

50Hz - 100Hz .....	±5°
100Hz - 3kHz .....	±3°
3kHz - 5kHz .....	±5°
5kHz - 10kHz .....	±10°





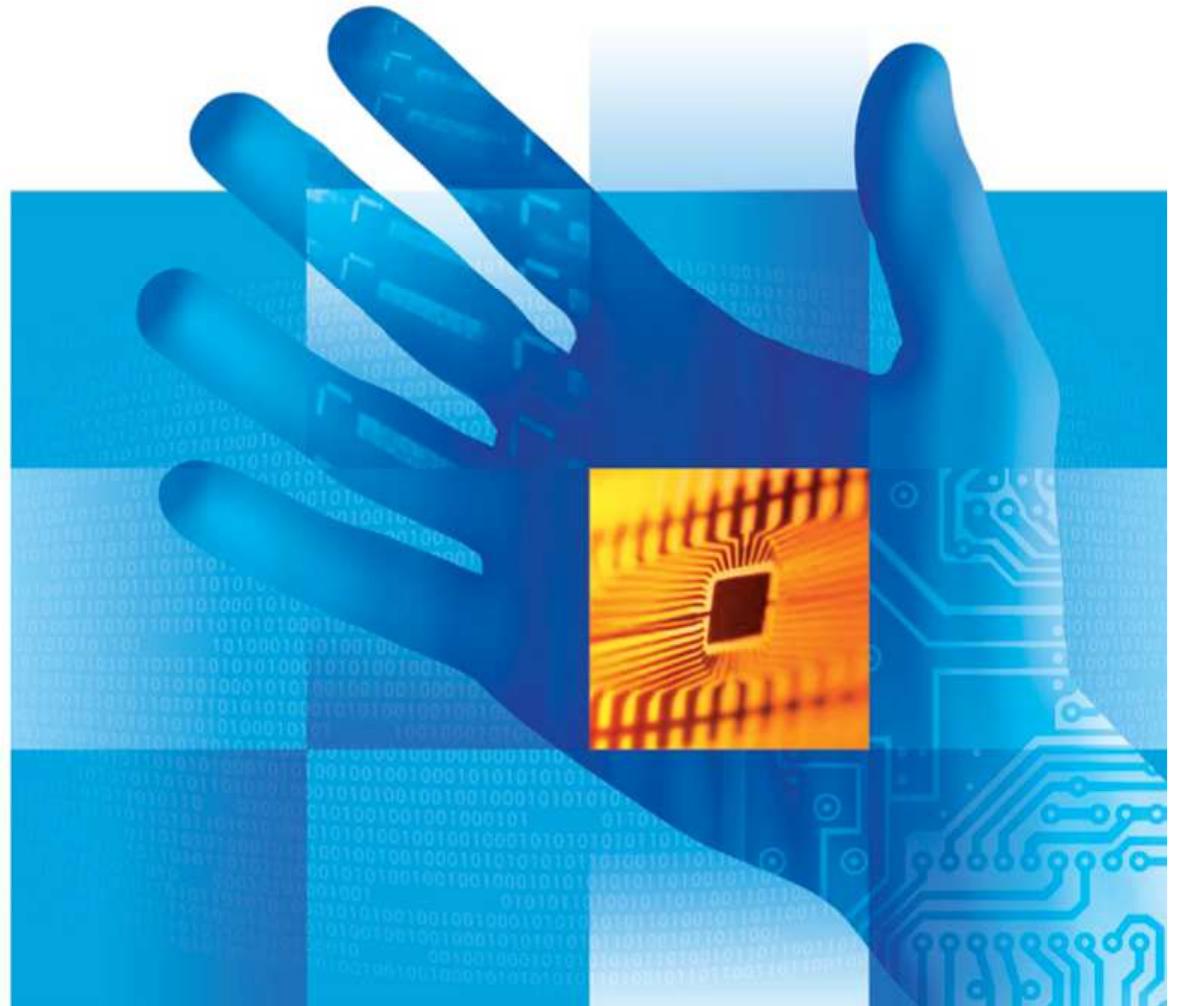
# Senzory a Měření

## 3 – Principy a přenos informace

Katedra 450

Fakulta elektrotechniky a informatiky

VŠB-TUO





## Obsah

1. Fyzikální principy snímačů
2. Informace dodaná snímačem
3. Měřicí řetězec
4. Měřicí údaj
5. Připojení snímače
6. Systémy pro měření a sběr údajů - Měřicí soustavy





## Spojitý a diskrétní signál

- AN: amplituda signálu se mění spojitě v daném rozsahu a čase,
  - může v kterémkoliv okamžiku nabývat libovolnou hodnotu uvnitř daného intervalu hodnot výstupní veličiny.
  - Patří sem také signály v časové doméně, kde informace je nesena časovými vztahy (periodou nebo  $f$ , délkou pulzu nebo fázovým posunem).
- DIG: Digitální signál je kvantován a kódován.
  - může nabývat pouze určitého počtu diskrétních hodnot a tyto hodnoty jsou vyjádřeny kódem, tj. kombinací nebo posloupností stavů





# OPAKOVÁNÍ: Chyby snímače

- **Absolutní**

$$\Delta_T = y_N - y_S$$

- **Relativní ( poměrné )**

$$\delta = \frac{y_N - y_S}{y_{FS}} \quad ; \quad \delta_T = \frac{\Delta_T}{y_{FS}}$$

- $\Delta_T$  největší možná absolutní chyba snímače,
- $y_N$  je naměřená hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_S$  konvenčně pravá hodnota výstupní veličiny snímače,
- $y_{FS}$  maximální hodnota měřícího rozsahu,
- $\delta_T$  největší možná relativní chyba snímače.



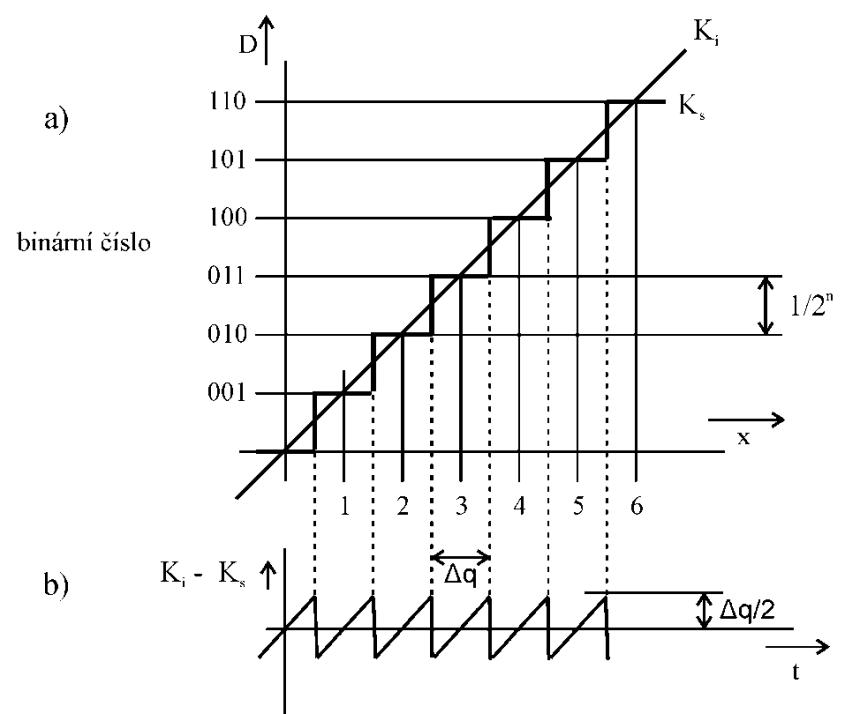


# OPAKOVÁNÍ: Chyby snímače u digitálních signálů

- **Kvantování - N pásem**, ( $x_M$  měřicí rozsah)
- Max. hodnota kvant chyby  $\Delta_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n} x_M$
- Max. rel. kvan. chyba (rc – rozlišovací schopnost)

$$\Delta_q = \frac{1}{N} x = \frac{1}{2^n} x_M$$

$$\delta_k = \frac{\Delta_k}{x_M} = \frac{1}{2} \frac{1}{2^n} = r_c$$





## Informace dodaná snímačem

- Chyba, obsažená v signálu omezuje množství přenášené informace. Chybu lze interpretovat jako „typ kvantování“ analogového signálu.
- Pokud je relativní chyba signálu  $\delta$ , pak lze celý měřicí rozsah  $Y_{\max}$  rozdělit na  $N$  pásem o šířce  $\Delta y$ :
- Velikost informace je dána přesností (chybou)
  - Analog. signál – rozsah rozdělíme na pásmá o šířce  $\Delta y = 2\delta \cdot Y_{\max}$
  - Počet pásem (tedy to co u ADC je  $2^N$ )
  - Množství Informace analogového signálu (v bitech)

$$N = \frac{Y_{\max}}{\Delta y} = \frac{1}{2\delta}$$

$$I = \log_2 \frac{1}{2\delta}$$



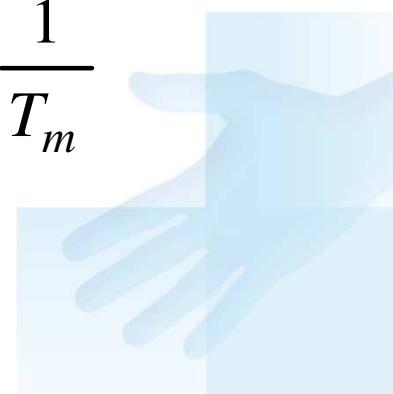
## Informace dodaná snímačem (skoková změna)

- Po skokové změně vstupu veličiny se měřená hodnota se ustálí až po určitém čase. Jestliže má být zachována přesnost měření, musí být údaj změřen až po ustálení.
- Přenosová kapacita (propustnost)
  - $T_m$  počet měření za jednotku času
  - $C$  množství informace za časovou jednotku (bit/s) – **propustnost** (přenosová kapacita kanálu)

$$C = I \cdot \frac{1}{T_m}$$

$$I = \log_2 \frac{1}{2\delta}$$

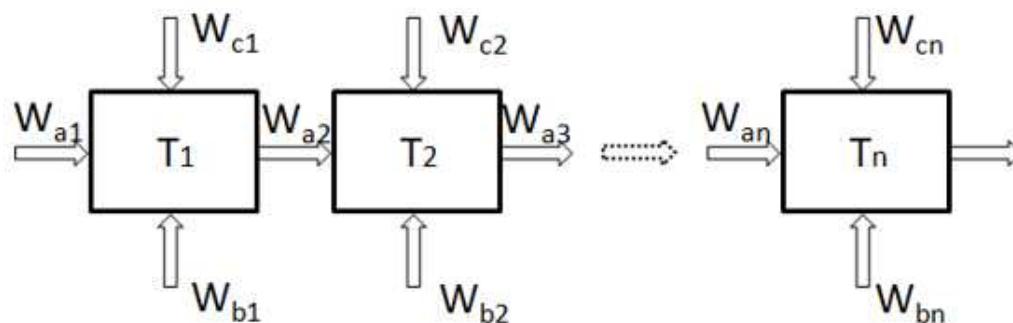
$$C = \log_2 \frac{1}{2\delta} \cdot \frac{1}{T_m}$$





## Informace dodaná snímačem

- Snímač s několikanásobným převodem (3 varianty)
  - propustnost druhé části snímače je vyšší než první části –  $C_1 < C_2$ , pak nadbytečnost  $C_2$
  - propustnosti jsou obou částí snímačů jsou stejné – nejlepší případ  $C_1 = C_2$
  - propustnost druhé části snímače je nižší než první části –  $C_1 > C_2$ , pak dochází ke ztrátě (filtrace)



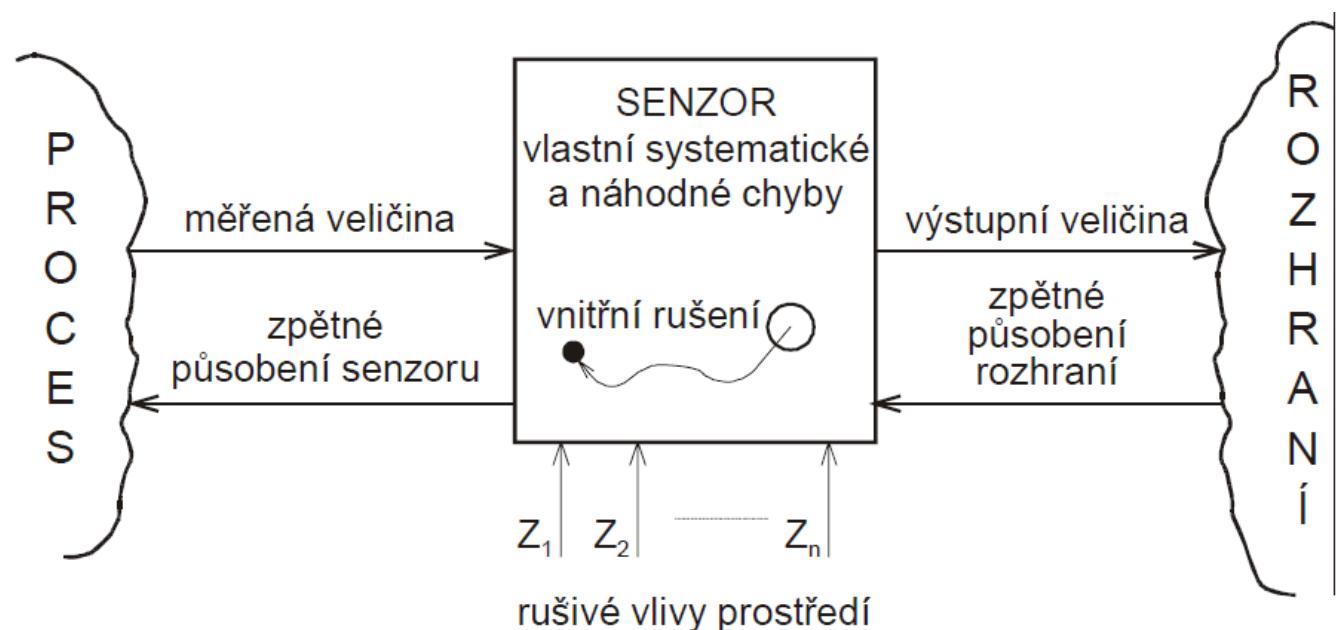


## Zdroje CHYB snímače

senzory při reakci na vnější vstupní podnět dávají výstupní signál zatížený také vnitřními a vnějšími parazitními vlivy.

Zdrojem chyb může být:

- vliv okolního prostředí
- zpětný vliv senzoru na měřený jev
- zpětné působení měřicího řetězce na senzor
- vnitřní rušení





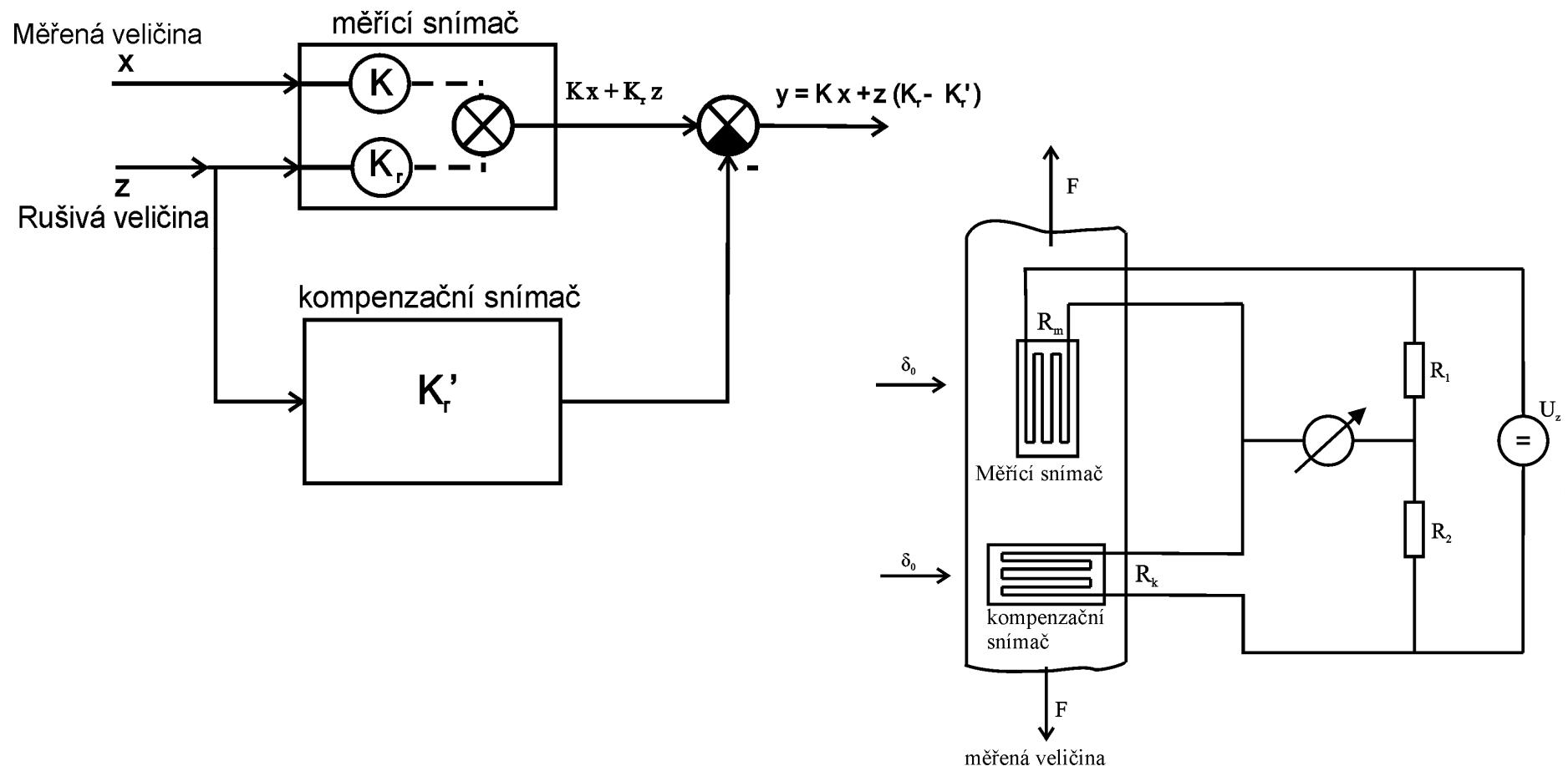
## Metody zmenšení CHYB snímačů

- Metoda kompenzačního snímače
- Metoda diferenčního snímače
- Metoda zpětnovazebního snímače
- Metoda linearizace
- Metoda kalibrace
- Metoda filtrace

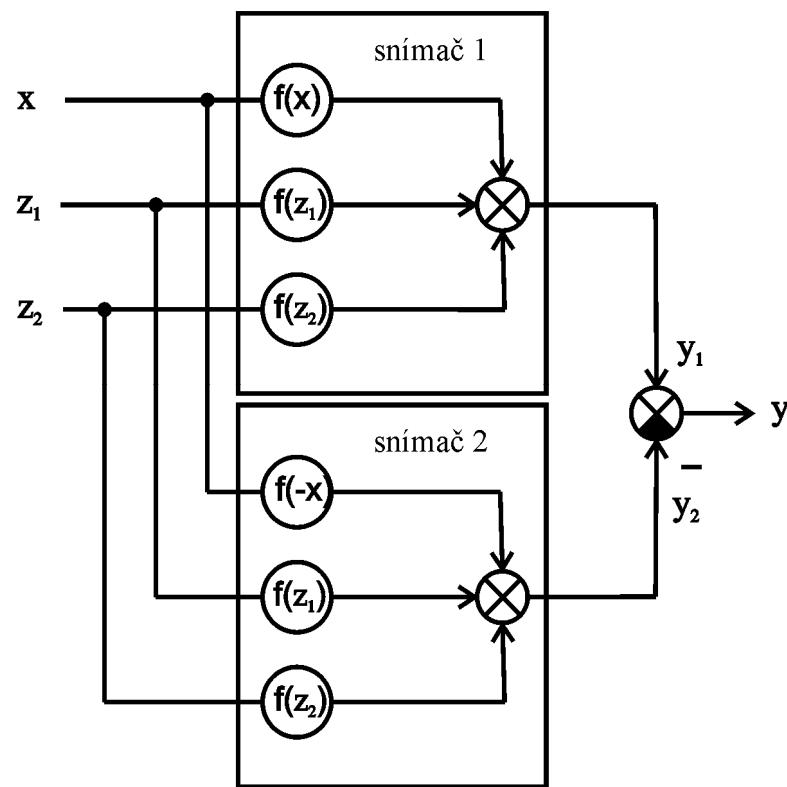


## Metoda kompenzačního snímače

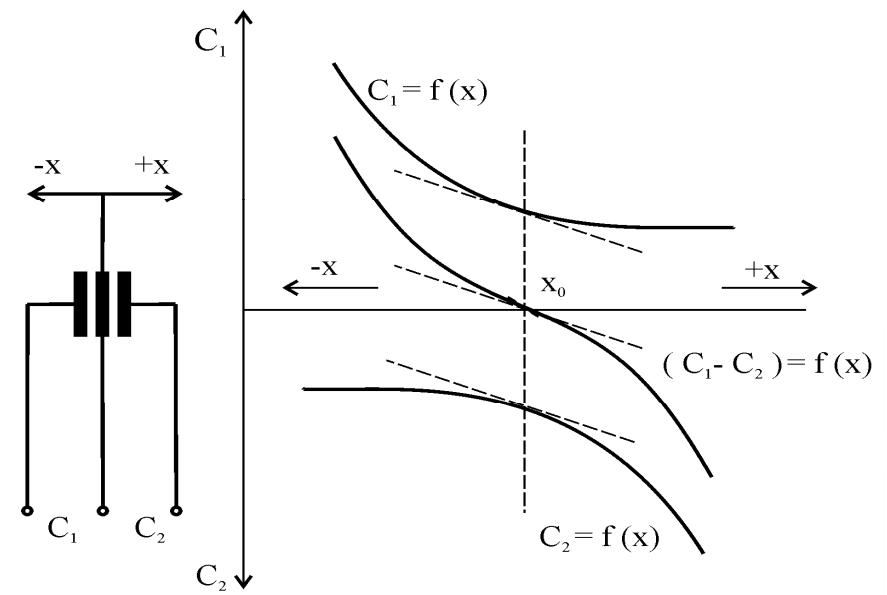
Podmínkou je rovnost přenosových konstant  $K_r$  a  $K'_r$ , určujících působení rušivé veličiny na měřící a kompenzační senzor.



# Metoda diferenčního snímače



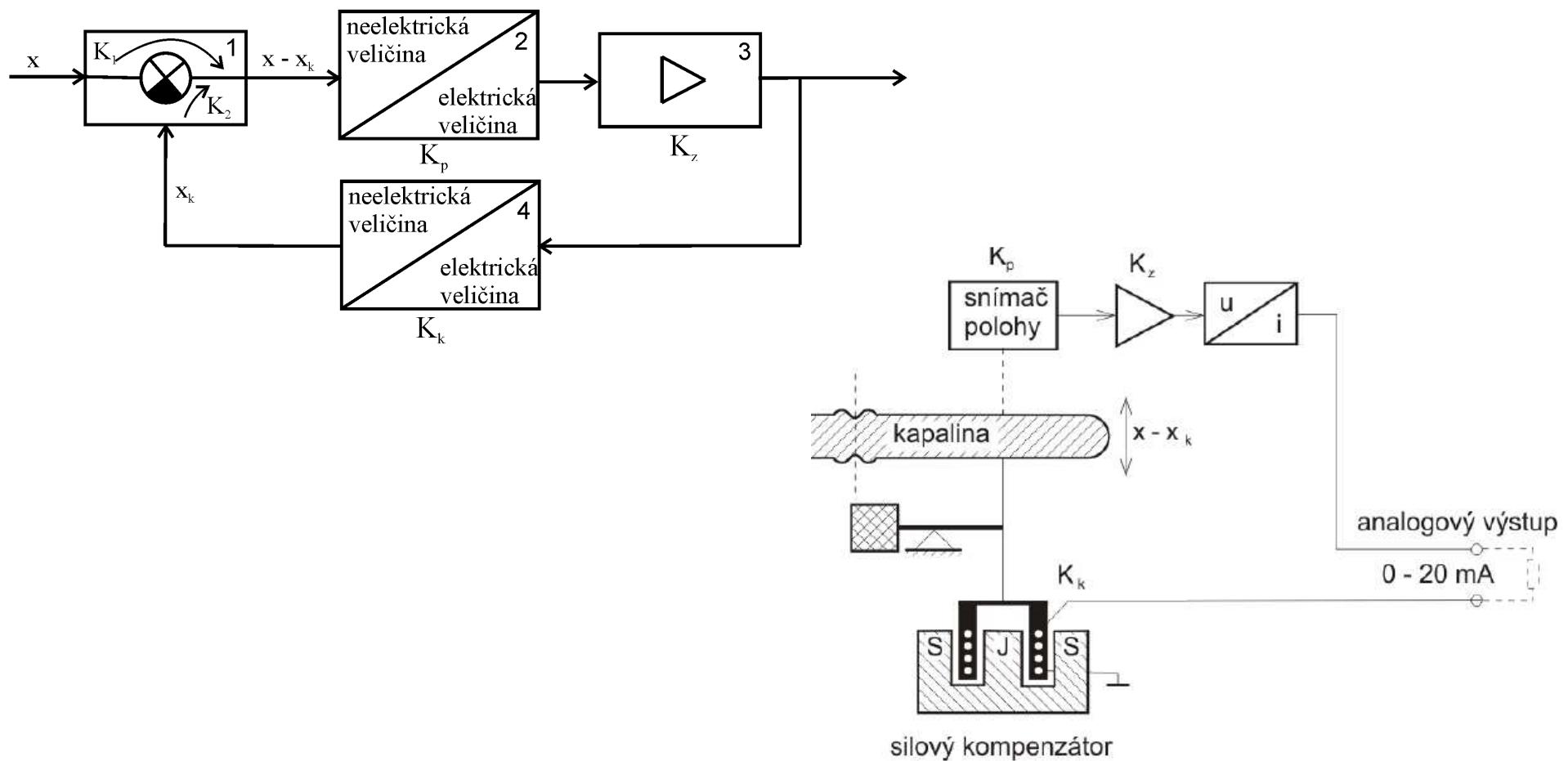
Příkladem použití je diferenciální kapacitní senzor





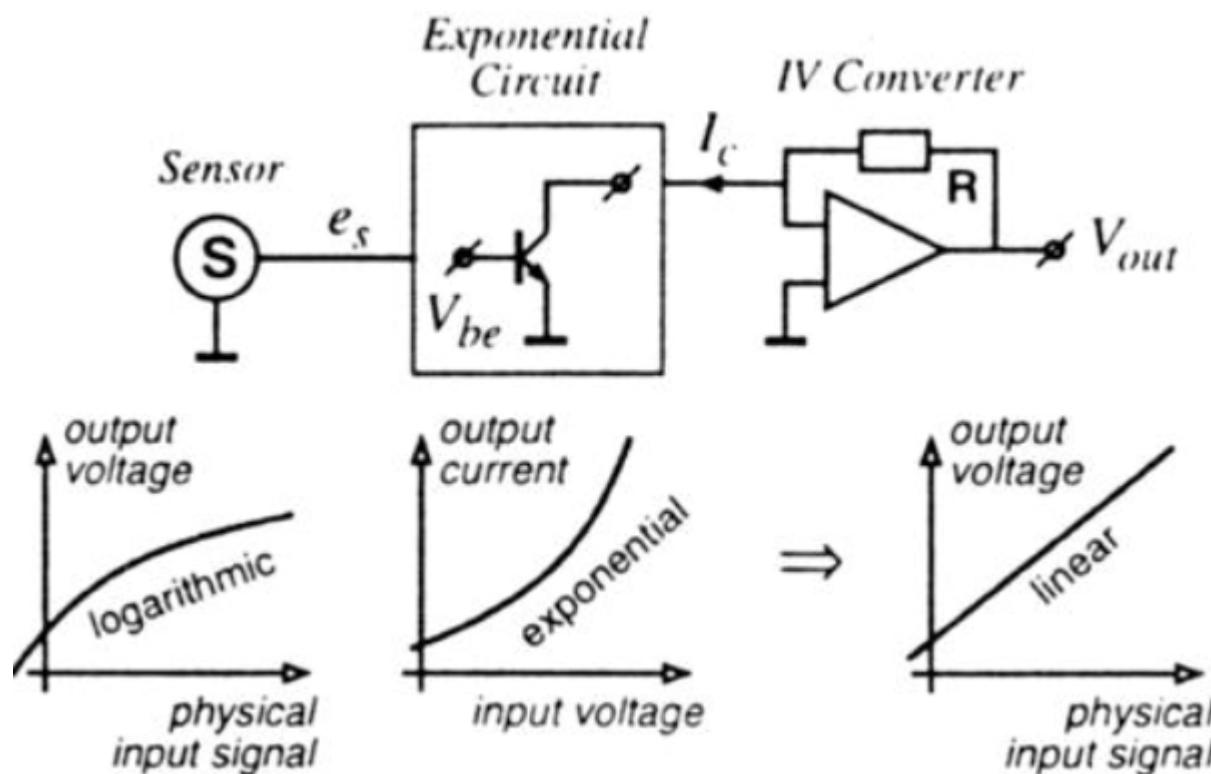
# Metoda zpětnovazebního snímače

- 1 - rozdílový člen vstupní veličiny  $x$  a zpětnovazební veličiny  $x_k$ ,
- 2 - senzor odchylky ( $x - x_k$ ),
- 3 - zesilovač,
- 4 - zpětnovazební převodník



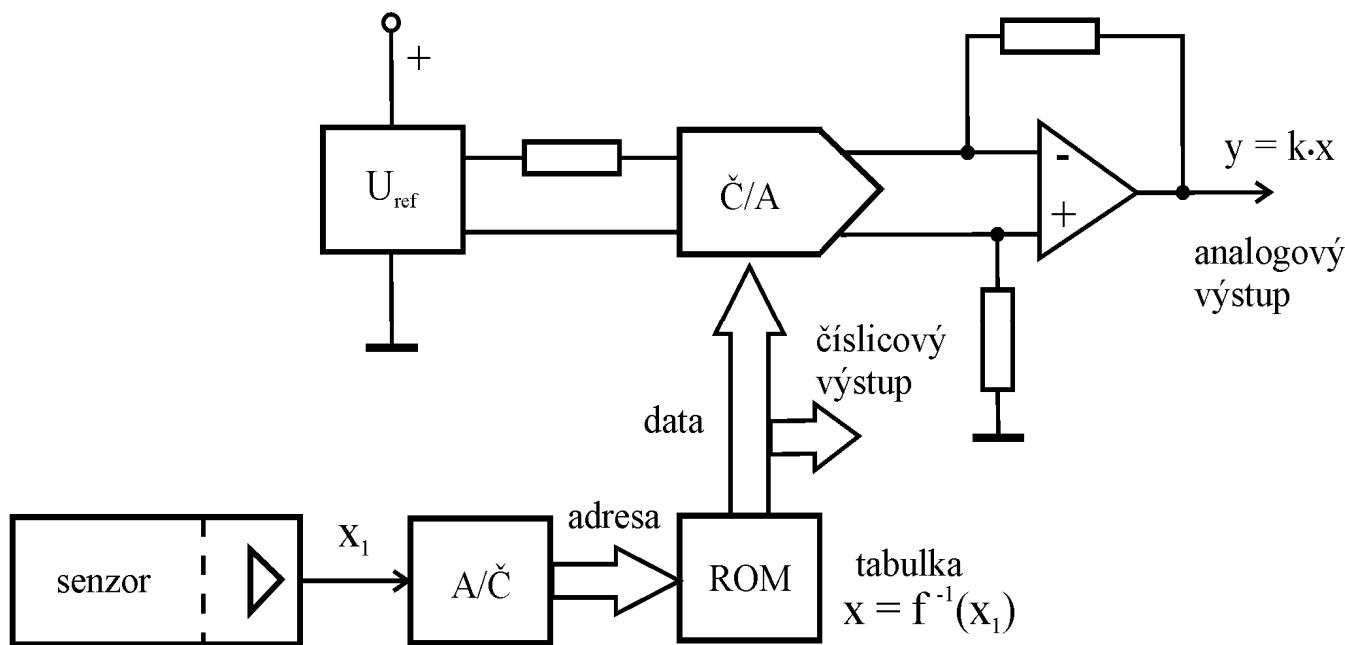
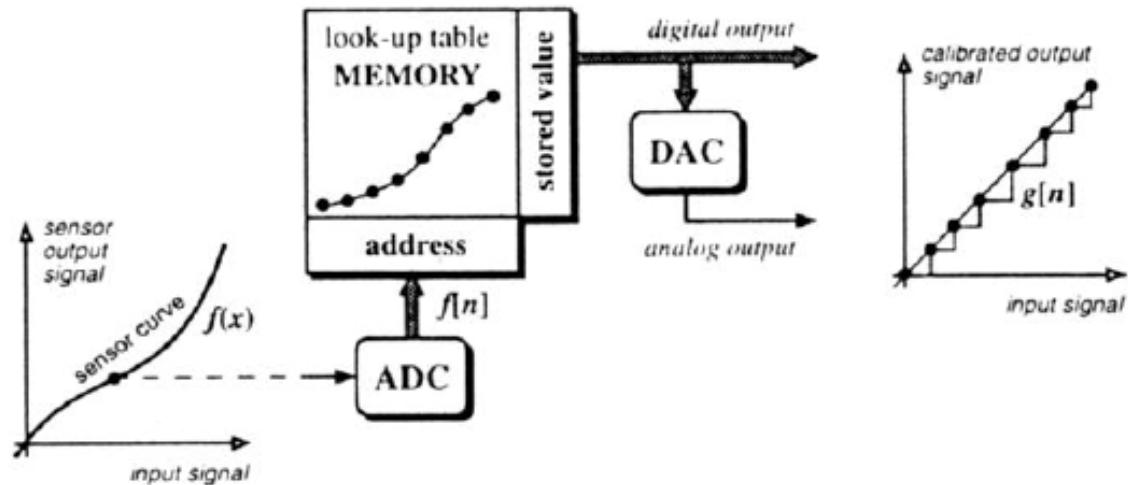


# Metoda analogové linearizace



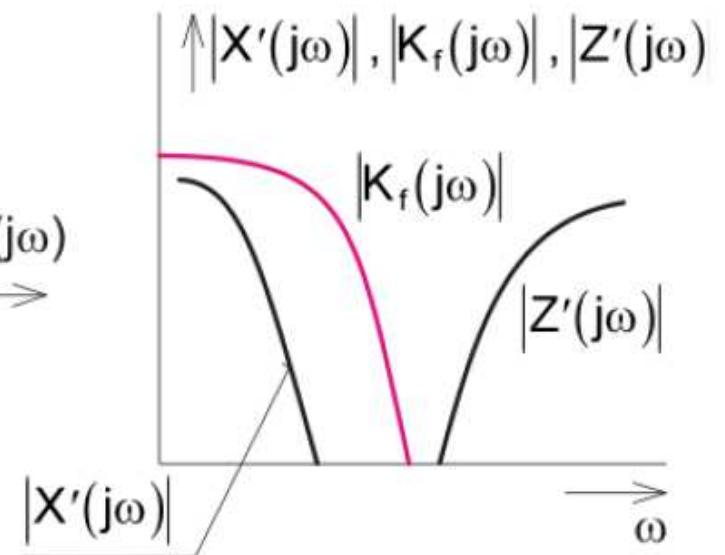
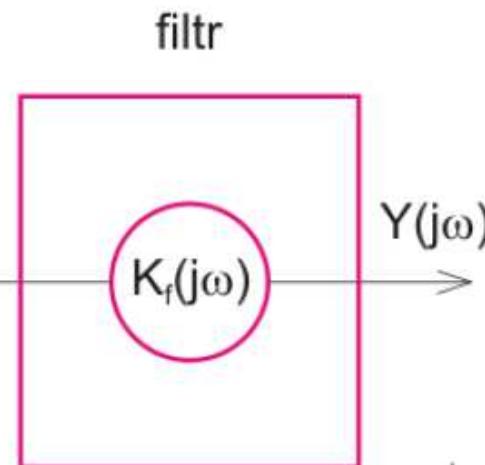
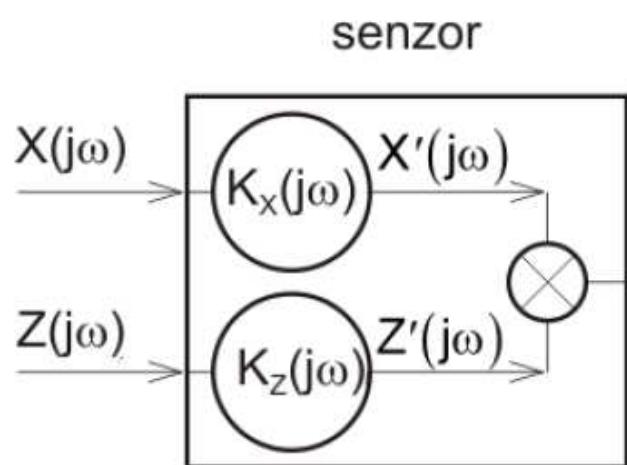


# Metoda číslicové linearizace





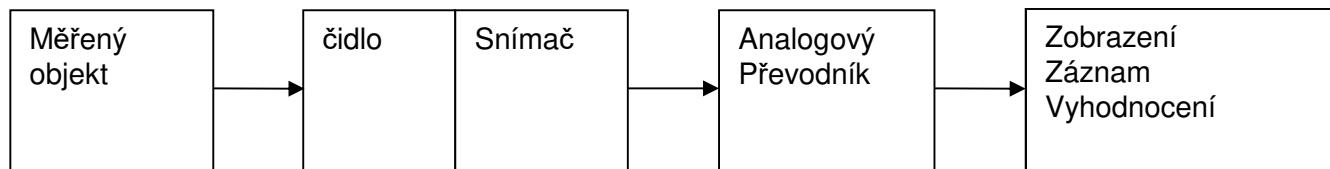
# Metoda filtrace



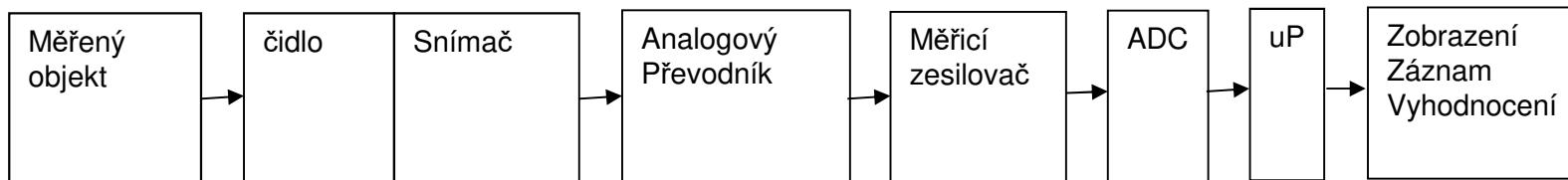


# Měřicí řetězec, signálová cesta a RUŠENÍ signálu

- Analogová cesta



- Digitální cesta



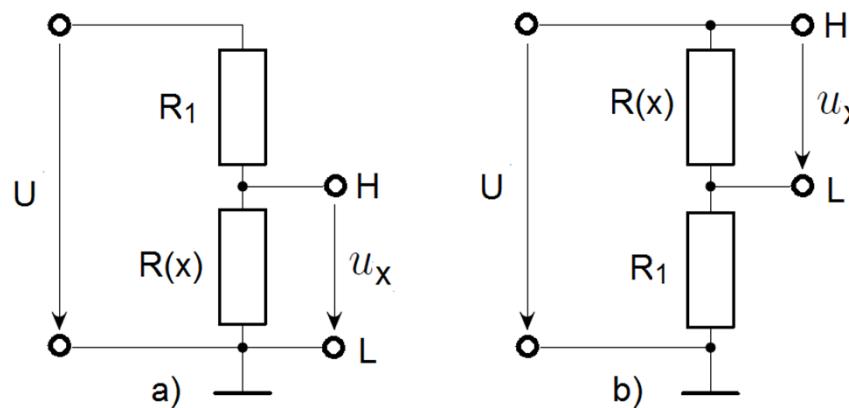
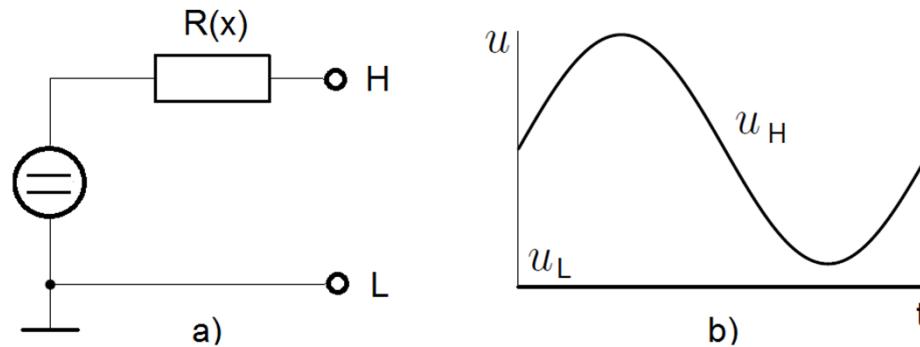
- Snímač získává základní informaci o měřeném objektu. Čidlo – zabezpečí přímý styk s měřeným objektem .
- Převodník převádí výstupní veličinu snímače na veličinu vhodnou k dalšímu zpracování. Je-li výstupní signál snímače elektrický je převodníkem elektrický proud. Snímač často tvoří s převodníkem jeden celek.





# Signálová cesta a RUŠENÍ signálu

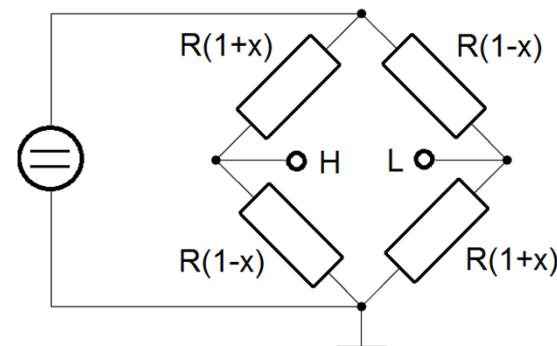
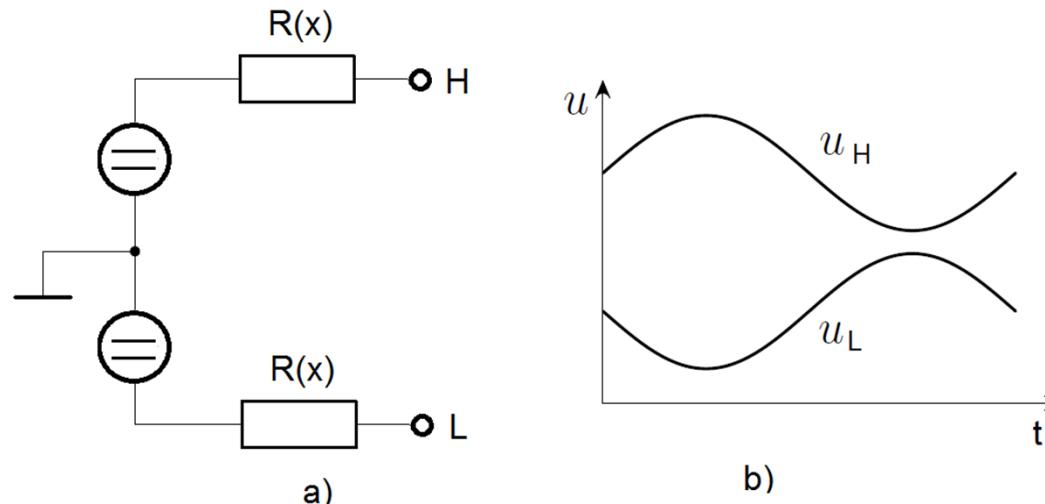
## Nesymetrický signál





# Signálová cesta a RUŠENÍ signálu

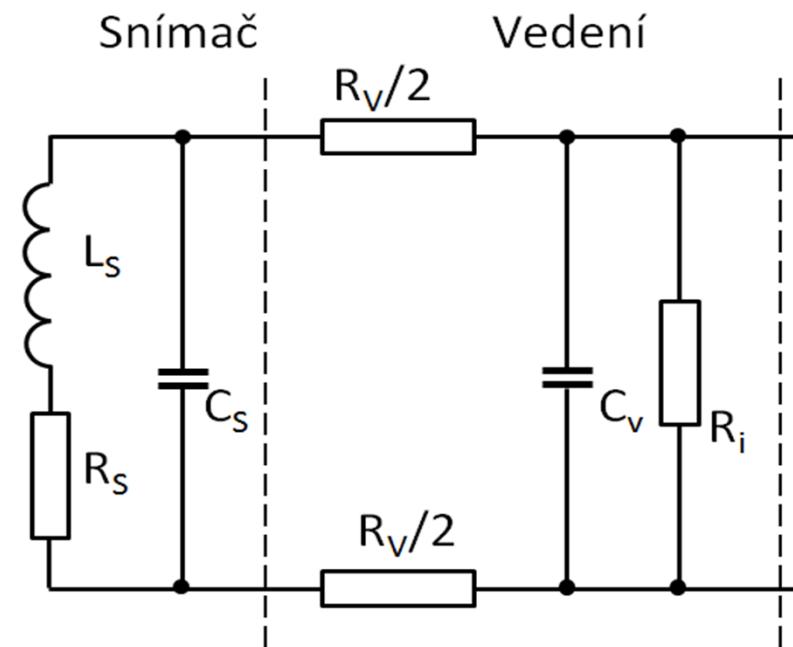
## Symetrický signál





# Připojení snímače

- Vliv vlastní impedance vedení
    - konečná výstupní impedance snímače
    - konečná vstupní impedance měřicí části

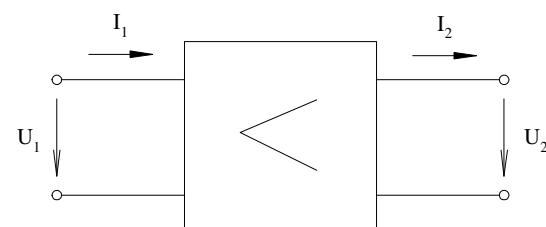




# Signálová cesta a RUŠENÍ signálu

## Vliv spojovacího vedení

- Vliv napájení snímače po společné zemi
  - úbytek napětí na společné zemi
  - indukce rušivého napětí , kapacitní vazba
  - **termoelektrické napětí**
  - použití proudové smyčky

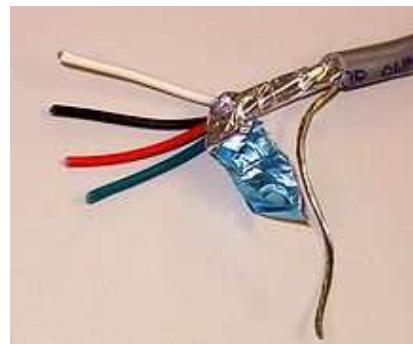




# Signálová cesta a RUŠENÍ signálu

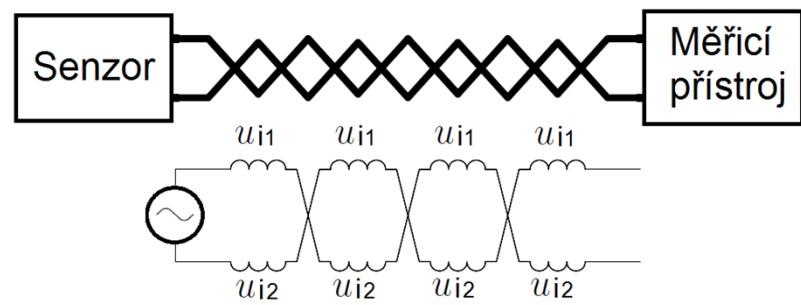
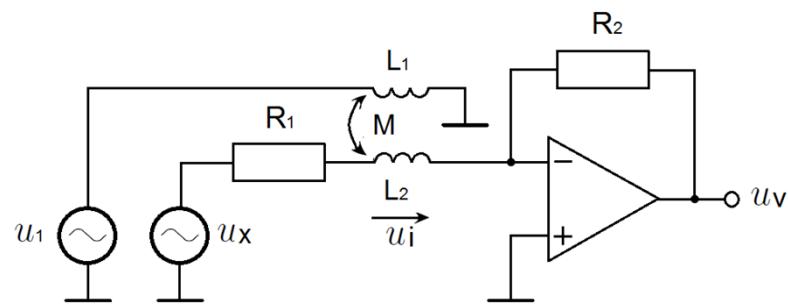
## Rušení a jeho odstranění

- stínění vedení
- stínění zdroje rušení
- kroucené vedení
- diferenční zesilovač
- galvanické oddělení
- filtrace
- integrace, korelace a další matematické postupy



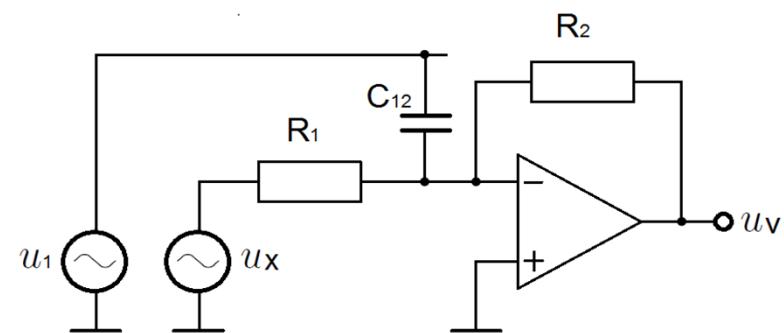
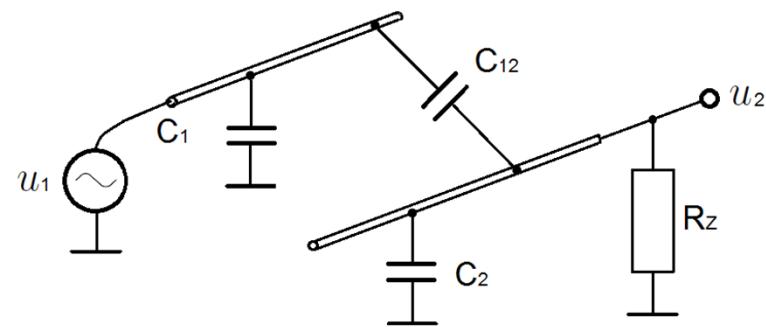


# Rušení - Induktivní vazba





## Rušení - Kapacitní vazba





# Galvanická vazba, termoelektrické napětí

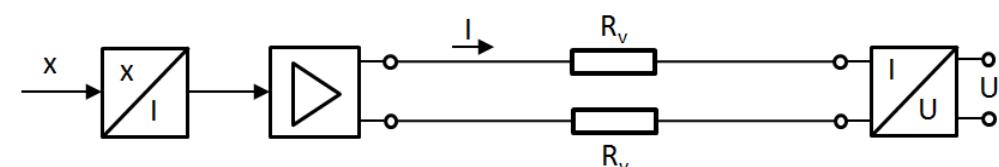
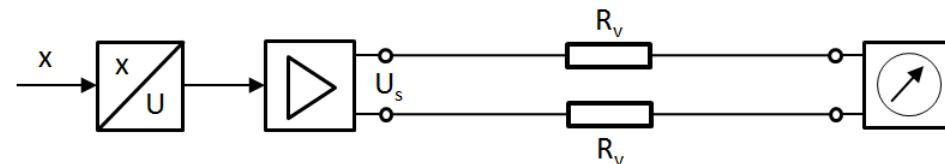
- Pro potlačení **galvanické** vazby, která vzniká úbytkem napětí na společné zemi, se používají různé metody galvanického oddělení pomocí oddělovacích transformátorů nebo optočlenů.
- Vliv rušivých termoelektrických napětí se projevuje zejména u nízkoúrovňových napěťových signálů, tj. např. u termočlánkových měření teploty. Zmenšení termoelektrických napětí se dosáhne důsledným používáním stejného kovu na vodiče vedení.





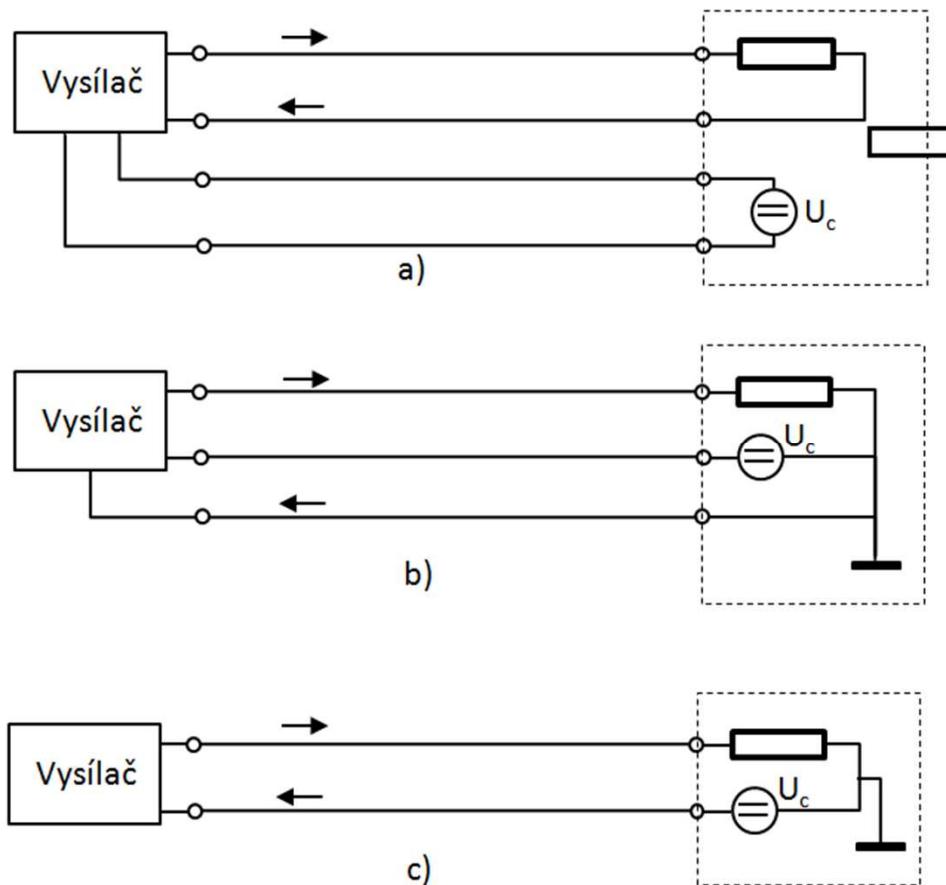
# Měřicí údaj (signál)

- Analogové měřicí údaje
  - napěťový 0-10V 15 až 90 m
  - proudový 4-20mA (0-20mA), 300 až 1500 m





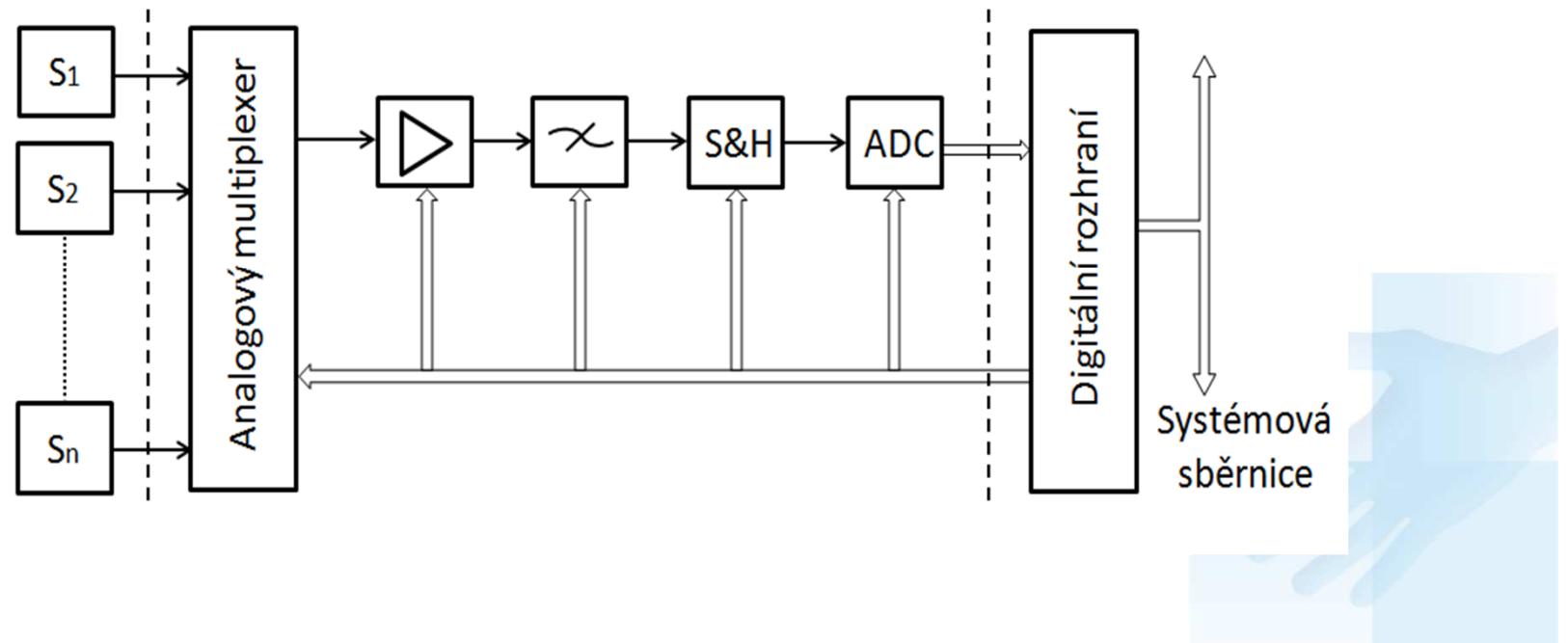
# Proudový signál





## Senzorové sběrnice, nízkoúrovňový multiplexer

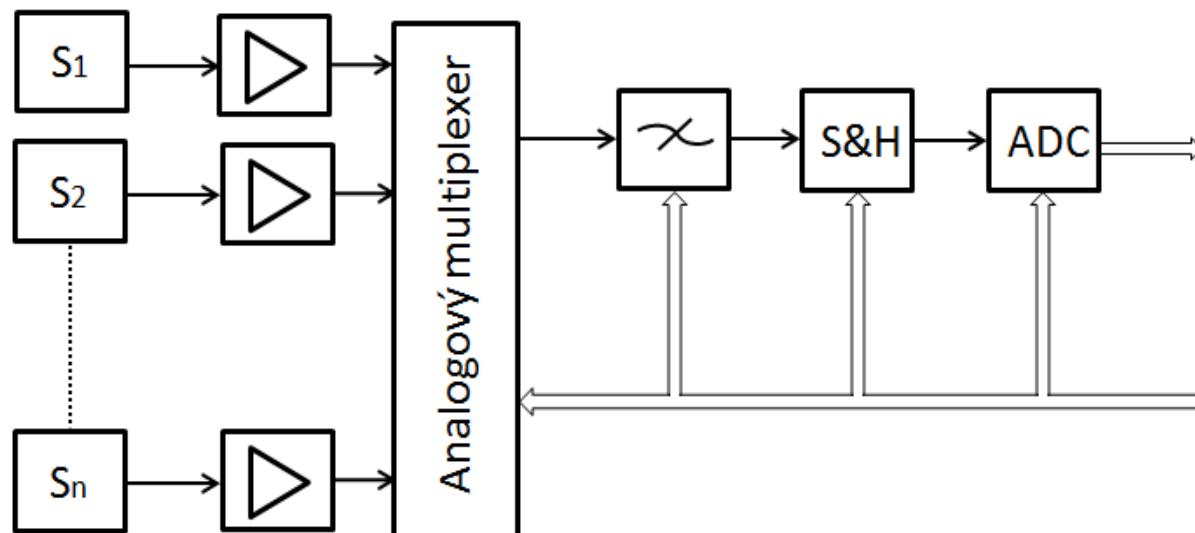
- analogový multiplexer postupně připojuje analogově digitální převodník ke každému ze vstupních senzorů.





## Senzorové sběrnice, vysokoúrovňový multiplexer

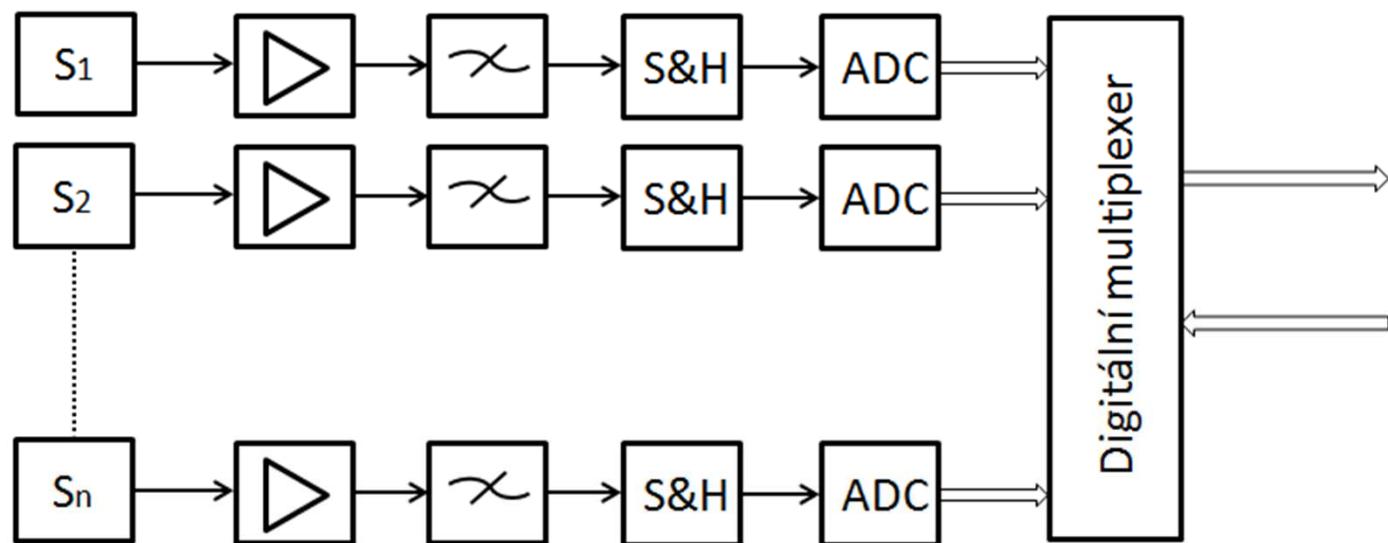
- zesilovač a někdy i filtr již nejsou společné pro více signálů. Tato struktura umísťuje zesilovač blíže ke zdroji signálu.





## Decentralizovaný systém sběru dat

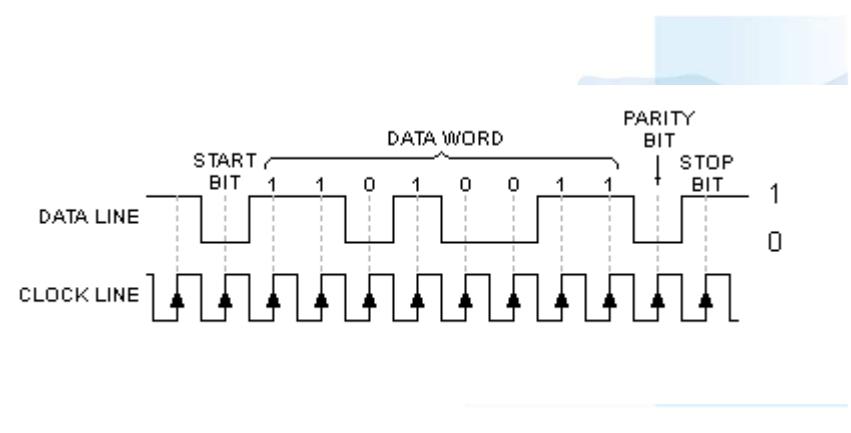
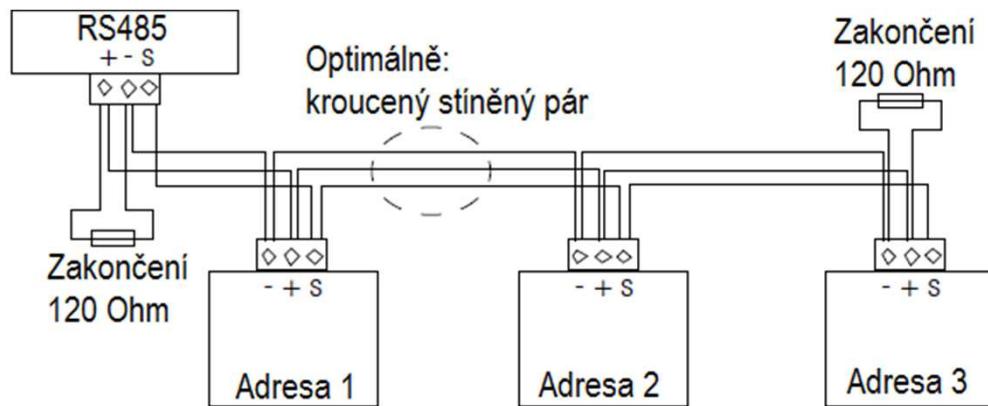
- Hlavní problém, pokud je počet kanálů vysoký, zde představuje analogový MUX. Jeho propustnost je omezená a limituje tak celkovou propustnost systému. Vstupní rozsah MUX musí být kompatibilní se všemi zesilovači.





# Komunikační sběrnice

- Digitální měřicí údaje
  - Nekódované – logické obvody a automaty
  - Kódované údaje – předávání údajů domluveným (standardním) způsobem
  - Sériové rozhraní – RS232, RS485, SPI, USB, LAN, ...
  - Paralelní rozhraní – Centronix, PCI, GPIB, ...
  - VXI, PXI, MXI





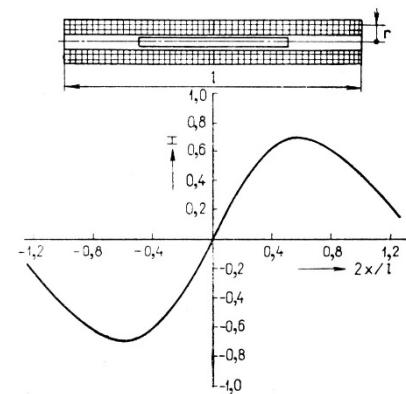
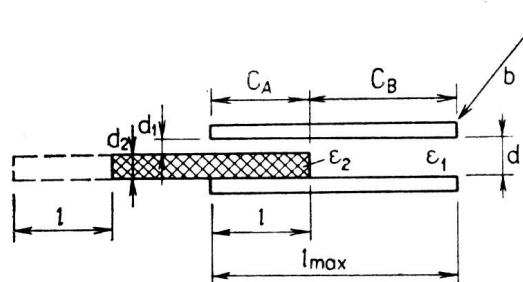
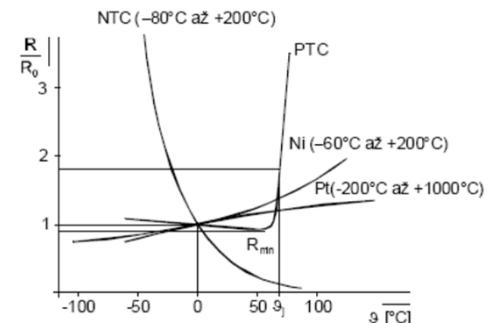
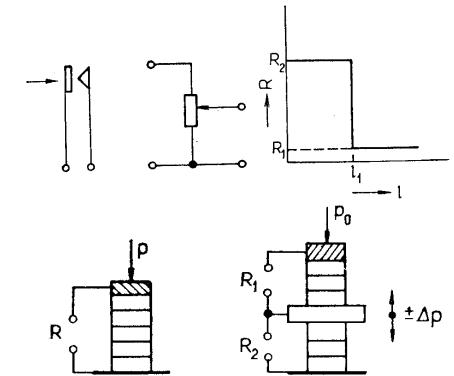
## Průmyslové sběrnice

- LAN, EtherCAT
- HART
- Profibus
- Profinet
- Foundation Fieldbus
- ControlNet
- CAN (Controller Area Network)
- SENT (Single Edge Nibble Transmission)
- SPI (Seriál Peripheral Interface)



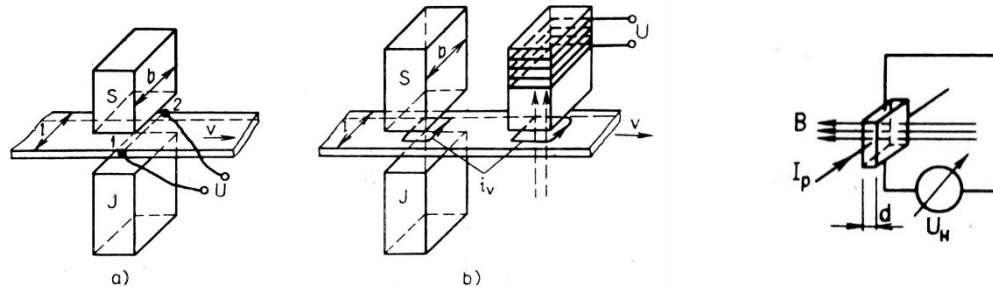
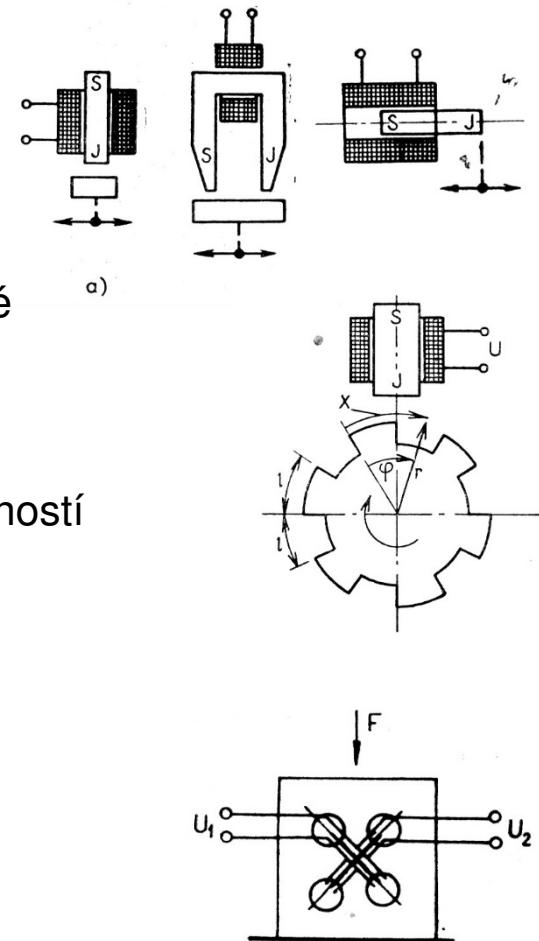
# Fyzikální principy snímačů

- Odpovorové snímače
  - závislost odporu na poloze (kontakt, potenciometry)
  - závislost odporu na deformaci (piezorezistivní jev)
  - závislost odporu na teplotě
  - závislost odporu na elektromagnetickém poli
  - závislost odporu na záření
- Kapacitní snímače
  - změna kapacity se vzdáleností nebo plochou elektrod
- Indukčnostní snímače
  - změna indukčnosti nebo vzájemné indukčnosti cívek mechanickou změnou magnetického obvodu



# Fyzikální principy snímačů

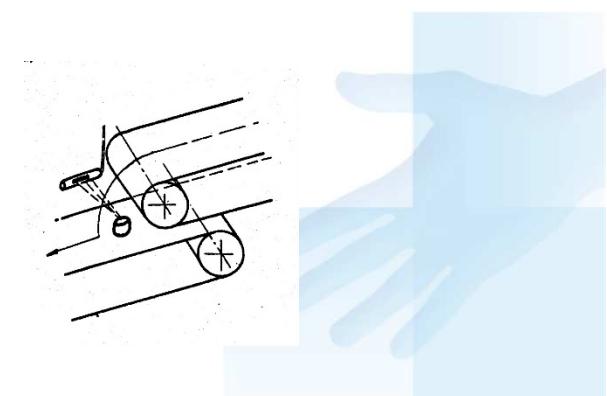
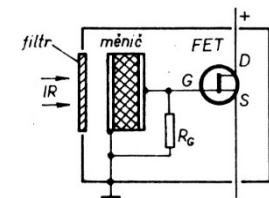
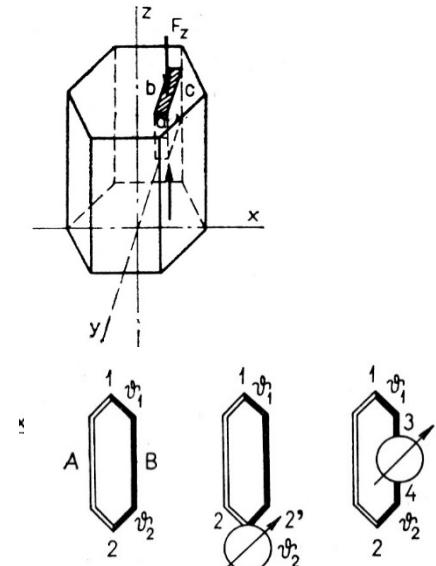
- Indukční snímače
  - změna indukované elektrické veličiny vlivem mechanické změny magnetického obvodu
  
- Magnetické snímače
  - magnetoelastické snímače – změna magnetických vlastností feromagnetika při jejich deformaci
  - magnetoanizotropní snímače – změna rozložení magnetického pole při deformaci
  - Snímače s inverzním Wiedemannovým efektem
  - Magnetostriktční snímače – změna remanentní indukce
  
- Hallový snímače
  - Využívají Hallova jevu – vznik napětí v polovodičovém materiálu vlivem magnetického pole





# Fyzikální principy snímačů

- Piezoelektrické snímače
  - vznik náboje při deformaci krystalu
  - změna vodivosti při deformaci krystalu
- Termoelektrické snímače
  - vznik elektromotorického napětí vlivem rozdílu teplot při spojení dvou různých materiálů
- Optoelektrické snímače
  - vznik napětí působením světla na polovodičový přechod
  - vnitřní a vnější fotoelektrický jev
- Pyroelektrické snímače
  - indukce elektrického náboje pyroelektrického materiálu vlivem teploty
- Ionizační snímače
  - Polarizace plynu vlivem dopadajícího záření





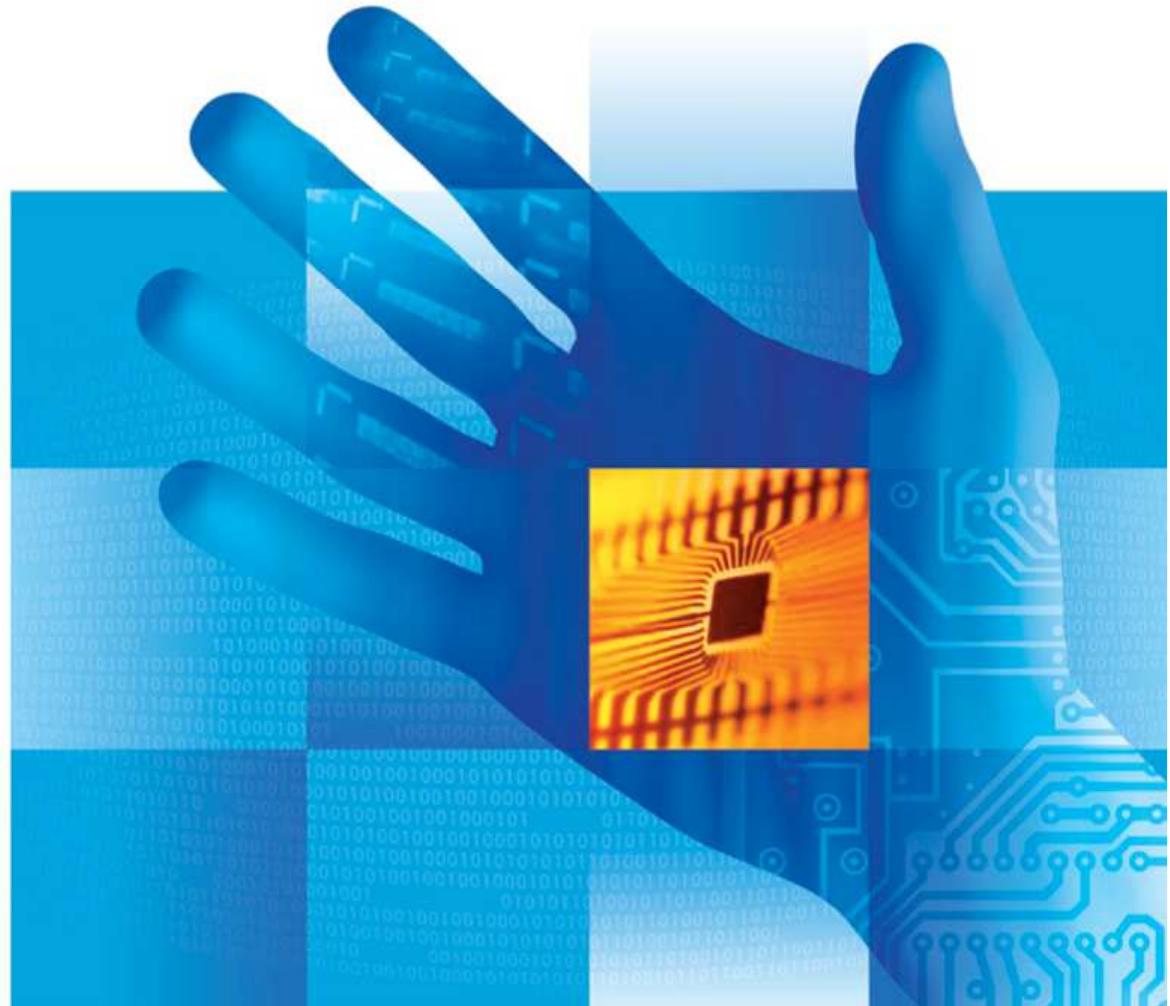
# Senzory a Měření

## 4 - Odporové snímače

Katedra 450

Fakulta elektrotechniky a informatiky

VŠB-TUO



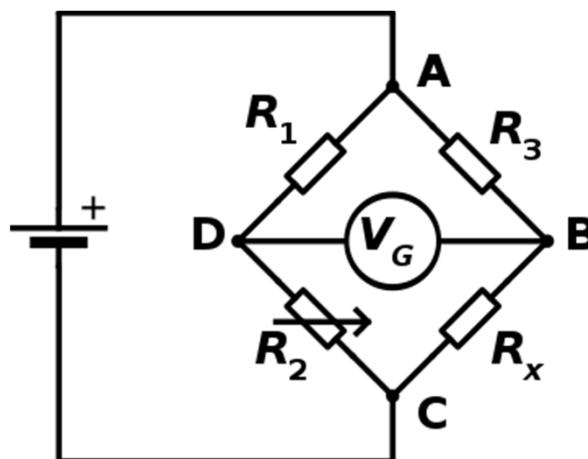


## Odporové snímače

- Nejrozšířenější typ snímačů
- převádějí měřenou neelektrickou veličinu na změnu odporu
- pasivní snímače
- zapojujeme do obvodu s pomocným napětím (nevývážený vs. vyvážený můstek)
- jednoduché

EVROPA  


USA-JP  

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

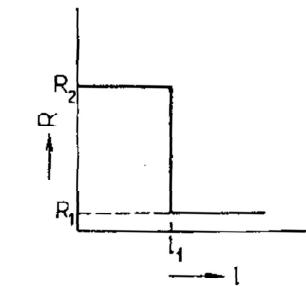
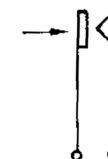




## Kontaktové snímače



- působením neelektrické veličiny dochází ke skokové změně odporu
- ovládání kontaktu
  - přímé - mechanická síla
  - nepřímé – změna magnetického pole, teploty,..
- dotyková plocha musí být hladká – malý přech. R
- v agresivním prostředí vzniká vrstva oxidu, pak vodivá plocha je zlomek původní plochy  $S_v \approx 0.001S_i$
- tlak v oblasti elastické deformace, jinak vznikají trhliny – plastická deformace, mech. opotřebení
- mezní proud – před vznikem nepřípustného ohřevu, případně oblouk při rozepnutí AC DC
- rušivé vlivy na přechod R: znečištění, kmitání, přehřívání, mechanické opotřebení, mazání
- opotřebení mechanické a elektrické

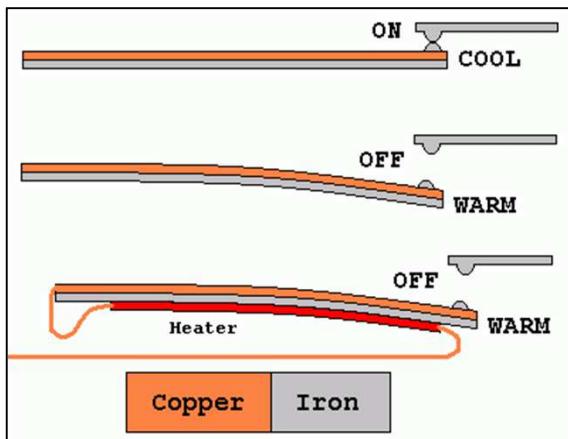
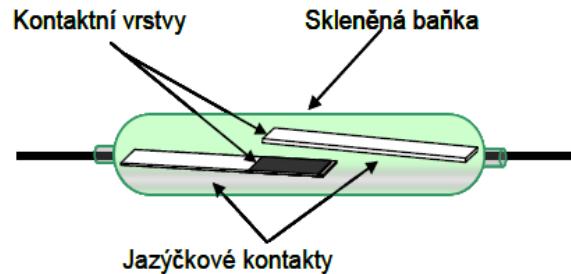


# Kontaktové snímače

- Materiál dle rozměru kontaktu
  - **Rozměr velmi malý**: zlato, platina, platina + iridium, platina + paladium
  - **malý**: stříbro, stříbro +platina, platina+wolfram, paladium + měď
  - **střední**: wolfram, wolfram + stříbro, stříbro + uhlík
- Konstrukce
  - zdvihové
  - třecí (rotační pohyb) – lepší přechodový odpor, vyšší opotřebení
  - uzavřené – ochrana proti nečistotám (vakuum nebo ochranný plyn)
  - vakuové – vyšší pracovní napětí (vn)
  - jazýčkové – plíšky z magneticky měkkých materiálů, inertní plyn,
  - rtuťové – malý přechodový odpor, malé opotřebení, velké výkony, citlivé na plochu, křehké, malá rychlosť
  - s pevnou látkou - dvojkovy



# Kontaktové snímače



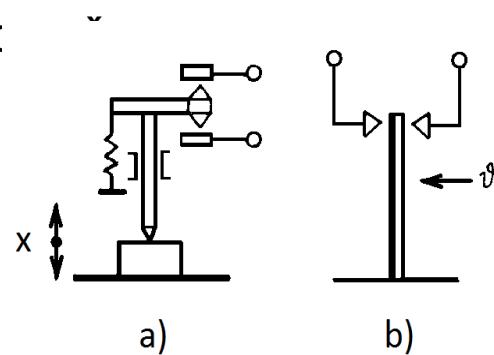


# Kontaktové snímače

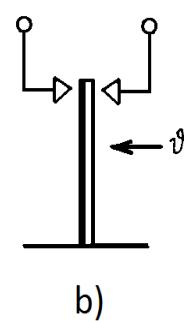


- Použití
  - indikace stavu měřené veličiny
  - koncové spínače

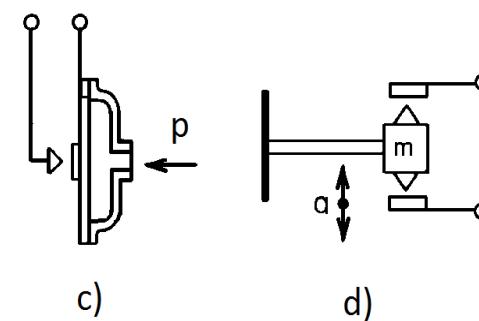
a, geometrické rozměry



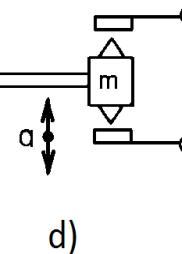
b, teplota



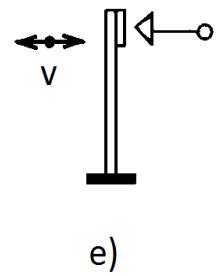
c, tlak



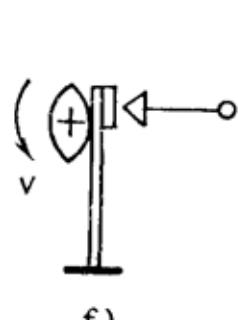
d, zrychlení



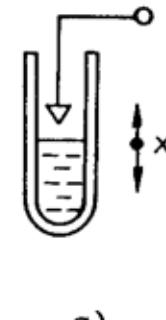
e, vibrace



f, otáčky



g, hladina



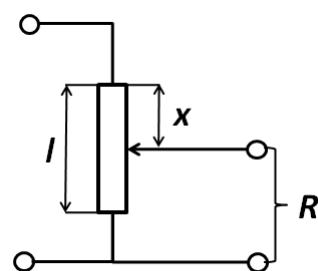
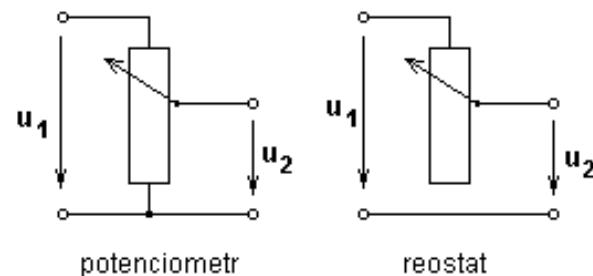
h, další



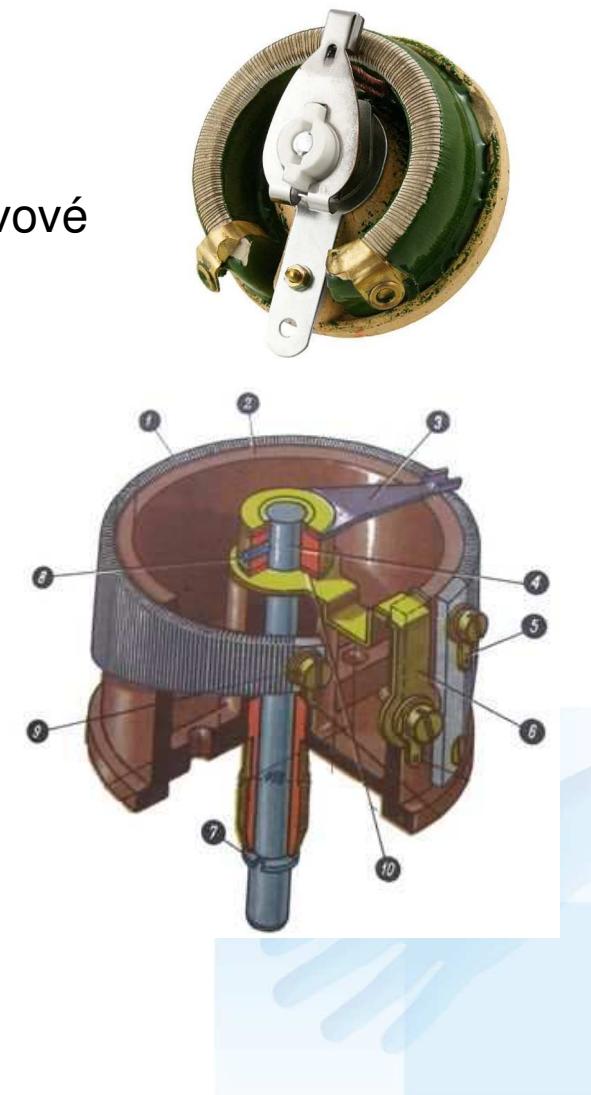
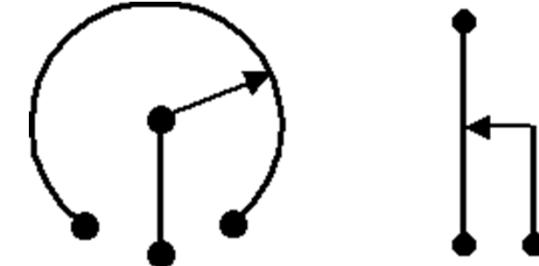


# Potenciometry

- pohyb běžce: rotační jednootáčkové, rotační víceotáčkové, posuvné
- materiál dráhy: kovové – drátové a vrstvové, nekovové – uhlíkové, elektrolytické, vodivé plasty (CP), cementové (keramika+ kov)



$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} (1 - \alpha) = \frac{\rho}{S} \cdot (l - x)$$





# Potenciometry



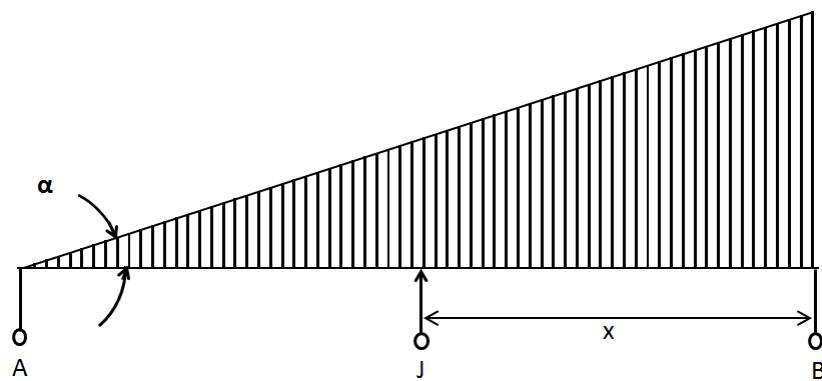
© Premier Farnell  
Copying of image is prohibited.





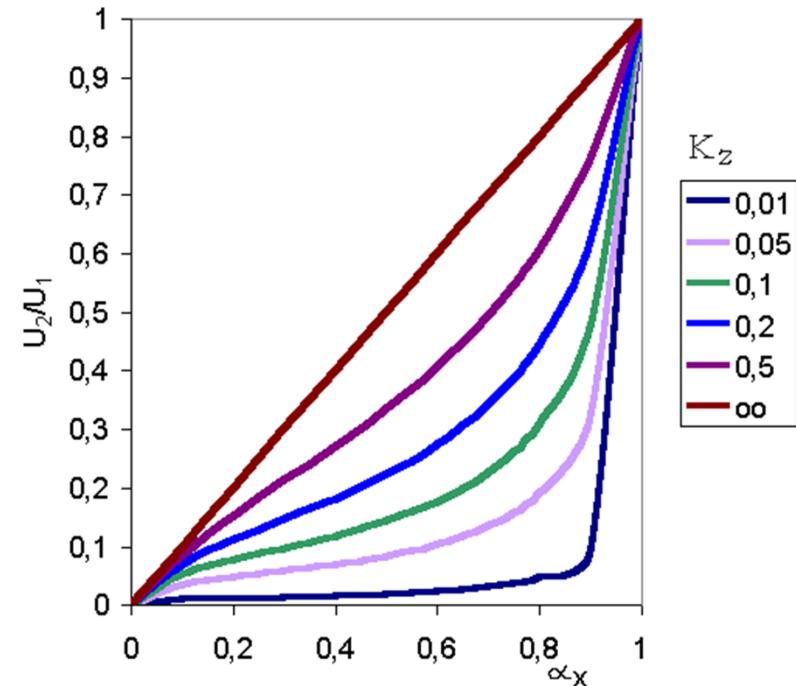
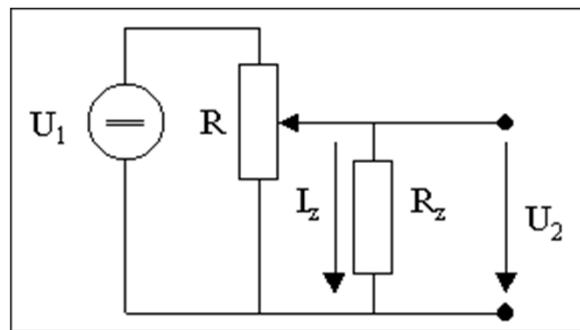
## Potenciometry 2

- tvar dráhy: lineární, profilové (realizující nelineární závislost přenosu na poloze jezdce –logaritmický, exponenciální)
- Nelineární průřez nebo nerovnoměrné rozestupy drátu
- Závislost odporu na teplotě (okolí + vlastní ohřev)
- Mechanické síly působící na jezdce – protichůdné požadavky
- Zdvojení kontaktů běžce pro rychlé pohyby
- Proměnný odpor kontaktu – vliv šumu ne rozlišovací schopnost



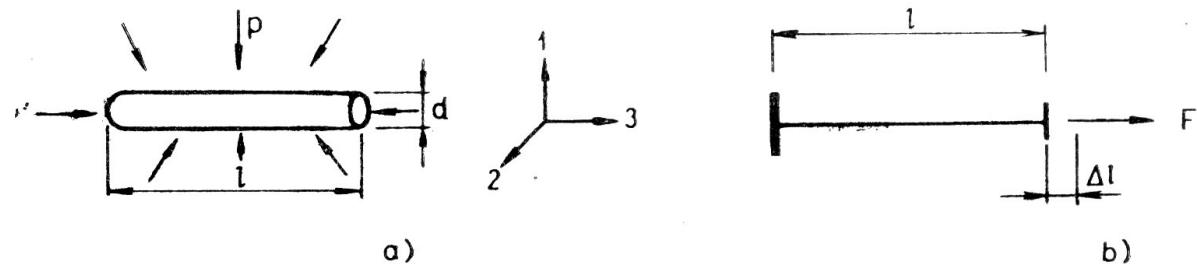


## Potenciometry vliv zátěže





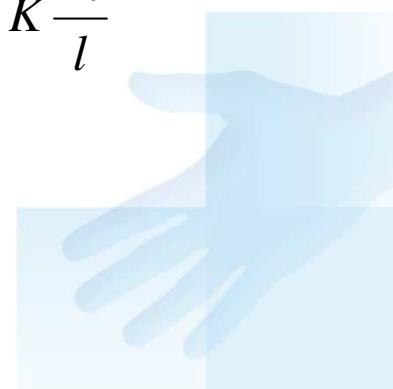
## Deformace



Elektrický odpor vodiče obecně:

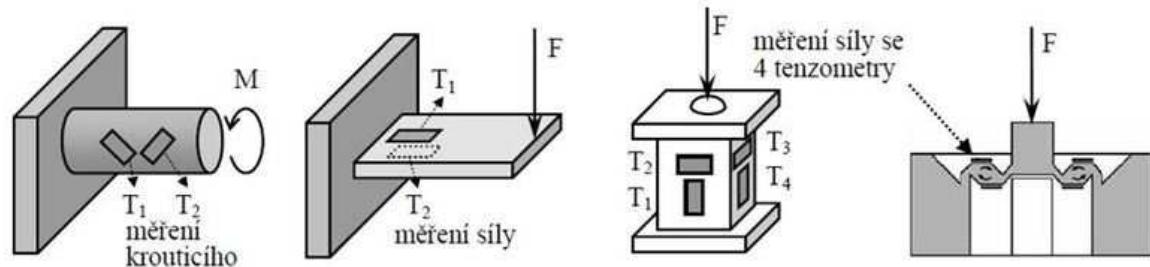
$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$$

- Všesměrový tlak  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p$   $\frac{\Delta R}{R} = \alpha_p p$   
 $\alpha_p$  - součinitel úměrnosti
  - Mangan  $\alpha_p = 26.5 \cdot 10^{-6}$  do 3000 MPa
  - Ag + Mn  $\alpha_p = 34.2 \cdot 10^{-6}$  do 300 MPa
- Jednosměrné zatížení a malé deformace  $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$   
K - koeficient deformační citlivosti
  - konstanta K=2.05
  - polovodiče K cca 200 (Si 125) velká teplotní závislost





## Deformace

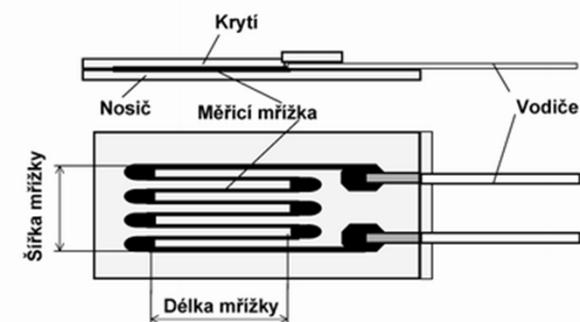
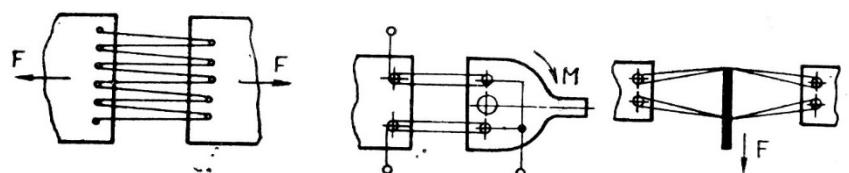


### Materiál:

- kovové (kruhový, obdélníkový průřez)
- polovodičové
  - homogenní materiál
  - homogenní materiál v polovodičové pružnému elementu
  - v jedním nebo více PN přechody

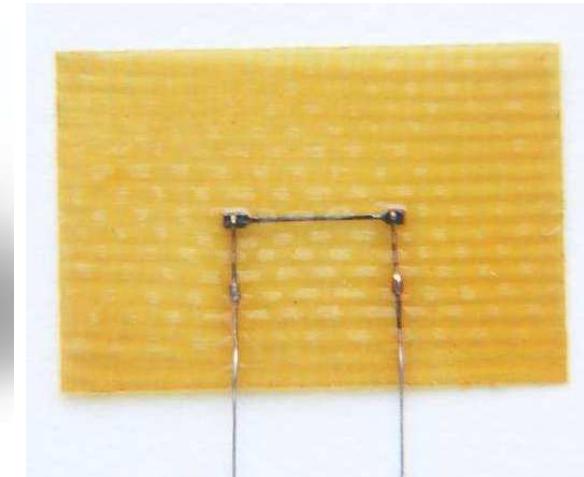
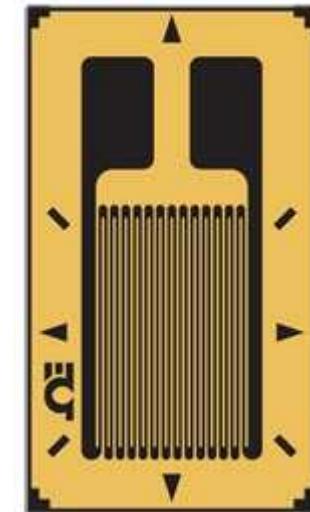
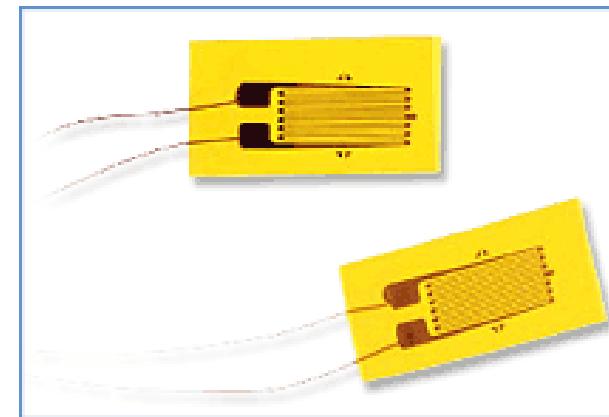
### Konstrukce

- S volným odporovým čidlem – malý posuv 0, malá hystereze, do vysokých teplot, dlouhá doba ustálení, malý rezonanční kmitočet
- Lepené – litografické metody, lepidlo musí dobře přenášet tlak, větší proudové zatížení, vlivem teploty vzniká pnutí – chyba tlak : konstantan 4-5%, manganin 0.3-0.4%





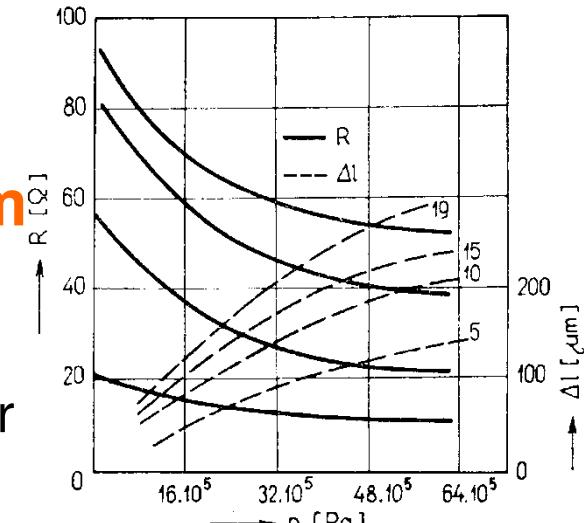
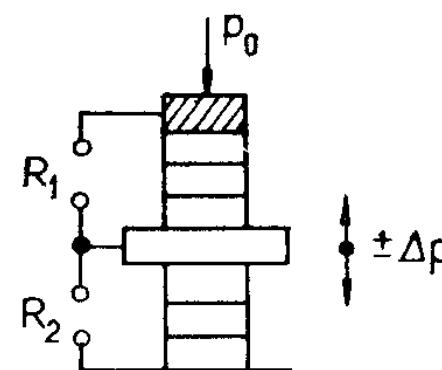
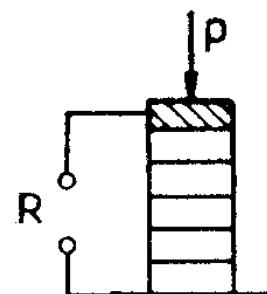
## Deformace



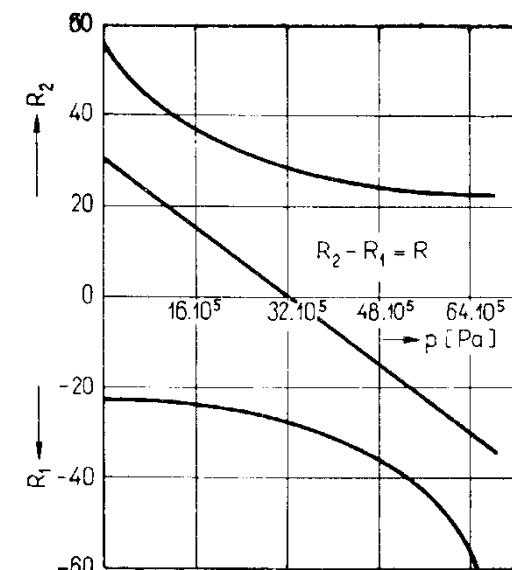


## Kontaktové se stykovým odporem

- Pro velké tlaky
- S tlakem se snižuje přechodový odpor
- Těžký průmysl



a)



b)





## Odporové snímače teploty (RTD)

Pracují na principu závislosti odporu kovu na teplotě. Odpor většiny kovů s teplotou roste. U kovových senzorů teploty je základní materiálovou konstantou *teplotní součinitel odporu*  $\alpha$

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\delta R}{\delta t} \cong \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\Delta t} .$$

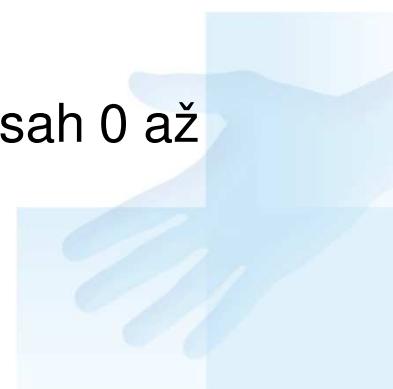
Pro provozní kovové snímače teploty je možno pro rozsah 0 až 100 °C použít pro výpočet odporu vztah

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t),$$

$\alpha$  [K<sup>-1</sup>] je teplotní součinitel odporu,  $R_0[\Omega]$  je odpor čidla při teplotě 0 °C.

Střední hodnota teplotního součinitele odporu  $\alpha$  je pro rozsah 0 až 100 °C

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





## Odporové snímače teploty

- pracují s výměnou tepla ve formě vedení, proudění nebo záření.
- jedna forma je pracovní, zbývající jsou parazitní
- Vyžaduje se co největší a stálý teplotní koeficient (citlivost).
- Jsou to pasivní snímače – při zavedení pomocné elektrické veličiny dochází k vzniku tepla – chyby měření.
- Kovové - Používají se čisté kovy.
  - požaduje se aby nereagovaly s izolačním krytem
    - nestálost odporu vlivem chemických nebo fyzikálních vlivů
    - platina, nikl, měď, stříbro-zlato, ....
- Polovodičové
  - Polykrystalické (Termistory (negastory) NTC, Pozistory PTC)
  - Monokrystalické (Bez PN přechodu, S PN přechodem)





## Tepelné snímače

### Platina

- čistota 99.93% - 99.99 %.
- změna základního odporu  $5 \cdot 10^{-6} R_0$
- rozsah  $-259.34 \text{ } ^\circ\text{C}$  až  $630.74 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Závislost v rozsahu 0 až  $630 \text{ } ^\circ\text{C}$ :
- Závislost v rozsahu  $-190$  až  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

kde

$R_0$  odpor při  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$

teplota ve  $\vartheta \text{ } ^\circ\text{C}$

A konstanta  $3.9075 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$

B konstanta  $-0.575 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$

C konstanta  $-4 \cdot 10^{-12} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$

Konstanty A,B a C jsou závislé na čistotě a strukturním stavu platiny.

Zavádí se poměr pro 99.93% Pt

$$R_\vartheta = R_0 (1 + A\vartheta + B\vartheta^2)$$

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



Teplotní závislost odporu na teplotě pro sondy Pt1000

$^\circ\text{C}$	Odpór	$^\circ\text{C}$	Odpór	$^\circ\text{C}$	Odpór	$^\circ\text{C}$	Odpór
-50	803	10	1039	60	1232	200	1758
-40	843	20	1078	70	1271	250	1941
-30	882	25	1097	80	1309	300	2120
-20	922	30	1117	90	1347	400	2470
-10	961	40	1155	100	1385	500	2809
0	1000	50	1194	150	1573	600	3136

$$\frac{R_{100}}{R_0} = 1.385$$

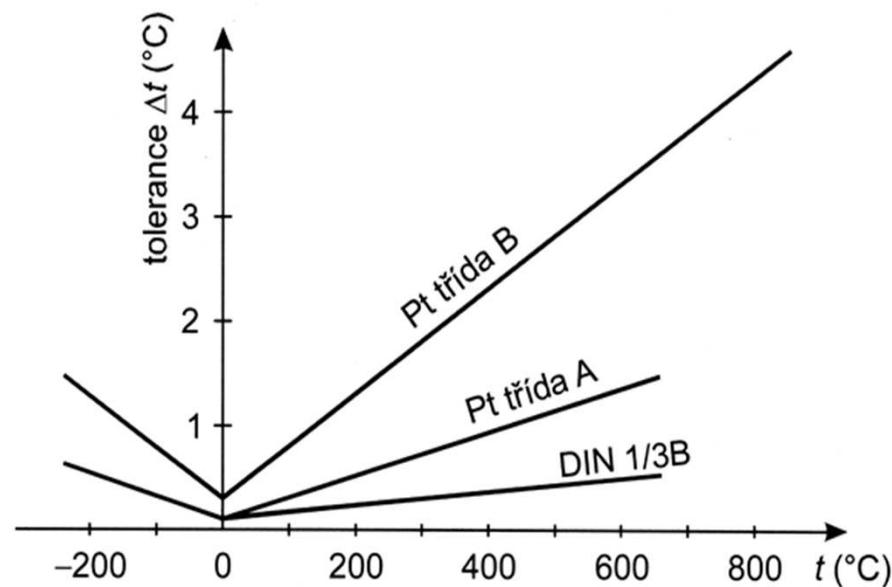


## dovolené tolerance Pt měřicích odporů

třída přesnosti A;  $\Delta t = \pm (0,150 + 0,002 \cdot |t|) [^\circ\text{C}]$

třída přesnosti B;  $\Delta t = \pm (0,300 + 0,005 \cdot |t|) [^\circ\text{C}]$

přesnější kritérium DIN 1/3B, pro které platí  $\Delta t = \pm (0,100 + 0,0017 \cdot |t|) [^\circ\text{C}]$ .





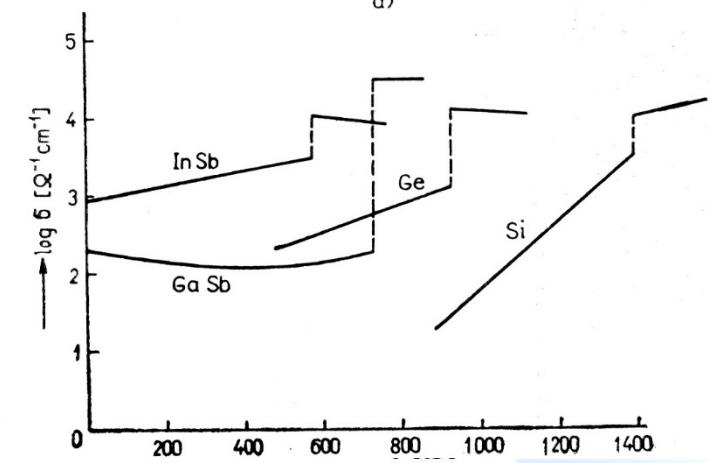
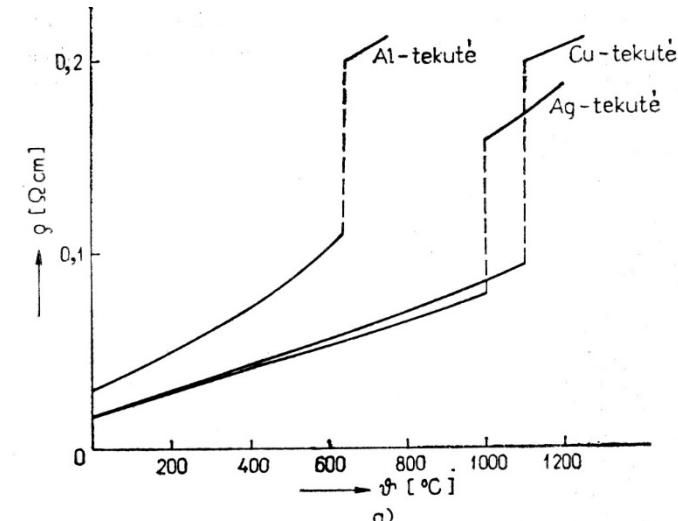
## Tepelné snímače

### Nikl

- vyšší součinitel odporu
- rozsah  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 
  - A konstanta  $5.44 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - B konstanta  $-6.00 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$

Teplotní závislost odporu na teplotě pro sondy Ni1000

${}^{\circ}\text{C}$	Odpór	${}^{\circ}\text{C}$	Odpór	${}^{\circ}\text{C}$	Odpór	${}^{\circ}\text{C}$	Odpór
-50	743	10	1056	60	1353	140	1909
-40	791	20	1112	70	1417	160	2066
-30	841	25	1141	80	1483	180	2232
-20	893	30	1171	90	1549	200	2407
-10	946	40	1230	100	1618	225	2640
0	1000	50	1291	120	1760	250	2892



Dovolené tolerance odporu jsou

$$\Delta t = \pm (0,4 + 0,007 \cdot |t|) [\text{ }^{\circ}\text{C}] \text{ pro } t > 0\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta t = \pm (0,4 + 0,028 \cdot |t|) [\text{ }^{\circ}\text{C}] \text{ pro } t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}.$$





## Tepelné snímače

### Měď

teplotní rozsah od – 200 °C do +200 °C

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

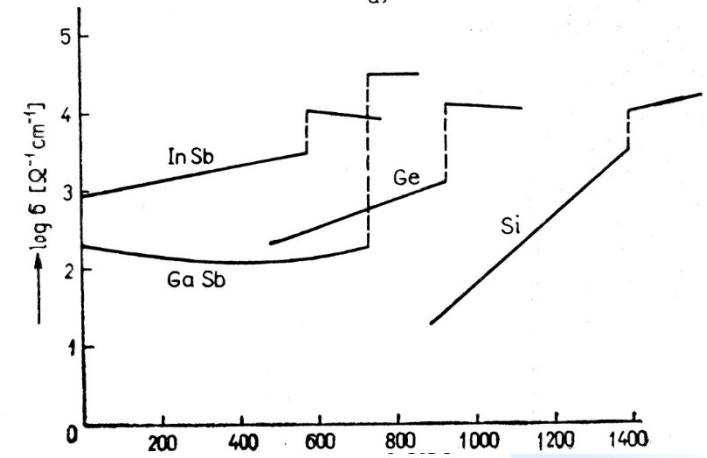
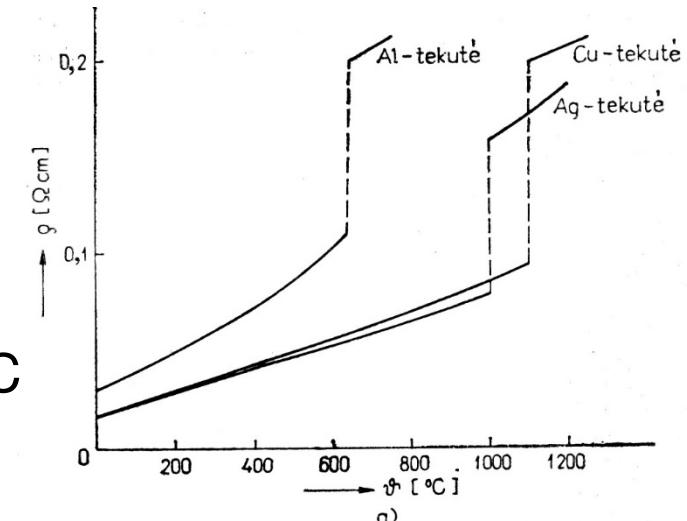
kde  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

### Stříbro-zlato

podobné platině  
rozsah do 120 °C

**Stříbro** do 200°C

**Zlato** do 400°C



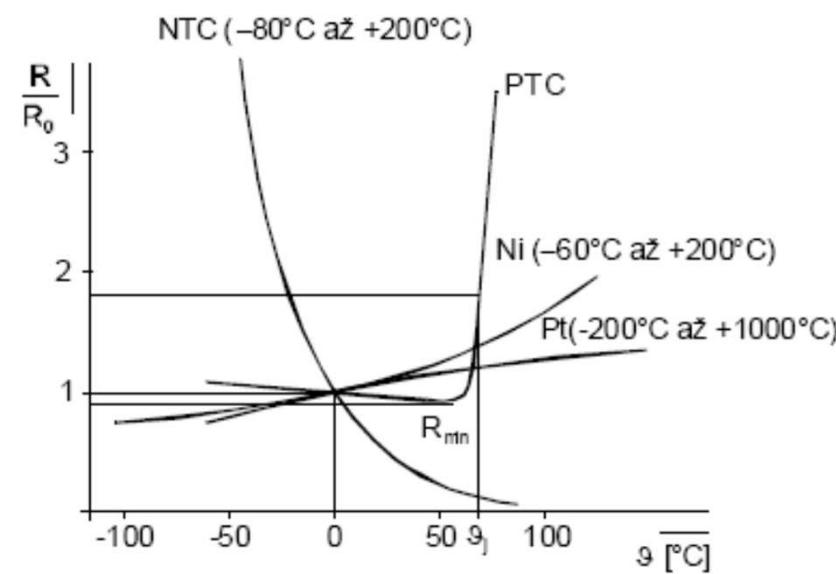
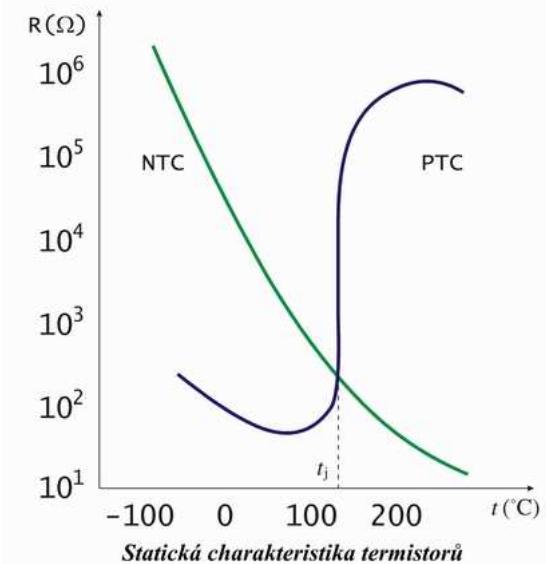
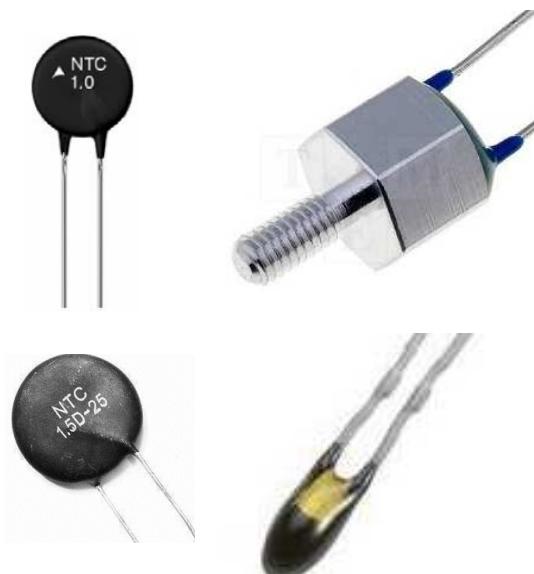
Další materiály (měď, železo) nejsou příliš vhodné pro snadnou oxidaci.



# Tepelné snímače

## Termistory

- Nelineární polovodičové součástky
- velká závislost odporu na teplotě
- teplotní součinitel odporu 5 – 50 x větší než u kovu
- vyráběny práškovou technologií
- NTC S123

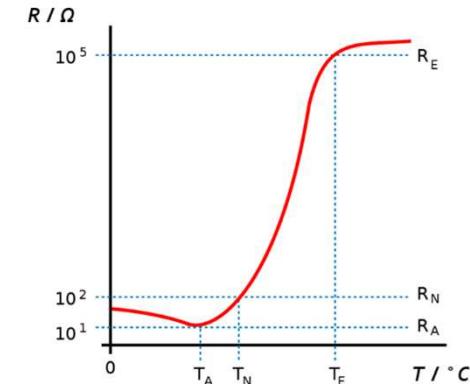
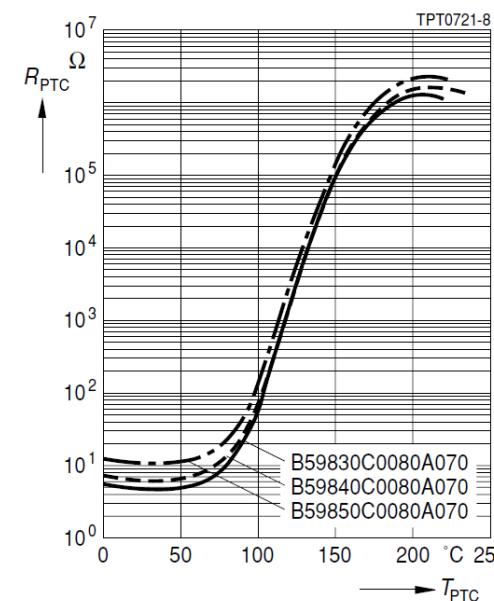
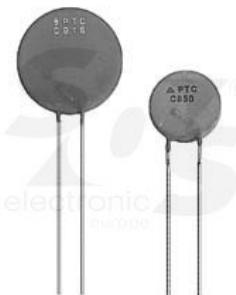




# Tepelné snímače

## Pozistory

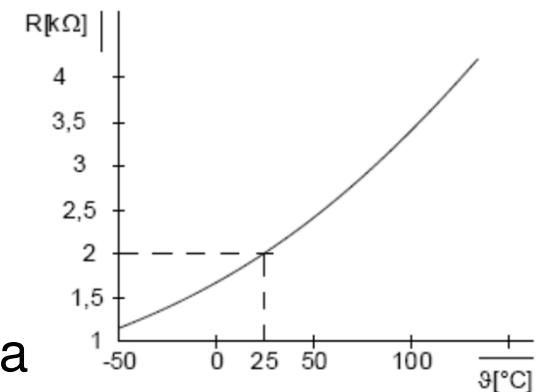
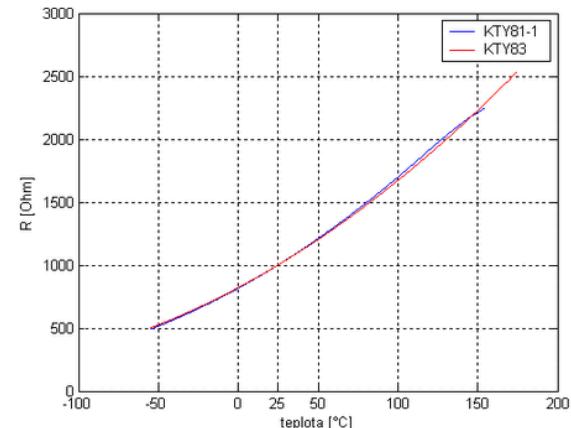
- polovodičové polykrystalické součástky s kladným teplotním součinitelem odporu
- nejdříve mírný pokles odporu s teplotou
- v určité fázi prudký vzestup – teplotní ochrana zařízení
- poté odpor opět mírně klesá
- malá časová stálost
- nezaměnitelnost
- PTC256V





## Tepelné snímače

- **Monokrystalické bez PN přechodu**
- **závislost specifického odporu monokrystalického materiálu na teplotě**
- dlouhodobě stálé
- zároveň závislost na magnetickém poli
- daleko menší cena než Pt
- Ge čidla 1,5 K do 75 K. Pro 1 až 30 K nejpřesnější a nejcitlivější. Citlivost na magnetické pole.
- Gallium-arzenidová rozsah 3 až 300 K. Mají menší závislost odporu na magnetickém poli než Ge.
- Křemíková čidla jsou vhodná pro rozsah  $-160^{\circ}\text{C}$  až  $300^{\circ}\text{C}$ .
- Philips KTY71 -55 +150°C , 0.79 - %/K,  $R_{100}/R_{25}=1.7$

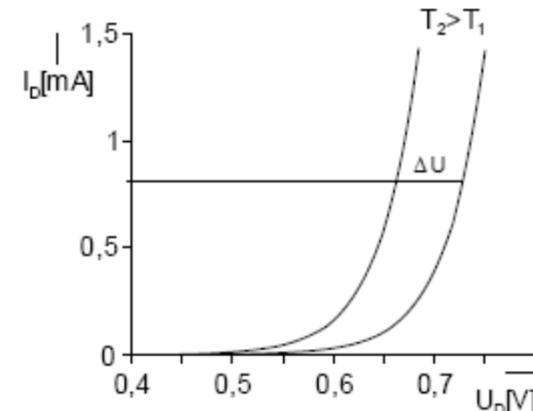




## Tepelné snímače

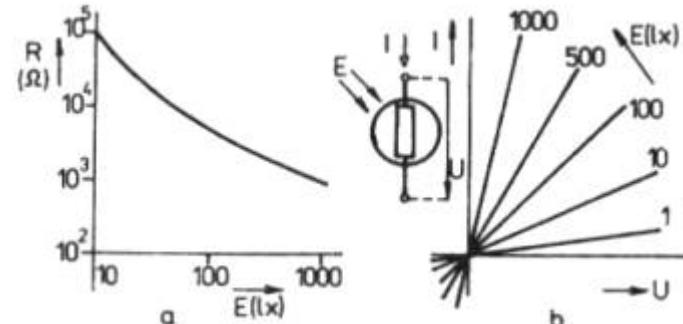
### Monokrystalické s PN přechodem

- Si, Ge a Ga-As.
- **lineární závislost úbytku napětí na přechodu na teplotě.**
  - Při napájení diody konstantním proudem
- 1až 30 K je citlivost čidla  $-55 \text{ mV/K}$
- pro 30 K až 400 K cca  $-2,75 \text{ mV/K}$ .
- Si čidla - malý šum, citlivější na vnější magnetické pole.
- Diody Ga-As pro 1,5 až 400 K – lineární pro 50 až 400K
- Zenerovy diody – dle Zenerova  $-9 \text{ až } 110 \text{ mV/K}$ .  
Sériově se vyrábí čidlo teploty pro rozsah  $-40 \text{ až } 125^\circ\text{C}$  s citlivostí  $10 \text{ mV/K}$ .
- National Sem. LM35  $-40..110^\circ\text{C} 10\text{mV/K}$



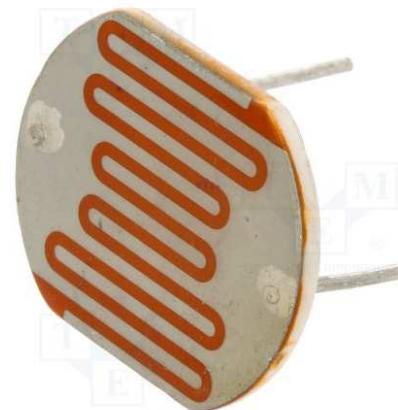


## Záření

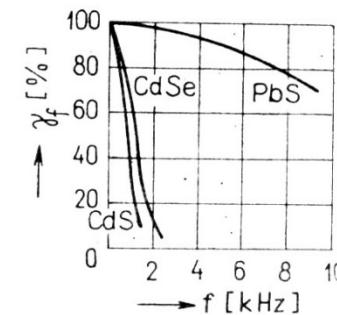
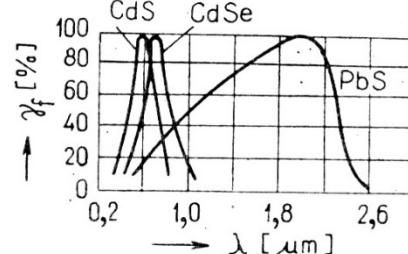


## Fotorezistory

- změna elektrického odporu polovodiče působením elektromagnetického záření.
- vlivem dopadajícího záření dochází k dodání energie elektronům
- Kladný a záporný fotoelektrický vodivostní jev – převažuje použití kladného
- Mat CdS (sirník kademnatý) max citlivost 515 nm
- Dlouhá časová konstanta cca 80ms/8ms  
> Fotodiody, Fototranzistory, Fototyristory



VT43NT  
300k Olux,  
8k při 10lux





## Záření



### Bolometry

- vlivem pohlcování zářivého toku se mění teplota odporového článku a její změna v elektrický odpor
- oblast 0.8 až 50um
- normální, nízká a teploty pro supravodivost
- detekce malých světelných zdrojů – vědecko-výzkumné měření, vesmír, termokamery
- **UL 01 12** formát pole (rozlišení): 320x240, 45 µm vzdálenost pixelů (mikrobolometrů na chipu) Materiál: Resistive amorphous silicon  
Časová konstanta: 4 ms Spektrální rozsah: 2 až 16 µm NETD: 85 mK (f/1, 300 K, 60 Hz) Dynamický teplotní rozsah měřeného objektu: až 1500°C Převodní konstanta: 6 mV/K Pracovní teplotní rozsah senzoru: - 40°C až + 80°C Chyba opakovatelnosti měření: < 1.6% Rozměry: 37.5 x 37.5 x 12.5 mm bez vývodů Spotřeba: < 200 mW

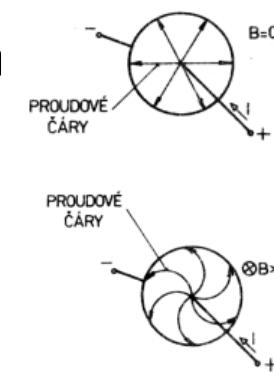
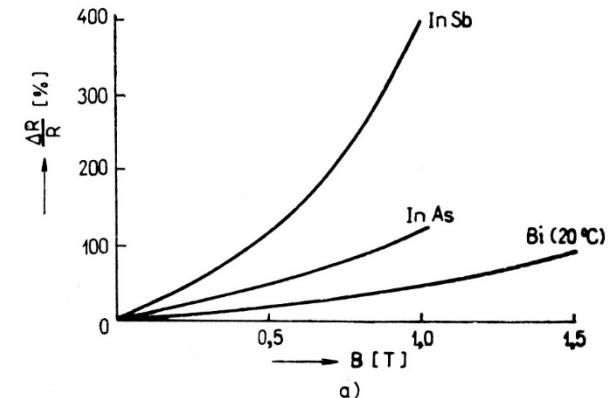




# Elektromagnetické pole

## Magnetorezistory

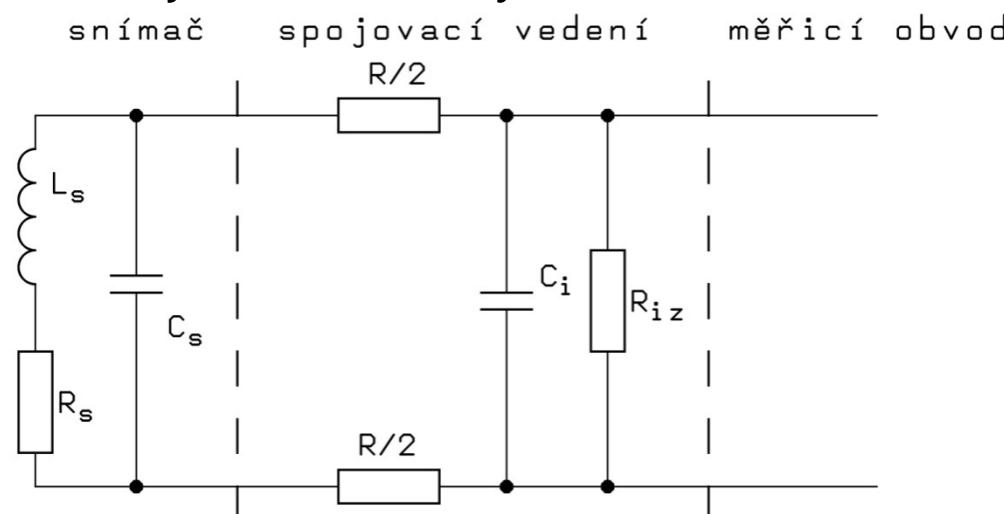
- Magnetoodporový jev: Magnetické pole působí na elektrony kterým mění původní dráhu. Elektrony narážejí a zvětšuje se tak odpor materiálu. Výsledná dráha elektronu má dvě složky: rovnoběžná se směrem elektrického proudu – zvětšuje odpor a kolmá zapříčinuje vznik Hallova napětí.
- nejvíce se projevuje u polovodičů, u kovů málo
- monokrystalický Ge, Si
- monokrystaly z chemických sloučenin
- polykrystaly z chemických sloučenin
- antimonid india – Corbinův disk
- Permalloy – např. 20 % Fe / 80 % Ni





## Spojovací vedení

- výrazně ovlivňuje vlastnosti snímače
- nahrazujeme elektrickým náhradním schématem



Pro zajištění správnosti měření musíme zajistit:  $R \ll R_s \ll R_{iz}$

Běžné hodnoty na 1m:  $R = 0.1\Omega$   $R_{iz} = 10^{10}\Omega$   $C_{iz} = 100pF$

Pro střídavé napájení musíme uvažovat také parazitní kapacitu vedení

$$X_C = \frac{1}{\omega} C_{iz}$$





## Zdroje informací

BENEŠ, P. a kol. *Automatizace a automatizační technika 3, Prostředky automatizační techniky*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 2003. ISBN 80-7226-248-3.

*Měřicí člen regulačního obvodu*. [online]. [cit. 2014-08-10]. Dostupné na WWW:  
[<http://www.spsei.cz/att/soubory/automatizace.pdf>](http://www.spsei.cz/att/soubory/automatizace.pdf).

SCHMID, D. a kol. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 1. vyd. Praha: Europa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-86106-10-9.

*Základy automatizace*. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné na WWW:  
[<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta\\_text.pdf>](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta_text.pdf)

Obrázky:

Obr. 2: *Základy automatizace*. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné na WWW:  
[<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta\\_text.pdf>](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta_text.pdf).

Obr. 3: *Základy automatizace*. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné na WWW:  
[<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta\\_text.pdf>](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta_text.pdf).





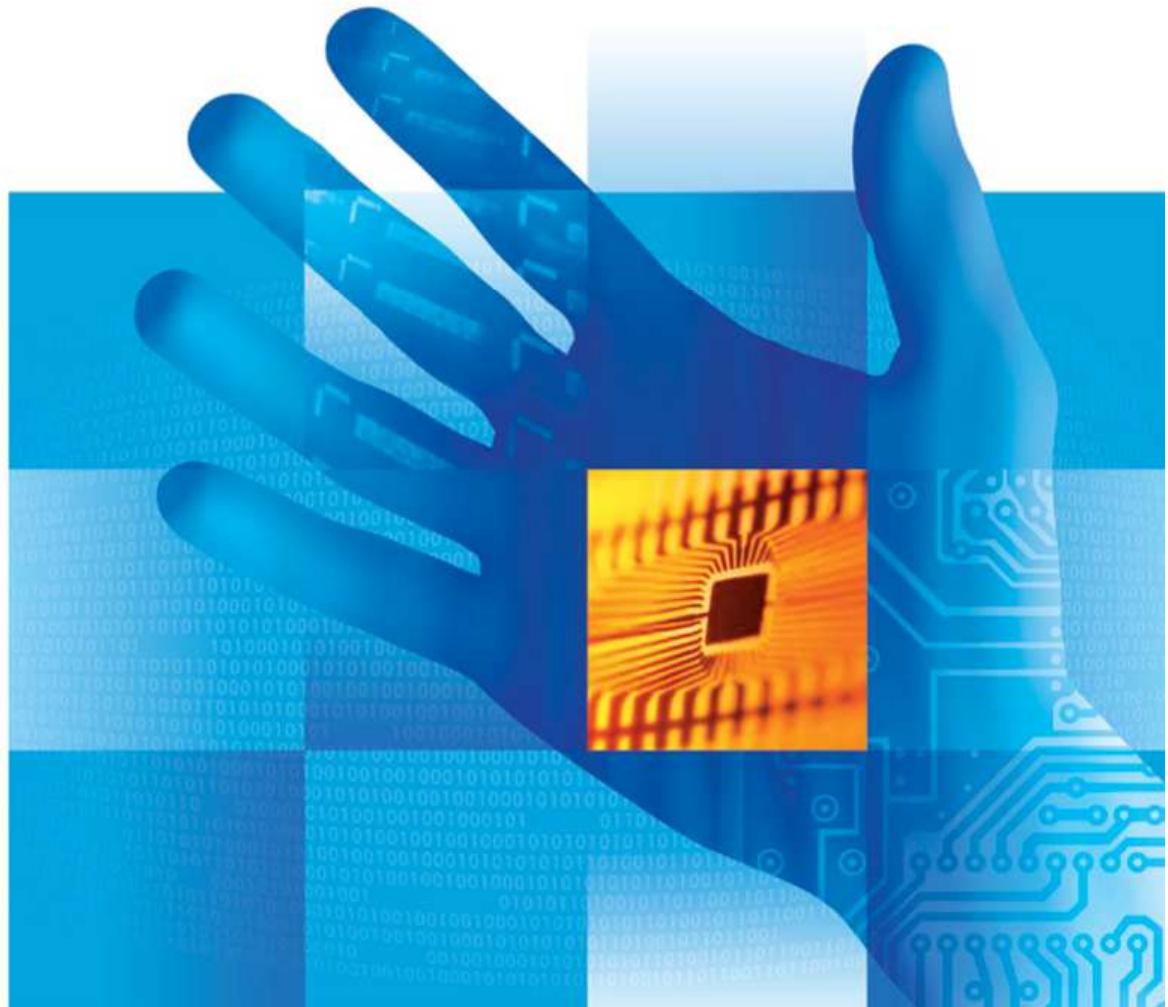
# Senzory a Měření

## 5 – Kapacitní, indukčnostní a indukční snímače.

Kat.450

Fakulta elektrotechniky a informatiky

VŠB-TUO





## Obsah

1. **Kapacitní snímače**
2. Spojovací vedení
3. Principy
4. Vlastnosti
5. Silové působení
6. Použití
7. **Indukčnostní snímače**
8. Spojovací vedení
9. Principy
10. Vlastnosti
11. Použití





## Kapacitní a indukčnostní snímače

- Mění se reaktance senzoru nebo celého obvodu.
- Některé metody změny reaktance vůbec nevyžadují **mechanický kontakt** s měřeným systémem. Pokud ano, zpravidla představují pro systém jen minimální zátěž.
- Některé z těchto senzorů vykazují principiální nelinearitu, která vyplývá z povahy změny měřené veličiny, respektive ze závislosti reaktance na dané proměnné veličině.
- Je nutné vzít v úvahu omezení pro maximální frekvenci měřené veličiny. Ta musí být nižší než frekvence budicího signálu, kterým je **střídavé** napětí nebo proud.





## Kapacitní snímače

- pasivní snímače
- převádějí měřenou neelektrickou veličinu na změnu kapacity
- Kapacitní snímače reagují na změny kapacity, která je vyvolána přiblížením předmětu.
  - Výhodou je, že reagují téměř všechny materiály, od kovů až po oleje.
  - Kapacitní snímač je také schopný "vidět skrz" nekovové materiály. Klasickým příkladem je detektor výšky hladiny.
- zapojujeme do obvodu s pomocným napětím (nevývážený nebo vyvážený můstek,...)





## Kapacitní snímače





## Princip

- je dvou nebo více-elektrodový systém
- převádí změnu neelektrické veličiny na elektrickou
- Kapacita snímače

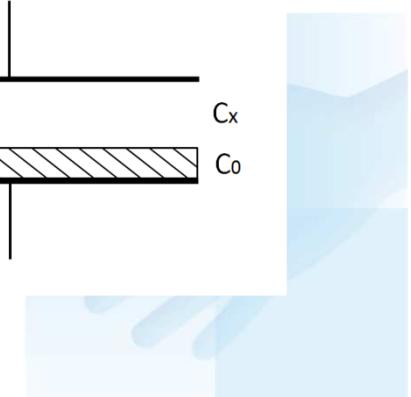
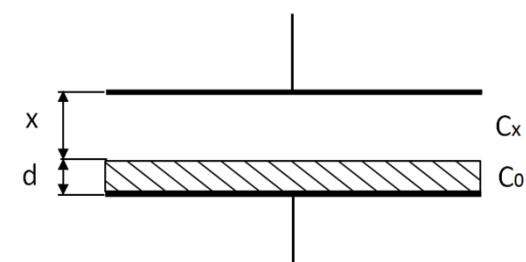
$$C = \frac{Q}{U} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

kde:

S	plocha elektrod
d	tloušťka dielektrika (vzdálenost elektrod)
$\epsilon_r$	poměrná permitivita prostředí
$\epsilon_0$	permitivita vakua (pF/m)

Změna kapacitance:

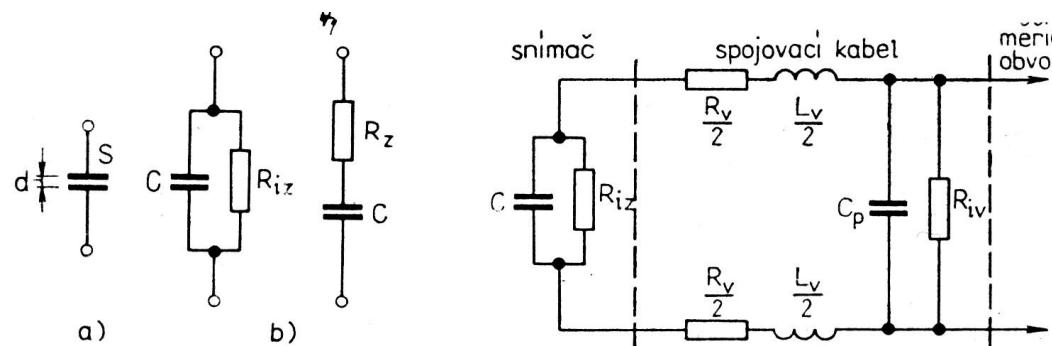
- změnou mezery mezi deskami
- změnou plochy desek
- změnou dielektrika





## Spojovací vedení

- výrazně ovlivňuje vlastnosti snímače
- nahrazujeme elektrickým náhradním schématem



Pro zajištění správnosti měření musíme zajistit:

$$R_V, \omega L_V \ll \frac{1}{\omega C} \ll R_{iv}, \frac{1}{\omega C_p}$$





# Principy kapacitních snímačů

Typ snímače	schema	funkční vztahy	charakteristika
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		$C = \epsilon \frac{S}{d(x)} ; \quad \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	
deskový diferenční s proměnnou mezerou		$C_1 = \epsilon \frac{S}{d(x)} ; \quad \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d} \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$ $C_2 = \epsilon \frac{S}{d(x)} ;$	
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \epsilon_1}{\epsilon_2}} ; \quad \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} \cdot \frac{1}{N} - \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2}$ $N = \frac{\epsilon_2 (d_1 + d_2)}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}$	
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)}$	
deskový s proměnnou plochou překrytí		$C = \epsilon \frac{S(x)}{d} ; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right)$	

# Principy kapacitních snímačů

Typ snímače	schema	funkční vztahy	charakteristika
deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]$	
deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí dielektrika		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1 + d_2} \left[ 1 + \frac{l(x)}{l_{\max}} \cdot \frac{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \right]$	
válcový s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{2\pi \cdot l(x)}{\ln \frac{D_1}{D_2}}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]$	
diferenční s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}$	

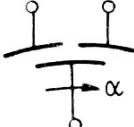
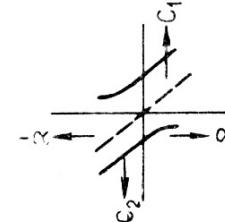
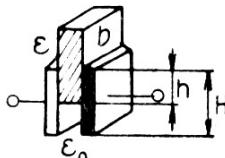
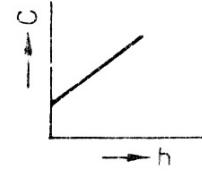
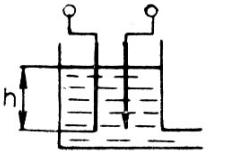
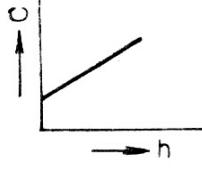
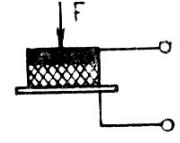
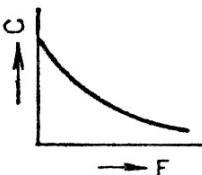


## Principy kapacitních snímačů

Druh snímače	Schéma	Hlavní rovnice	Charakteristika	Poznámka
Mezerový		$C = \epsilon_0 \epsilon_r S \frac{1}{d}$		Do 1 mm
Diferenční mezerový		$C = \epsilon_0 \epsilon_r S \frac{1}{d}$		Do 1 mm
Překrývací		$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} S$		Nad 1 mm



## Principy kapacitních snímačů

Diferenční překrývací		$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} S$		Nad 1 mm
S pro- měnnou permiti- vitou		$C = b[H\epsilon_0 + h(\epsilon_r - \epsilon_0)]$ $S = bH$		Malé ztráty dielek- trika
Hladino- měr		$C = b[H\epsilon_0 + h(\epsilon_r - \epsilon_0)]$ $S = bH$		
S defor- mací pro- měnnou permiti- vitou				





## Silové působení

- Vliv přitahování elektrod kapacitního snímače je nutné uvažovat při měření malých sil (tlaků).
- Elektrody se přitahují silou:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{SU^2}{d^2}$$

- Tato síla musí být alespoň o jeden řád menší než síla, kterou snímáme.





## Vlastnosti kapacitních snímačů

- velmi citlivé
- jednoduchá konstrukce
- malá hmotnost elektrod (velký frekvenční rozsah např. mikrofon)
- problém vedení
- jednoznačná závislost mezi neel. a el. veličinou bez hystereze
- lze dosáhnout lineární závislosti
- nezávislost na magnetických polích
- Pro konstrukci je nutné respektovat:
  - Změnu rozměrů vlivem teploty
  - Povrchové cesty z důvodu vysoké impedance snímače
  - Mezera mezi elektrodami max 0.2 až 0.3 mm



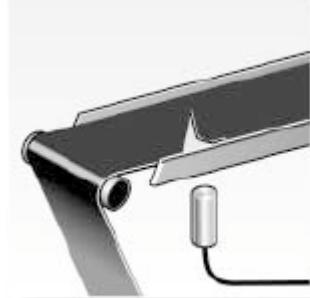
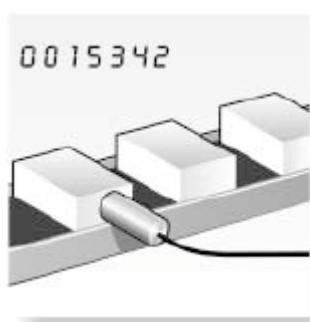
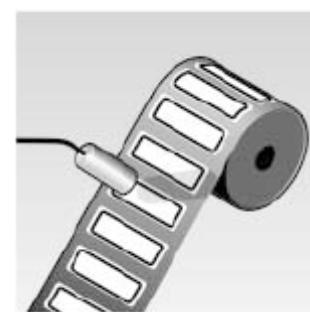
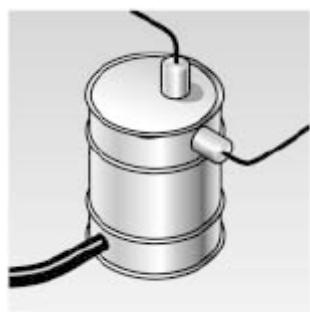
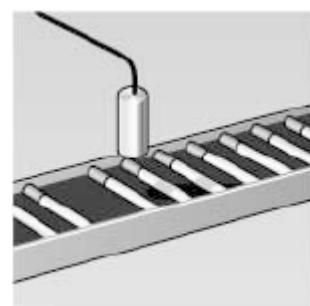
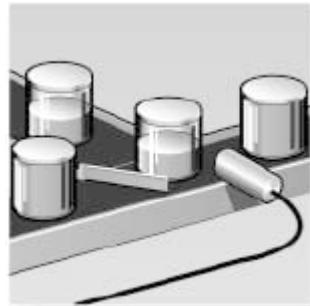
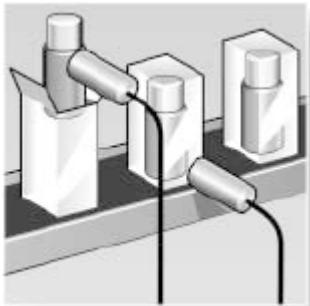


## Použití kapacitních snímačů

- poloha (změna vzdálenosti nebo plochy elektrod)
- tlaková síla (změna vzdálenosti elektrod)
- tlak (membrána + pomocná elektroda)
- kroutící moment (úhlové natočení elektrod)
- hladina (jedna elektroda je pevná, druhá elektroda je voda nebo mění se výška hladiny – plocha dielektrika)
- vlhkost (dielektrikum saje vodu a mění tím relativní permitivitu , jedna elektroda Au propouští vodu, dielektrikum  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -korund, konstrukční keramika)
- ....



## Použití kapacitních snímačů

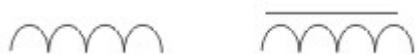


1. Kontrola na balících linkách.  
Zabalení, obsah.
2. Kontrola výšky hladiny v plnících aplikacích. Řízení vyřazovací stanice.
3. Snímání přítomnosti a kvality např. při výrobě cigaret.
4. Řízení úrovně hladiny v plastových nebo skleněných nádržích.
5. Kontrola chybějících etiket na tenké podkladové folii.
6. Vedení nože snímáním kovové nitě, např. při dělení textilu.
7. Snímání a počítání předmětů.
8. Kontrola papírového, plastového nebo textilního pásu. Shora nebo zespodu.
9. Řízení vypouštění nebo plnění vodních nádrží.



## Indukčnostní snímače

- pasivní snímače
- měřená mechanická veličina se převádí na změnu vlastní nebo vzájemné indukčnosti.
- Indukčnostní snímač se vždy skládá z jedné nebo více cívek a bývají zapojeny do obvodu se zdrojem pomocného střídavého napětí. (nevývážený nebo vyvážený můstek ,...)





## Princip indukčnostních senzorů

- Základem je dvou nebo více-cívkový systém
- Převádí změnu neelektrické veličiny na elektrickou
- Indukčnost snímače (pro  $r \ll l$ )

kde:  $\mu$       permeabilita prostředí  
 $S$       průřez jádra cívky  
 $N$       počet závitů  
 $l$       délka cívky

$$L = \frac{Nd\Phi}{di}$$

$$L = \frac{N^2}{R}$$

$$L = \mu \frac{S}{l} N_z^2$$

- Princip činnosti spočívá v ovlivňování magnetického odporu  $R_m$  (reluktance) změnou:
  - magnetického toku (senzor s proměnnou vzduchovou mezerou)
  - permeability (senzory s pohyblivým jádrem).
- Měříme střídavým proudem, Ohmův zákon v komplexním tvaru  $I = U/Z_I$      $Z_I = j\omega L$      $\omega = 2\pi f$



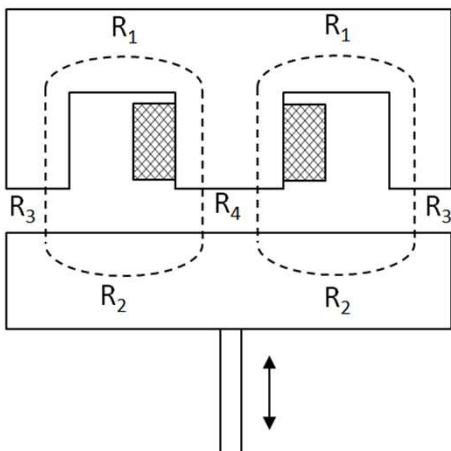
## Reluktance

$$L = \frac{N^2}{R}$$

$$R = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{l}{S} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l_0}{S_0} \approx \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{l}{S}$$

$$R = \sum \frac{1}{\mu_i} \cdot \frac{l_i}{S_i} + \sum \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l_{0i}}{S_{0i}}$$

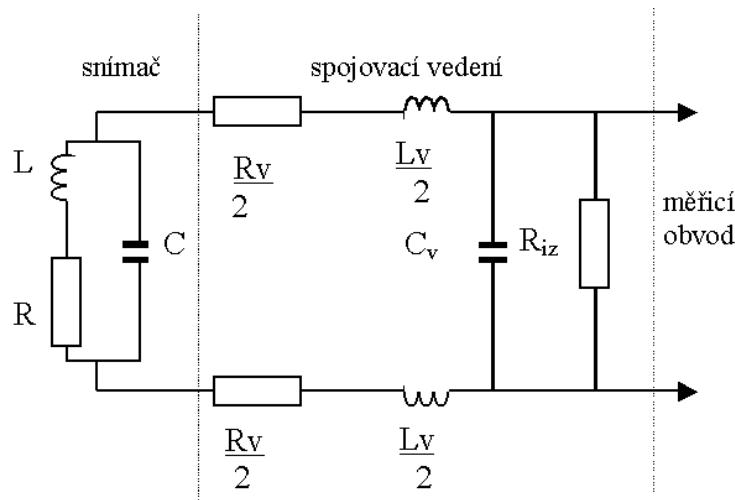
$$R = \frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{2} + \frac{R_3}{2} + R_4$$



- Vztah mezi L a R není konstantní v celém rozsahu délky cívky. Mění se na okrajích, kde vlivem rozptylu pole není uniformní.
- mezi R a L platí nepřímá úměra. Pokud je proměnným parametrem délka l nebo l<sub>0</sub>, je impedance snímače nepřímo úměrná této délce. Jestliže se mění permeabilita μ, jsou změny impedance přímo úměrné změně permeability.

## Spojovací vedení

- výrazně ovlivňuje vlastnosti indukčnostního snímače
- nahrazujeme elektrickým náhradním schématem



Pro zajištění správnosti měření musíme zajistit:

$$(R_V), \alpha L_V \ll \alpha L \ll (R_{iZ}), \frac{1}{\alpha C_V}$$

- Ztrátový odpor je dán činným odporem cívky a odporem reprezentujícím vířivé proudy v jádru a ztráty způsobené magnetickou hysterezí v případě použití magnetického jádra.
- Kapacity C a C<sub>v</sub> modelují parazitní kapacitu vinutí a přívodu kabelu.
- Indukčnost L představuje indukčnost vinutí snímače. Hodnoty L<sub>V</sub>, R<sub>V</sub> udávají indukčnost a odpor kabelu. R<sub>iZ</sub> je izolační odpor kabelu.





## Změna indukčnosti

Změna indukčnosti:

- změna cívky (poloha)
- změna jádra (poloha, vlastnosti)

Indukčnost:

- bez jádra
- s jádrem feromagnetickým (Fe, Ni, Co, slitiny)
- s jádrem elektricky vodivým

Uspořádání:

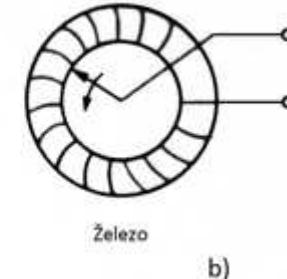
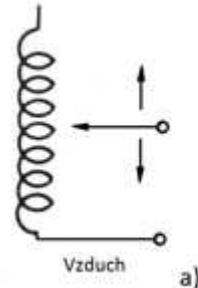
- snímač s malou vzduchovou mezerou
- snímač s otevřeným magnetickým obvodem
- snímač s potlačeným polem
- snímač bez feromagnetika.



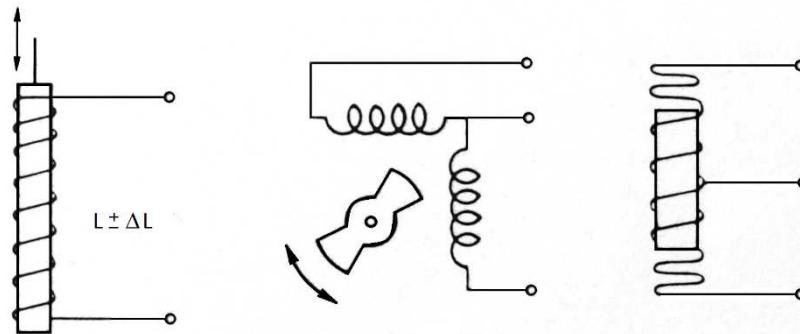


## Změna indukčnosti

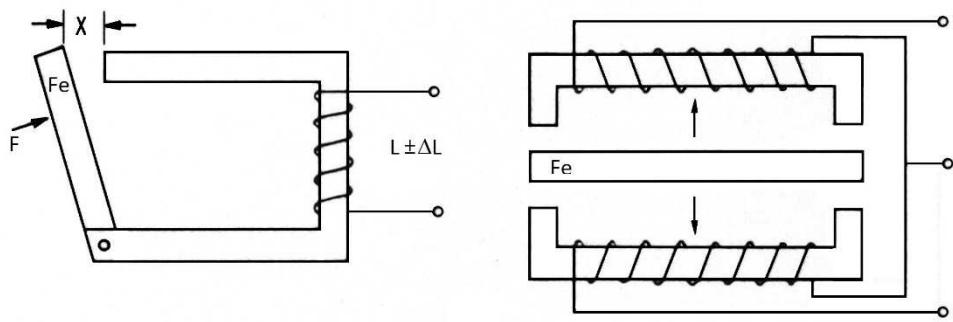
- Změnou počtu závitů



- Pohyblivé jádro



- Proměnná vzduchová mezera



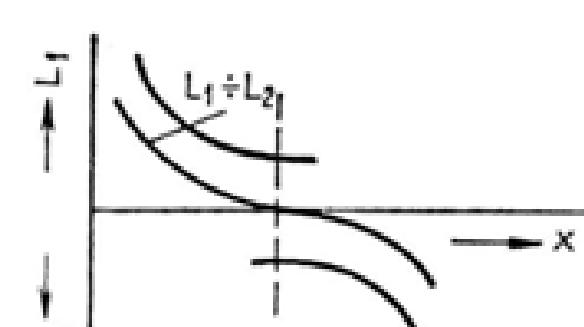
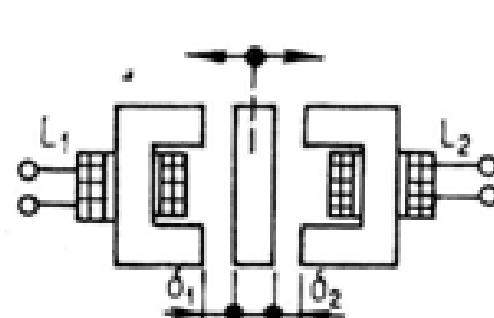
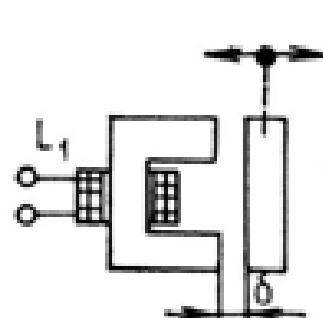


# Principy indukčnostních snímačů

## snímač s malou vzduchovou mezerou

- změna velikosti vzduchové mezery feromagnetika ( $\pm 3 \text{ um}$  až  $\pm 5\text{mm}$ )
- změna plochy vzduchové mezery feromagnetika
- pohyblivá cívka
- nejvíce rozšířené indukčnostní snímače
- velká nelinearity
- většinou v diferenčním uspořádání pro malé změny polohy
- materiál magnetického obvodu je ocel nebo ferit

$$L = \mu_f \frac{S}{l} N_z^2$$





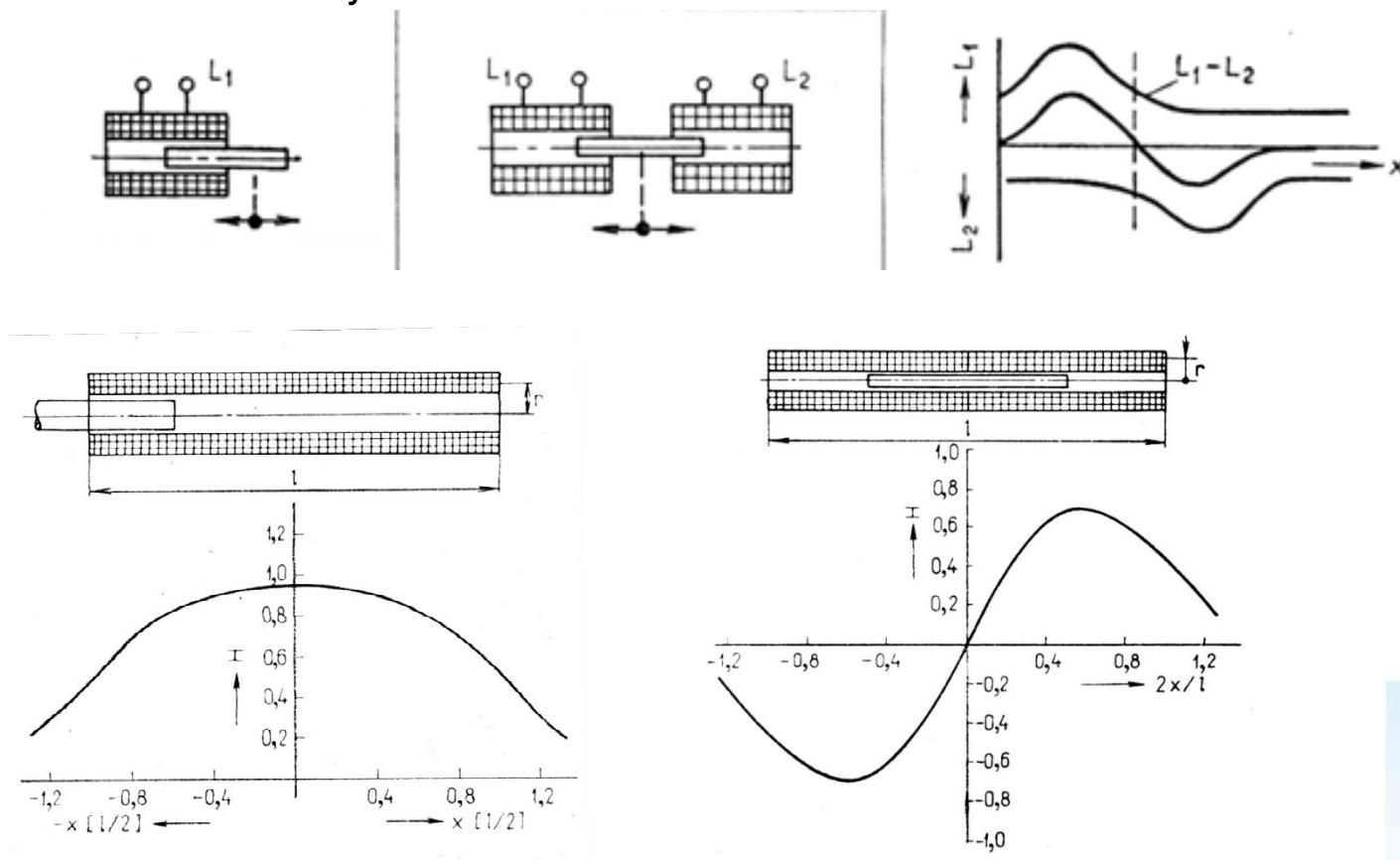
# Principy indukčnostních snímačů

## snímač s otevřeným magnetickým obvodem

Indukčnost jednovrstvého vinutí:

- snímač obvykle složen s cívky do které se zasouvá feromagnetické jádro
- cívka bývá umístěna do feromagnetického krytu (podélně rozdelen – není závit nakrátko)
- větší rozměry  $\pm 4\text{um}$  až  $\pm 100\text{mm}$

$$L = \frac{r^2}{l} N_Z^2$$



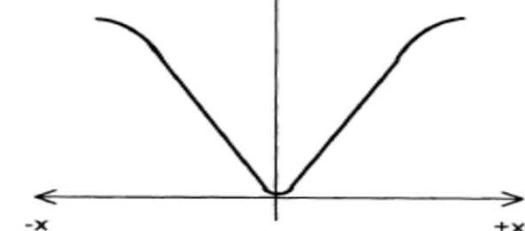
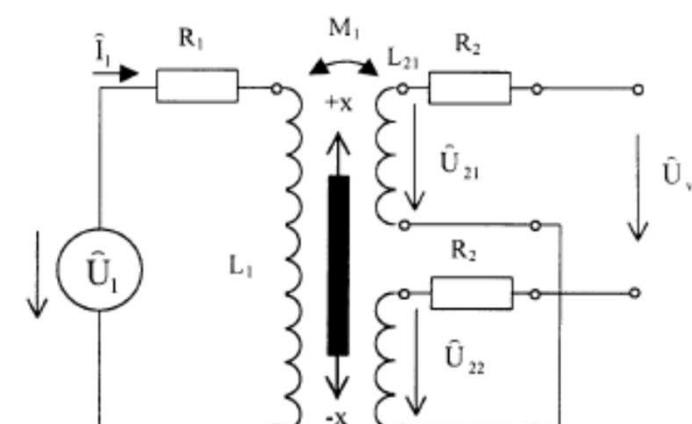
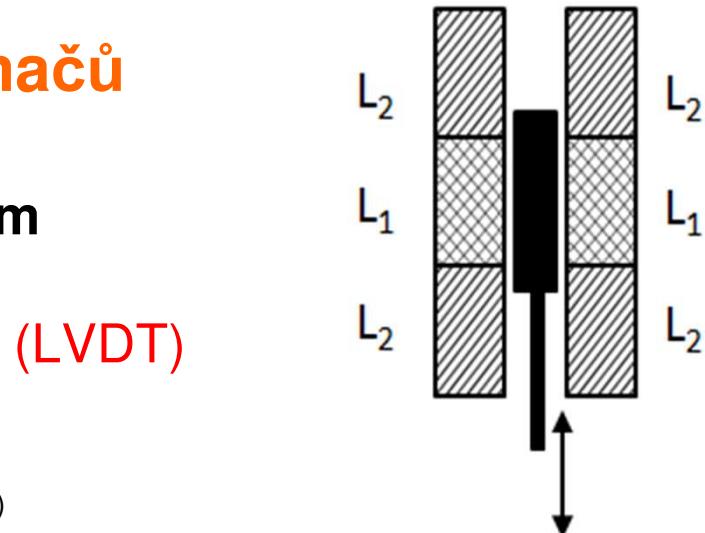


# Principy indukčnostních snímačů

## snímač s otevřeným magnetickým obvodem

### Lineární vysouvací diferenciální transformátor (LVDT)

- Bez tření – minimální zátěž měřené soustavy
- Vysoké rozlišení (omezeno jen šumem)
- Vysoká životnost – téměř neomezená (žádné mechanické kontakty)
- Velká přesnost , linearita 0,1 %
- Rozsah jednotky až stovky mm (podle typu)
- Při překročení rozsahu nedojde k poškození – dutina je průchozí
- Verze i pro velmi malá posunutí ( $\mu\text{m}$ )
- Velmi dobrá dynamická odezva – omezeno frekvencí napájení
- Poměrně odolné proti znečištění
- Absolutní snímač

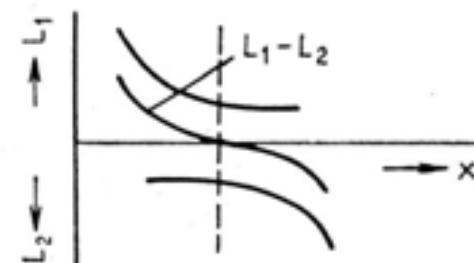
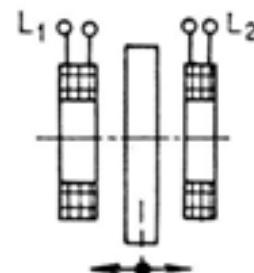
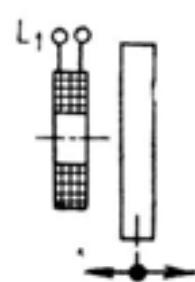




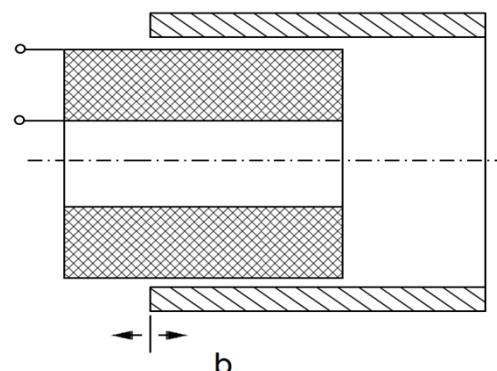
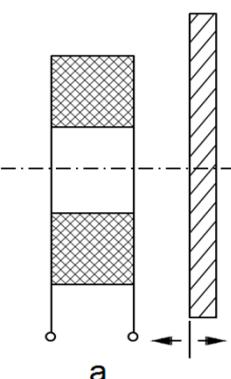
# Principy indukčnostních snímačů

## snímač s potlačeným polem (s vířivými proudy)

- vytvoření vířivých proudů v elektricky vodivém materiálu
- vhodné pro speciální měření – bezdotykové měření vzdálenosti nebo vibrací, menší citlivost ( $\pm 3 \mu\text{m}$  až  $\pm 5\text{mm}$ )
- velká nelinearity (pokud není diferenční)
- nepotřebují pro svou činnost magnetické materiály.



3  $\mu\text{m}$  až 5 mm

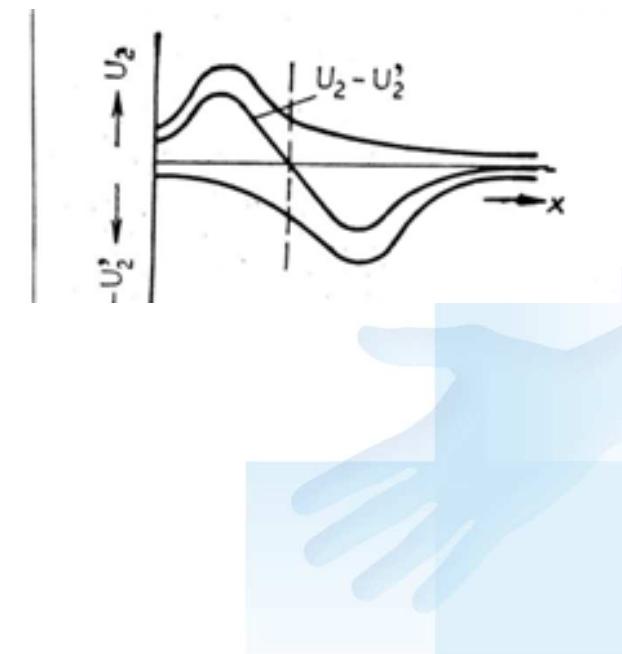
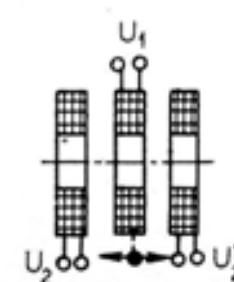
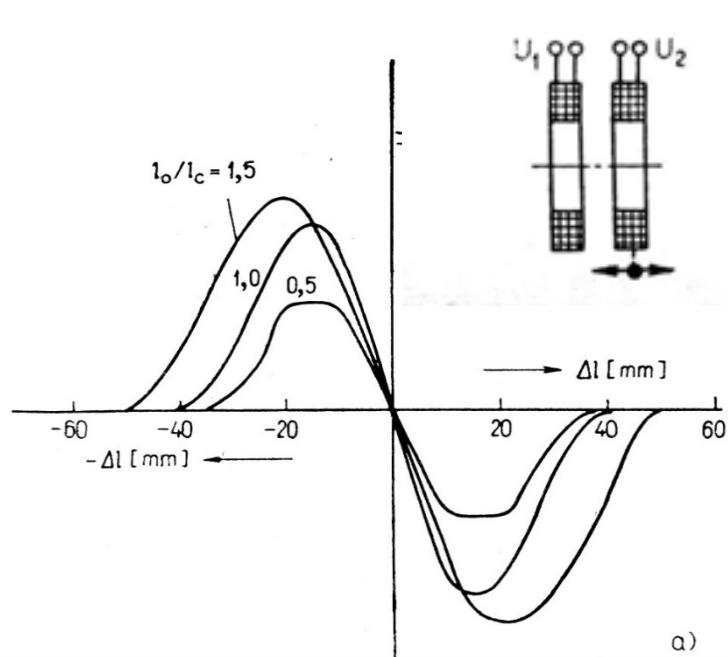


# Principy indukčnostních snímačů

## snímač bez feromagnetika

- vždy spojení dvou cívek se vzájemným posunutím
- většinou transformátorový a diferenční
- neobsahuje feromagnetickou část – odpadají parazitní feromagnetické vlivy
- přesný výpočet parametrů
- +1 um až +-5 mm

$$L = \frac{2.03a^2 N_z^2}{6a + 9b + 10c} [\mu\text{H}; \text{cm}]$$





# Principy indukčnostních snímačů

## snímač bez feromagnetika – Induktosyn

Lineární/rotační senzor polohy, cyklicky absolutní

Nad pravítkem se pohybuje jezdec se dvěma vinutími (posun o  $\lambda/4$ )



Obě vinutí jezdce se napájí střídavým napětím s fázovým posuvem  $90^\circ$ :

$$u_2 = U_m \sin \omega t \quad \text{a} \quad u_3 = U_m \cos \omega t$$

Pak napětí na pravítku bude:

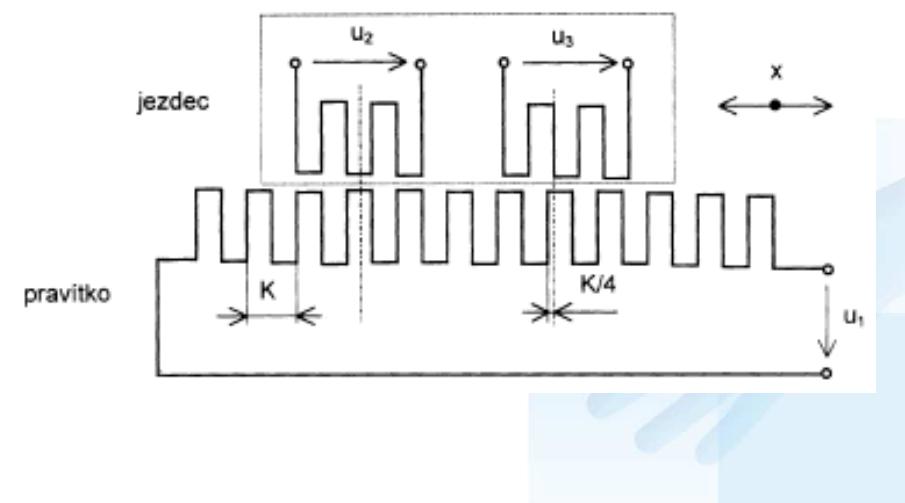
$$u_1 = u_2 + u_3 = k_1 U_m (\sin \omega t \sin \varphi + \cos \omega t \cos \varphi) = k_1 U_m \cos(\omega t - \varphi)$$

Přiřadíme-li délce kroku úhel  $2\pi$ , pak fázový úhel  $\varphi$  je přímo úměrný posunutí jezdce x. Platí:

$$x = \varphi \frac{K}{2\pi}$$

Pak můžeme vztah pro napětí pravítka vyjádřit jako:

$$u_1 = k_1 U_m \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{K}\right)$$





# Principy indukčnostních snímačů

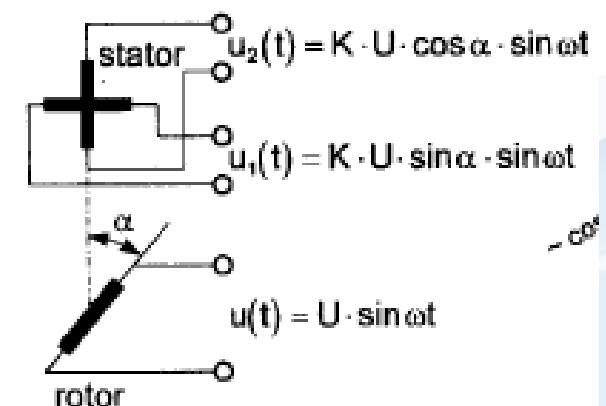
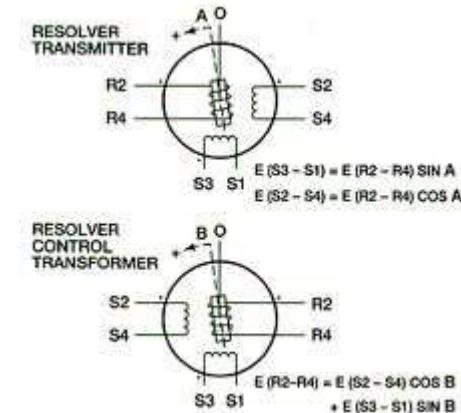


## Resolver

- Pro měření úhlového natočení
- Skládá se z dvou statorových vinutí pootočených o  $90^\circ$  a AC napájeného rotoru
  - bezkartáčové = přenos signálu z rotoru magnetickou vazbou (signálový rotační transformátor)
  - Nevýhody:
    - s kartáči = mechanický kontakt
    - připojení rotoru pohyblivým vodičem = nemůže se otáčet dokola, jen o určitý úhel ( $160^\circ$ )
- Zapojení s napájením do
  - rotoru
  - statoru

## Výhody:

- Absolutní snímač
- Robustní, relativně necitlivý k nečistotám

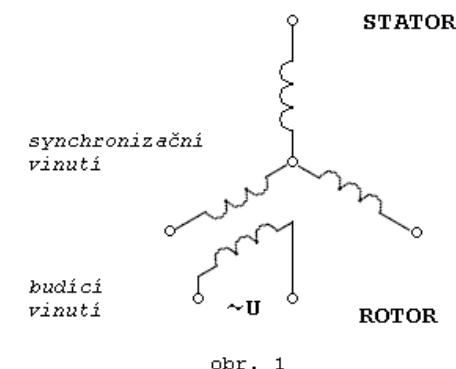




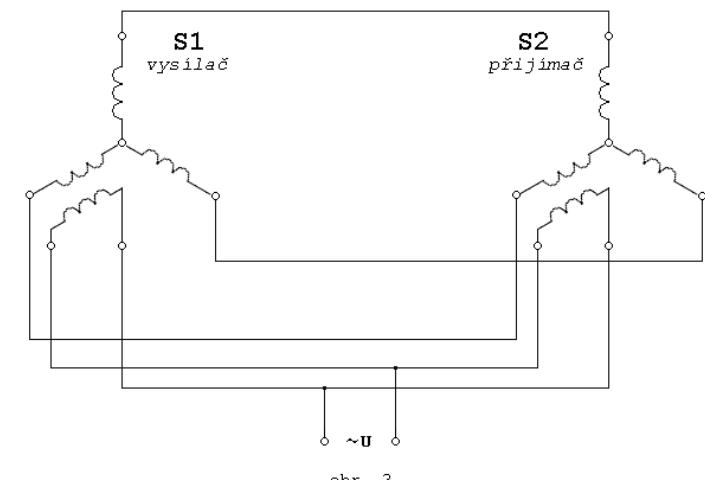
# Principy indukčnostních snímačů

## Selsyn

- Pro přímý přenos úhlové výchylky
- Skládá z pevné části **statoru** a otočné části **rotoru**, mezi kterými je vzduchová mezera.
  - **Na rotoru** je jednofázové budící vinutí, které je napájené z jednofázové střídavé sítě a slouží k vybuzení magnetického obvodu. Budící vinutí má oba konce vyvedeny na kroužky (proud do budícího vinutí se přivádí kartáčky).
  - **Na statoru** je trojfázové vinutí synchronizační, spojené do hvězdy nebo trojúhelníku (obr. 1).
- Natočíme-li rotor selsynu **S<sub>1</sub>** (vysílač) o úhel *alfa*, natočí se o stejný úhel i osa jeho magnetického pole. tím se poruší napěťová rovnost mezi příslušnými sdruženými napětími obou selsynů.



obr. 1



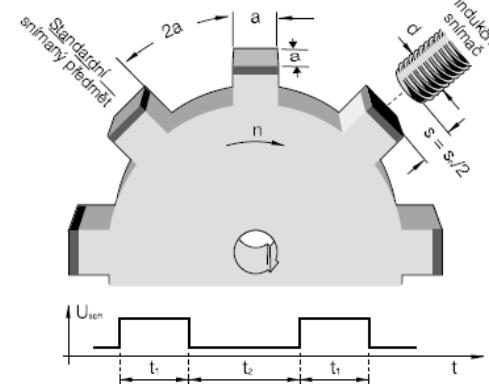
obr. 3



## Použití

### oscilátorové snímače

- využívá se principu ovládání indukčnostní zpětné vazby oscilátoru přiblížením kovového tělesa
- mezerový, průchozí, přibližovací
- skokový výstup (kmitá - nekmitá), plynulý výstup
- podle průměru cívky max. 4mm – 20mm



### selsyny a magnesyny

- snímaní natočení změnou magnetického obvodu





## Vlastnosti indukčnostních snímačů

- vliv rozptylových a rušivých magnetických polí. V některých případech je nutno obklopit senzor magnetickým stíněním, aby bylo zajištěno, že měřená změna je pouze změna způsobená měřeným jevem





# Použití indukčnostních snímačů

- měření rozměrů
- měření tlaku a tahu
- měření kroutícího momentu
- měření průtoku
- měření deformací
- měření zrychlení
- ...





## Indukční snímače

- **aktivní (generátorové)** snímače
- při převodu měřené neelektrické veličiny generují elektrické napětí
- změna indukované elektrické veličiny vlivem mechanické změny magnetického obvodu. Používá se spojení cívky a magnetického obvodu
- magnetický obvod tvoří pomocí perman. magnetu nebo budícího obvodu magnetický tok
- Faradayův zákon

kde:

$$u = -N_z \frac{d\Phi}{dt}$$

$N_z$  je počet závitů

$\frac{d\Phi}{dt}$  je časová změna magnetického toku na závitech





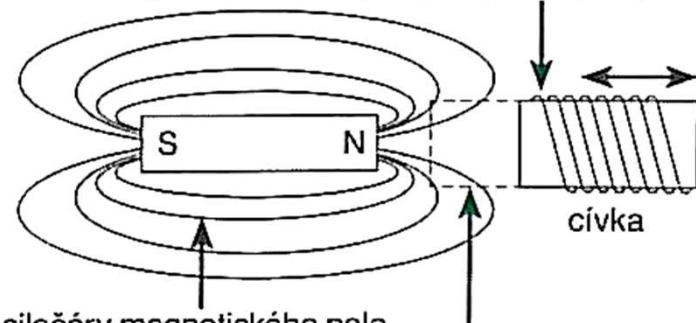
## Indukční snímače

Velmi zjednodušeně:

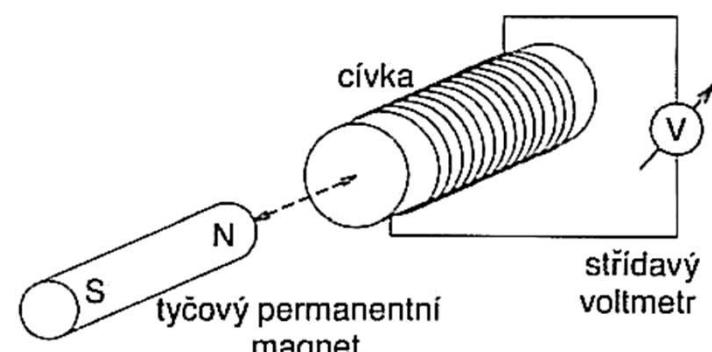
- Indukční snímač vychází ze skutečnosti, že v cívce vystavené proměnnému magnetickému poli se indukuje střídavé napětí.
- Zasunutím magnetu do cívky, prochází průrezem cívky velké množství siločar magnetického pole. Při oddálení, naopak.
- Budeme-li zasouvání a vysouvání provádět pomalu, indukuje se malé napětí, a naopak indukované napětí je úměrné časové změně magnetického toku.

$$u = -N_z \frac{d\Phi}{dt}$$

při oddálení cívky prochází jejím průrezem málo siločar magnetického pole (malý magnetický tok)



při přiblížení cívky k tyčovému magnetu prochází průrezem cívky mnoho siločar magnetického pole (velký magnetický tok)

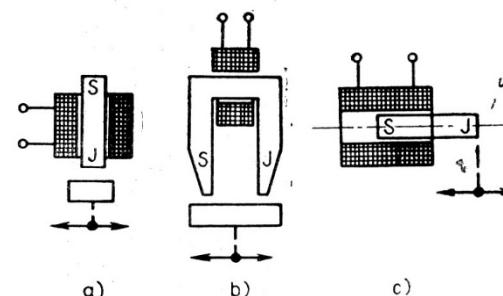
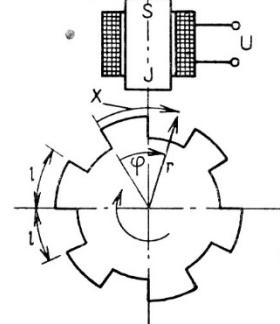
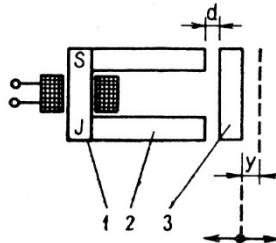
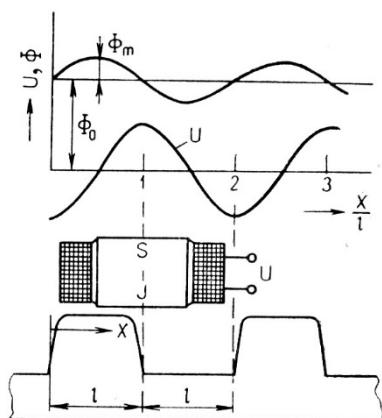


Střídavým přiblížováním a oddalováním magnetu (změnou magnetického toku cívkom) se v cívce indukuje napětí.



# Indukční snímače - elektromagnetické

- měřená neelektrická veličina působí na rychlosť změny magnetického toku  $\Phi$
- výstupní napětí je úměrné rychlosti pohybu – změně magnetického toku ve feromagnetech
- magnetický tok se mění změnou impedance magnetického obvodu





# Indukční snímače - elektrodynamické

## Tachodynamo

- měřená neelektrická veličina při stálém m.toku mění počet závitů, které jsou v magnetickém toku
- v magnetickém poli trvalého magnetu nebo elektromagnetu se otáčí kotva s vinutím. Konce vinutí jsou připojeny na komutátor. Zde odebíráme stejnosměrné napětí, které je úměrné otáčkám. Výstupní napětí je v rozsahu jednotek až stovek V. Linearita kolem 0.1-1%

$\phi_p$  magnetický tok jedné pólové dvojice

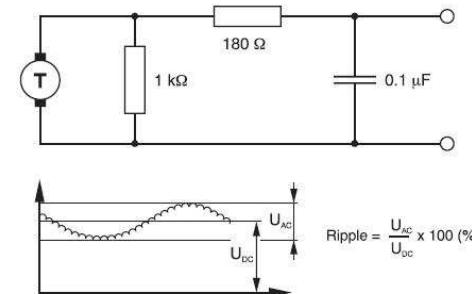
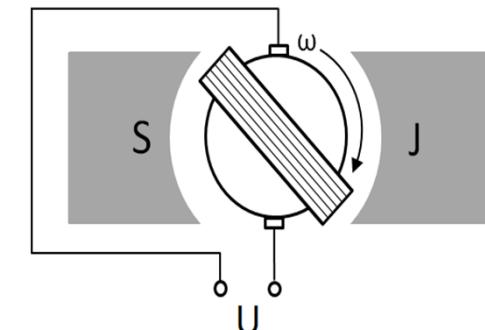
$p_p$  je počet pólových dvojic

$N_z$  počet závitů

$a_1$  počet párů paralelních vinutí

$n$  otáčky

$$U = \frac{p_p \phi_p N_z}{60 a_1}$$

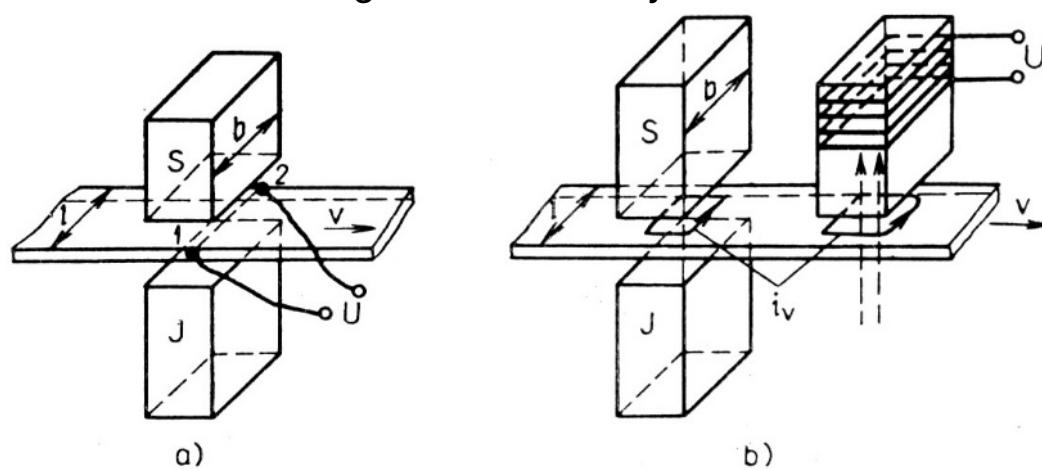




## Indukční snímače - elektrodynamické

- měřená neelektrická veličina při stálém m.toku mění počet závitů, které jsou v magnetickém toku
  - **la** délka aktivního vodiče
  - **v** rychlosť pásu ve směru kolmém na magnetické siločáry

$$U = B \cdot l_a \cdot v$$



- bez sběračů: ( $l_a > b$ ) pohybem vodiče v magnetickém poli se ve vodiči indukuje napětí, které vytvoří vířivé proudy. Těmito proudy se vybudí magnetický tok. Magnetický tok zasáhne cívku, která je v dané vzdálenosti od trvalých magnetů ve směru pohybu vodiče

$$U = K \cdot B \frac{dv}{dt}$$

