

Základy automatizace v IG

**Základní vlastnosti automatizovaných
měřicích systémů
Elektrické měřicí obvody
Pasivní snímače**

Jiří Pospíšil

**Katedra speciální geodézie
Fakulta stavební
ČVUT v Praze**

Základní vlastnosti AMS

1. Základní pojmy
2. Snímače
3. Elektrické měřicí obvody
 - stejnosměrné můstky
 - střídavé můstky
 - diferenční můstky

Základní vlastnosti AMS

1. Základní pojmy

Měření - proces získání informace o hodnotě měřené veličiny experimentální cestou pomocí vhodných technických prostředků

- rozlišujeme měření:

- analogové
- číslicové
- elektrické
- elektronické
- přímé
- nepřímé
- absolutní
- relativní

Automatizace – proces nahrazující řídící funkci člověka činností automatů nebo automatických zařízení

Automatizace měření - spočívá v nahrazení činnosti člověka při měření samočinnou funkcí měřicího přístroje nebo systému

Základní vlastnosti AMS

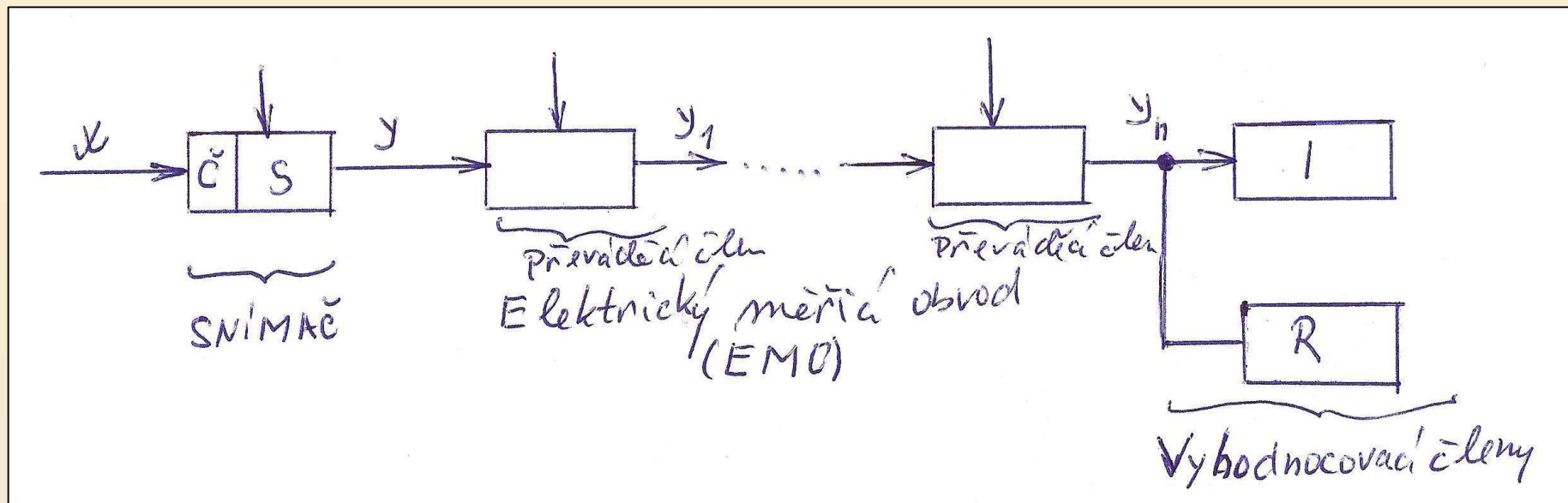
Automatizované úkony:

- zapojování
- nastavení napájení
- nastavení měřicích signálů
- nastavení měřicích obvodů
- volba měřicích rozsahů
- kvantování
- kódování
- záznam naměřených hodnot
- ...a další

Měřicí řetězec – soubor měřicích členů účelně uspořádaných tak, aby bylo možné splnit požadovaný úkol měření

Nejdůležitějším členem měřicího řetězce (obr. 1) je snímač (senzor), jehož první část – čidlo, je v přímém energetickém styku s měřeným objektem.

Základní vlastnosti AMS



obr. 1

Č – čidlo
S – senzor
I – indikátor
R – registrace, paměť

Základní vlastnosti AMS

2. Snímače

Snímač je součást nebo soustava vytvářející el. signál (nebo neel. signál), odpovídající měřené neelektrické veličině. Z hlediska konstrukce se skládá každý snímač z 5-ti základních částí:

- styková část
- citlivý prvek
- senzor
- vstupní – výstupní část
- kryt

Základní vlastnosti AMS

Styková část zprostředkuje přenos fyzikální veličiny z měřeného objektu na citlivý prvek snímače.

Citlivý prvek snímače je čidlo, které mění měřenou veličinu na veličinu zpracovatelnou senzorem.

Senzor transformuje fyzikální veličinu čidla na veličinu elektrickou. V literatuře se často setkáváme s používáním termínu senzor ve významu širším – nahrazujícím termín snímač.

Vstupní - výstupní část snímače se používá jednak na úpravu vstupního (napájecího) napětí (proudu) na napětí (proud) vhodné pro snímač, jako i na úpravu výstupního signálu senzoru tak, aby byl vhodný na přenos (zesílení, modulace apod.).

Kryt je část snímače, která plní často velmi důležitou úlohu. Kromě jeho prvořadé úlohy – ochrany, plní často ve spojení se stykovou částí úlohu přenosu.

Základní vlastnosti AMS

Snímače dělíme na:

- aktivní (generátorové): převádějí energii úměrnou měřené veličině přímo na energii elektrickou
 - pasivní (parametrické): při působení měřené veličiny se mění některý ze vstupních parametrů (odpor, kapacita, ...). Na rozdíl od aktivních snímačů je nezbytné napájení.
- podle výstupního signálu:
 - analogové – výstupní signál se mění spojitě
 - číslicové – výstupní signál má číslicový tvar
 - podle vstupní nebo výstupní veličiny:
 - polohy, rychlosti, teploty, záření, ...
 - odporové, indukčnostní, kapacitní, indukční
 - podle přenosu:
 - dotykové – přenos realizovaný mechanickým dotykem
 - bezdotykové – přenos realizovaný bez mechanického dotyku

Základní vlastnosti AMS

Základní požadavky na snímač:

1. Jednoznačná závislost výstupní veličiny na vstupní (bez hystereze).
2. Vhodný a přesný tvar vztahu mezi výstupní a vstupní veličinou, nejčastěji lineární, někdy kvadratický, logaritmický, goniometrický, ...
Dává-li snímač sám potřebnou funkční závislost, odpadá jedna transformace el. signálu, která je spojena se zkreslením a vyžaduje použití dalších obvodů.
3. Velká citlivost, tj. poměr změn výstupní veličiny a vstupní veličiny.
 - a) lineární závislost - S_a
 - b) nelineární závislost - S_d
 - c) relativní citlivost je poměr relativních diferenciálních změn - S_r

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

$$S_d = \frac{dy}{dx}$$

$$S_r = \frac{\frac{dy}{y}}{\frac{dx}{x}}$$

Základní vlastnosti AMS

4. Stálost charakteristik v čase a shodnost charakteristik (záměnnost mezi jednotlivými kusy snímačů).
5. Vhodné časové charakteristiky – obvykle se požaduje co nejmenší časová konstanta – zanedbatelné zpoždění.
6. Minimální vliv vnějších činitelů (teplota, poloha, chvění apod.) na charakteristiky snímače.
7. Nízká spotřeba měřené energie.

Výstupní elektrická veličina snímače je dále zpracovávána v elektrickém měřicím obvodu (EMO) na tvar a velikost požadovanou pro vyhodnocení. EMO je složen z převáděcích členů jako jsou zesilovače, generátory, místkové obvody, filtry, počítačí obvody, funkční měniče umožňující manipulaci s tvarem a velikostí signálu snímače.

Základní vlastnosti AMS

Výstupní veličina z EMO je zpracovávána vyhodnocovacími členy (indikátory) na formu přístupnou lidskému vnímání.

1. analogový údaj – ručkové měřicí přístroje
2. číslicový údaj – číslicové displeje
 - digitrony
 - svítící segmenty
 - kapalně krystaly

Důležitým členem vyhodnocovacího zařízení je registrace (paměť).

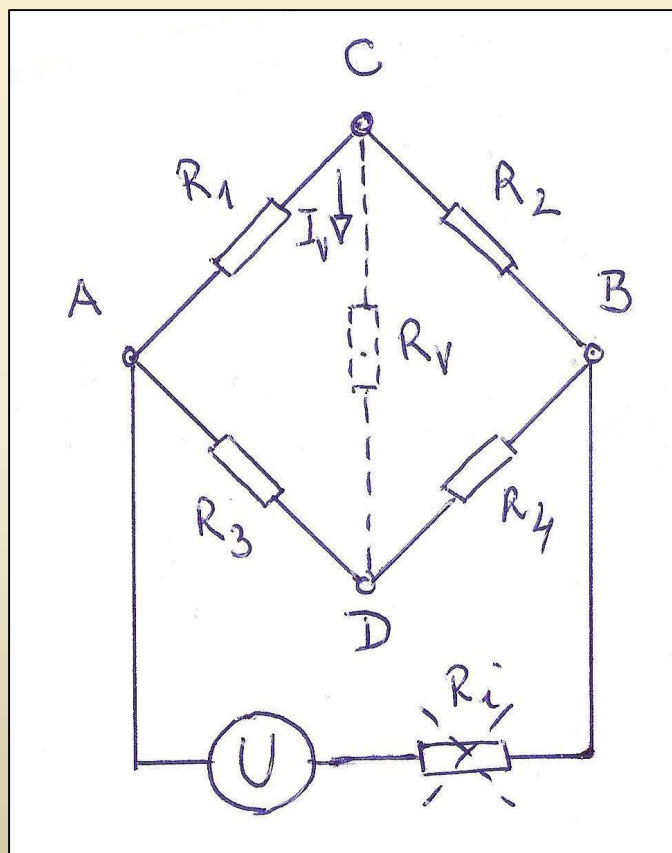
1. analogový signál – zapisovač
 - měřicí magnetofon
2. číslicový signál – polovodičové paměti
 - měřicí magnetofon
 - disky
 - karty

Elektrické měřicí obvody

3. Elektrické měřicí obvody - EMO

Změnou odporu R , indukčnosti L nebo kapacity C způsobenou měřenou neelektrickou veličinou převádíme na změnu napětí (proudu) nejčastěji můstkovým obvodem (obr. 2).

Stejnoseměrné můstky



obr. 2

Elektrické měřicí obvody

Svorky AB jsou napájené ze zdroje U_S s vnitřním odporem R_i . Tento odpor vzhledem k velikostem odporů R_1, R_2, R_3, R_4 zanedbáváme. Výstupní napětí na měřicí úhlopříčce mezi body CD je úměrné změně některého z odporů (R_1, R_2, R_3, R_4). Toto napětí způsobí proud I_V , který protéká do vstupního odporu R_V následujícího stupně (obvykle zesilovače).

$$I_V = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_V (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)}$$

Nechť odpor R_1 je snímačem, který mění hodnotu odporu se změnou měřené veličiny, pak $I_V = 0$ pro:

$$\boxed{R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3} \quad - \text{podmínka rovnováhy}$$

a mluvíme pak o tzv. vyváženém můstku.

Nevyvážené můstky – zaznamenáváme napětí nebo proud v měřicí diagonále a po zesílení a eventuální úpravě získáme trvalý záznam měřené veličiny.

Elektrické měřicí obvody

V praxi však bývá $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$. Necht' senzor R_1 mění svůj odpor v rozmezí $R_0 \pm \Delta R$, pak:

$$\Delta I_V = U \frac{(R_0 \pm \Delta R) R_0 - R_0^2}{R_V (R_0 \pm \Delta R + R_0)(R_0 + R_0) + (R_0 \pm \Delta R) R_0 (R_0 + R_0) + R_0 R_0 (R_0 \pm \Delta R + R_0)}$$

Za předpokladu $\Delta R \ll R_0$ je: $\Delta I_V = \frac{U}{4(R_V + R_0)} \cdot \frac{\pm \Delta R}{R_0}$

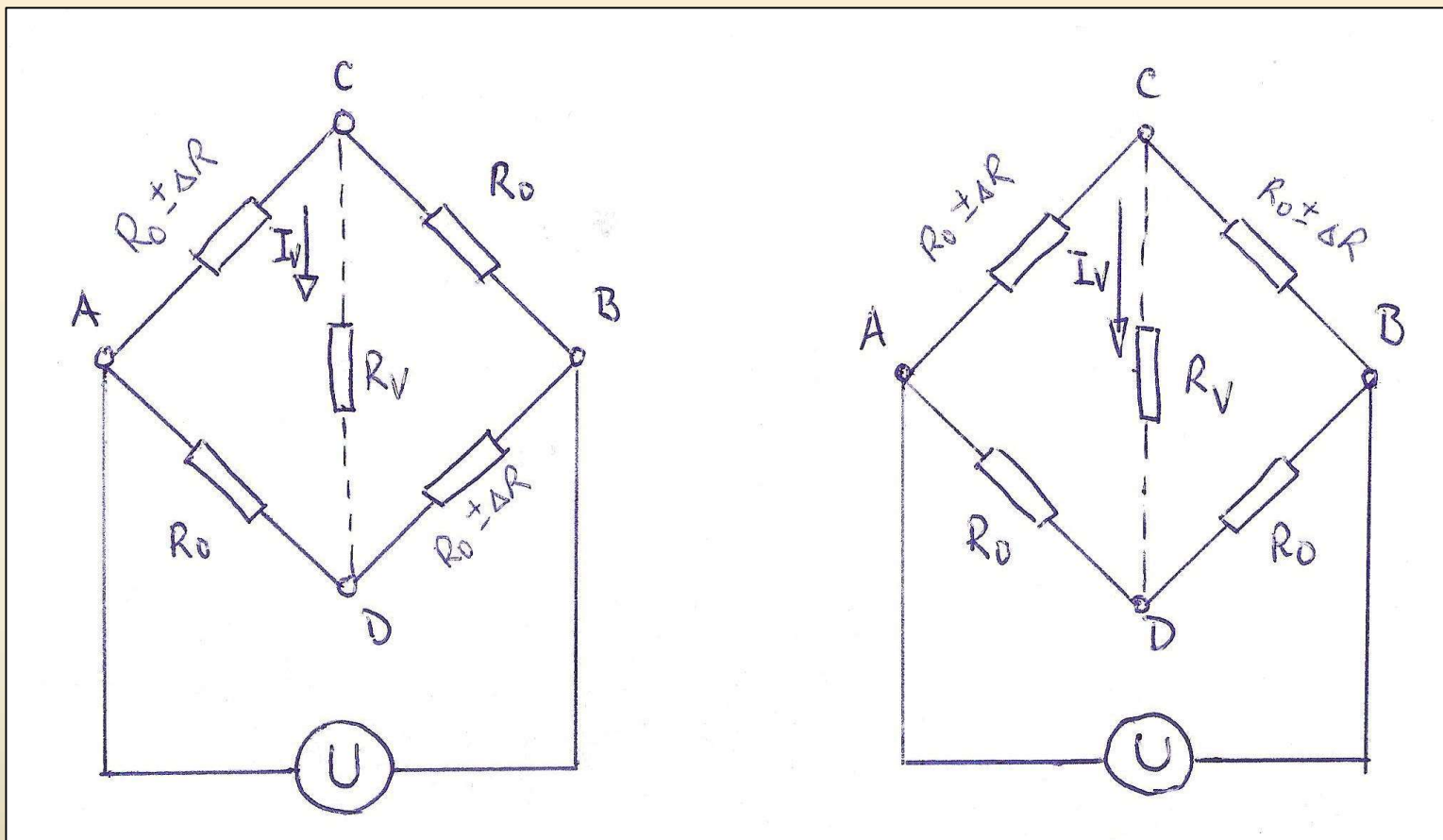
Proudová citlivost můstku: $S = \frac{\Delta I_V}{\frac{\Delta R}{R_0}} = \frac{U}{4(R_V + R_0)} = \text{teoreticky konstantní}$

Pro $\Delta R \ll R_0$ je $\Delta I_V = f\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)$ lineární.

Citlivost můstku použitím 2 nebo 4 snímačů zároveň zvětšíme 2x nebo 4x.

Elektrické měřicí obvody

Zapojení 2 snímačů:

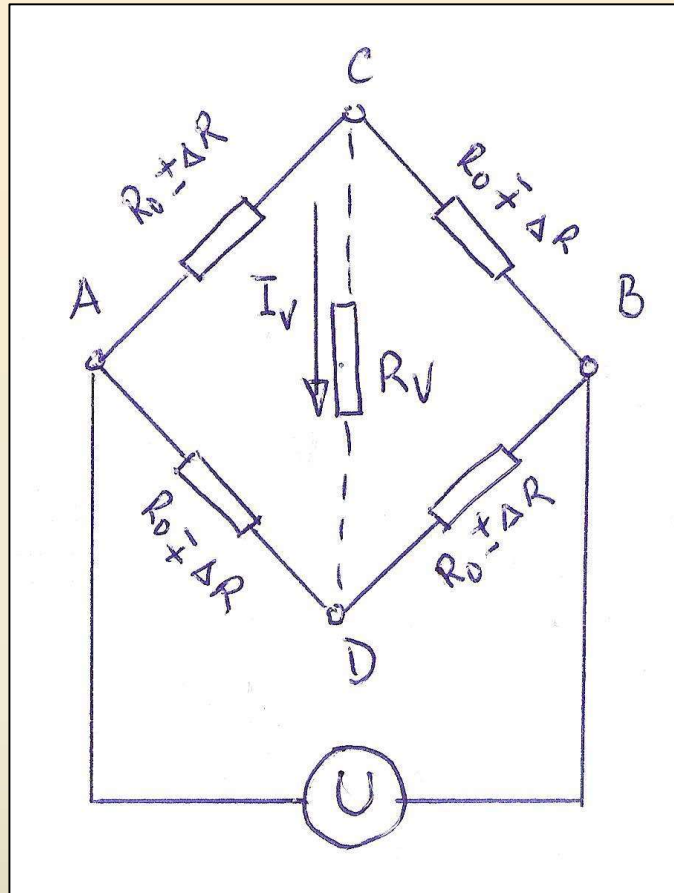


obr. 3 – Souhlasná změna

obr. 4 – Nesouhlasná změna

Elektrické měřicí obvody

Zapojení 4 snímačů:



obr. 5

Zapojení s jedním snímačem v můstku nazýváme čtvrt můstek, se dvěma půl můstek a se čtyřmi plný můstek.

Elektrické měřicí obvody

Střídavé můstky

Snímač indukčnosti nebo kapacity => musíme použít střídavého můstku.

Ve větvích jsou místo odporů obecné impedance $\hat{Z}_1, \hat{Z}_2, \hat{Z}_3, \hat{Z}_4$.

Podmínka pro vyvážený můstek je:

$$\boxed{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_4 = \hat{Z}_2 \cdot \hat{Z}_3}$$

$$\text{kde } \hat{Z}_1 = Z_1 \cdot e^{j\varphi_1}, \hat{Z}_2 = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2}, \hat{Z}_3 = Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \hat{Z}_4 = Z_4 \cdot e^{j\varphi_4}$$

Dvě podmínky rovnováhy jsou:

$$\boxed{\begin{aligned} Z_1 Z_4 &= Z_2 Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3 \end{aligned}}$$

Napěťová citlivost můstku:

$$S = \frac{\Delta \hat{U}_{CD}}{\frac{\Delta \hat{Z}_1}{\hat{Z}_1}}$$

Elektrické měřicí obvody

Měření při použití nevyváženého můstku je snadnější, rychlejší, s možností přímého záznamu, ale přesnost je menší než u vyváženého můstku (asi 1%). Údaj je závislý na parametrech pomocných obvodů (např. na stabilitě napájecího napětí, zesílení zesilovače apod.).

Napájení můstků

Dělení podle napájecího napětí:

1. stejnosměrné
2. střídavé (harmonické)
3. impulzové

ad 1.:

Proud v měřicí úhlopříčce je příliš malý => mezi můstek a indikátor musíme vsunout stejnosměrný zesilovač, jehož návrh a konstrukce činí určité obtíže. Výhodou je však to, že se neuplatní rozptylové kapacity, případně i rozptylové indukčnosti obvodu.

Elektrické měřicí obvody

ad 2.:

Volíme pro statická měření frekvenci 65 Hz až 300 Hz s ohledem na rozptylové kapacity a ztráty v magnetických obvodech snímačů.

Pro dynamická měření volíme frekvenci s ohledem na nejvyšší frekvenci snímané veličiny jako její alespoň 10-ti násobek.

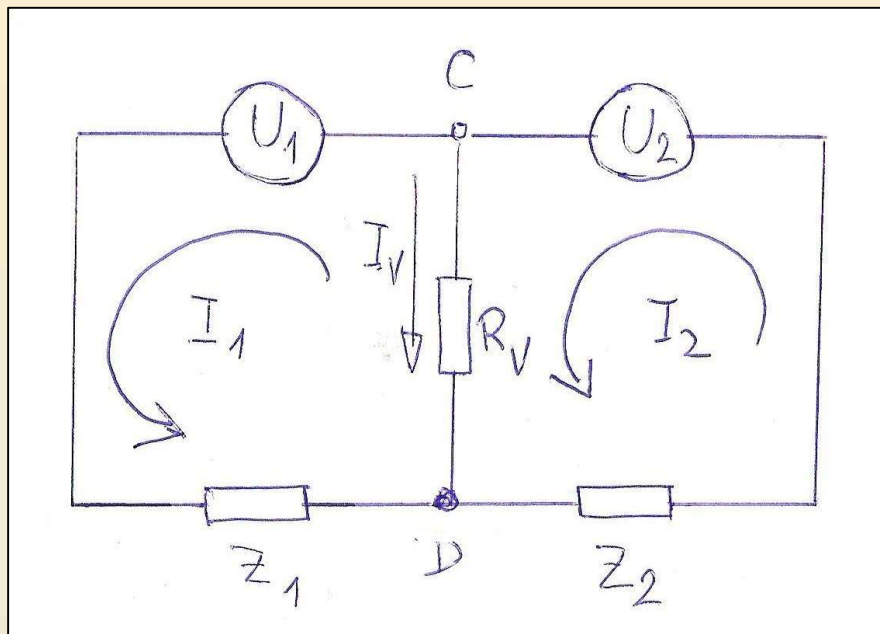
ad 3.:

Impulzové napájení použijeme při větším počtu měřicích míst (jedním měřicím kanálem měříme více míst tak, že pomocí přepínače měřicích míst připojujeme postupně vždy na určitou dobu měřené místo (snímač) do můstku), přepnutí se děje mimo impuls. Výhodou je možnost použití střídavých zesilovačů a necitlivost na změny rozptylových kapacit během měření.

Elektrické měřicí obvody

Diferenční můstky

Jsou zapojeny dva zdroje napětí a dvě impedance.



obr. 6

Hledáme opět velikost proudu I_V , který protéká vstupním odporem R_V následujícího stupně.

$$I_V = I_2 - I_1$$

$$U_1 = I_1 Z_1 + R_V (I_1 - I_2)$$

$$U_2 = I_2 Z_2 + R_V (I_2 - I_1)$$

Elektrické měřicí obvody

Tedy

$$I_V = \frac{U_2 Z_1 - U_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + R_V (Z_1 + Z_2)}$$

Podmínka pro vyvážený můstek je

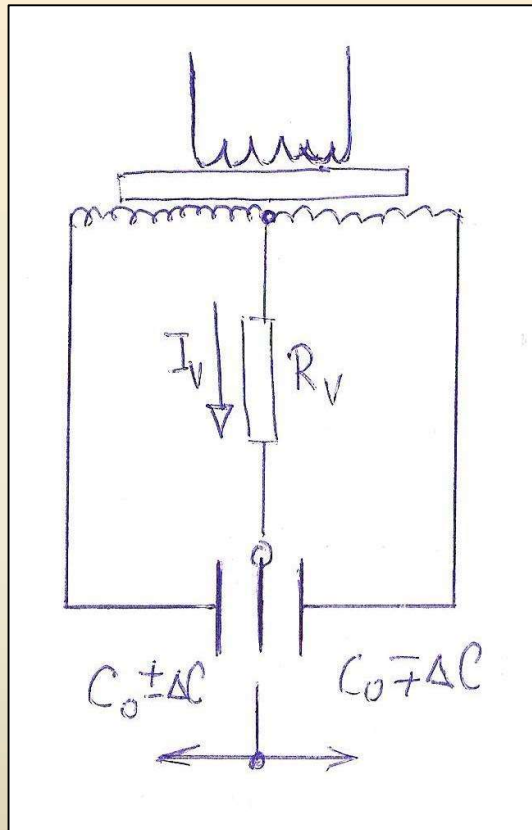
$$\boxed{U_2 Z_1 = U_1 Z_2}$$

V tomto můstku může být proud v úhlopříčce způsoben buď změnou impedance nebo napětí.

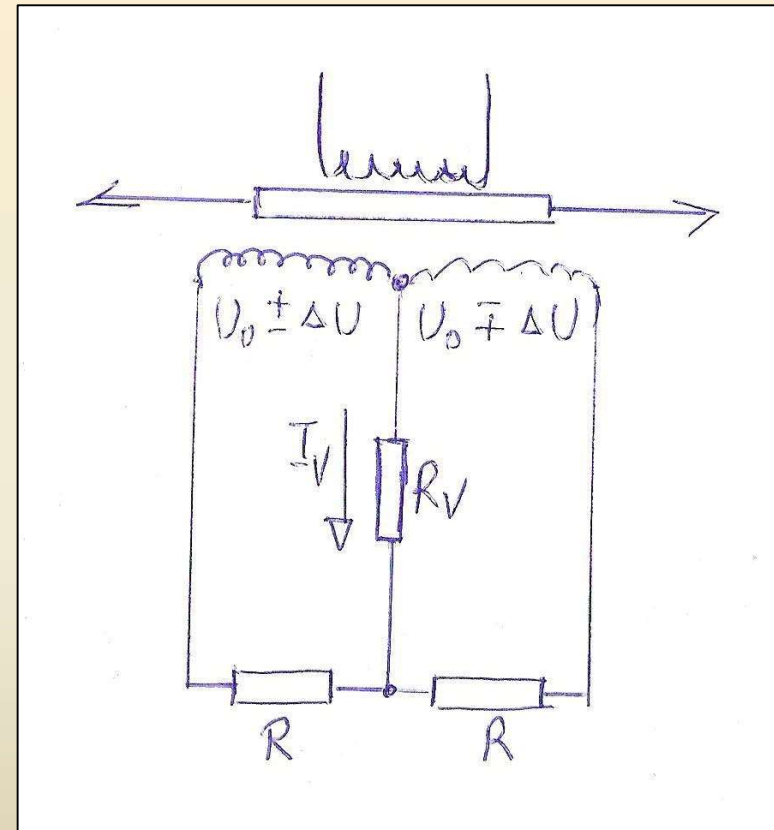
Při změně impedance musíme splnit podmínku $\Delta Z \ll Z$, aby se neprojevila nelinearita můstku. Při změně napětí je závislost $I_V = f\left(\frac{\Delta U}{U}\right)$ lineární.

Elektrické měřicí obvody

Tyto můstky se obvykle používají ve spojení s diferenčními snímači, buď se změnou impedance (obr. 7a) nebo se změnou napětí (obr. 7b).



obr. 7a



obr. 7b

Základy automatizace v IG

Pasivní snímače

Jiří Pospíšil

**Katedra speciální geodézie
Fakulta stavební
ČVUT v Praze**

Odporové snímače

1. Potenciometrické snímače
2. Odporové tenzometry
3. Polovodičové tenzometry
4. Odporové snímače teploty
 - Termistory – negistory, pozistory
 - časová konstanta snímače teploty

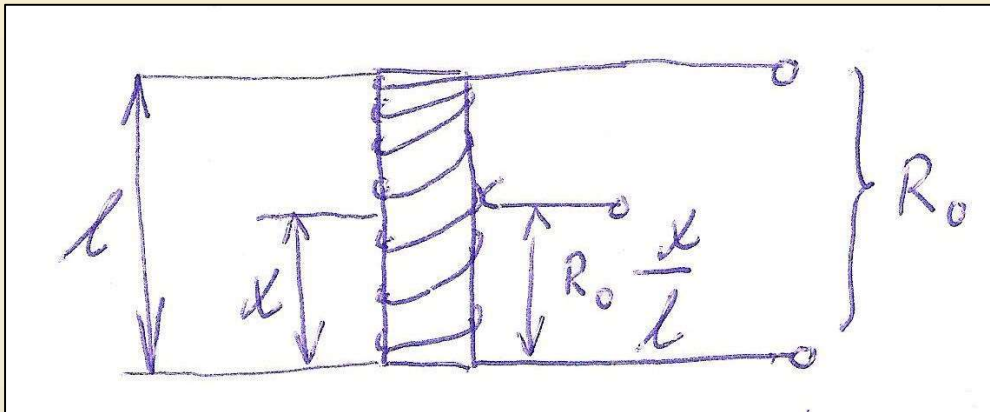
Odporové snímače

Podstatou odporových snímačů je prvek, jehož elektrický odpor se mění působením měřené veličiny na základě známých fyzikálních zákonů.

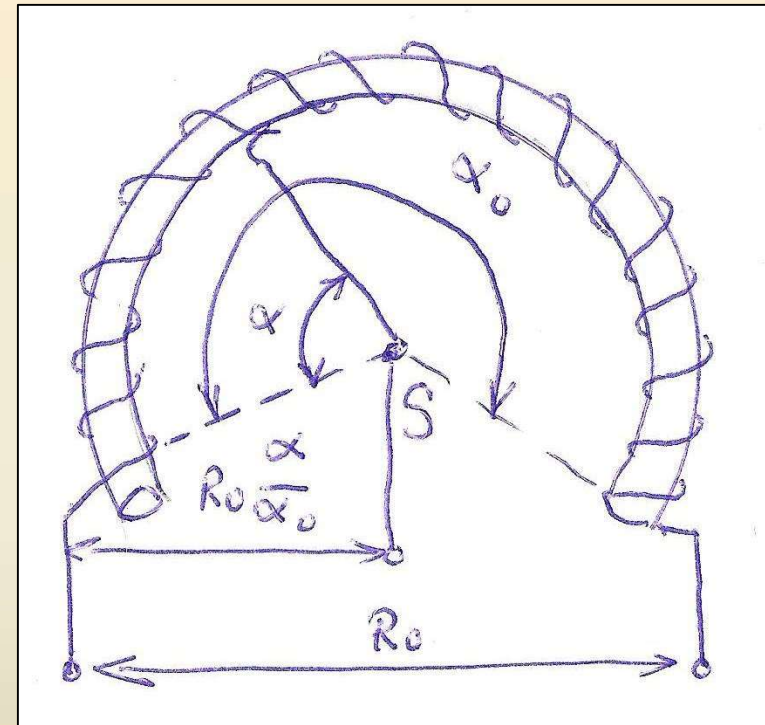
Odporové snímače

1. Potenciometrické snímače

Měřená veličina přímo nebo přes mechanický převod ovládá polohu běžce (jezdce) přesného odporu.

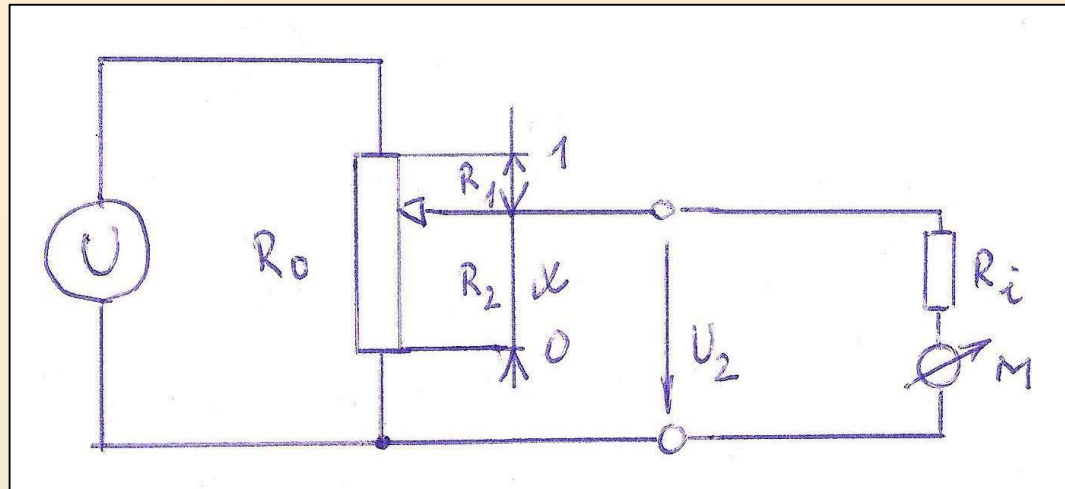


obr. 1 Snímač pro pohyb posuvný



obr. 2 Snímač pro pohyb otáčivý

Odporové snímače



U - zdroj napětí

R_i - vnitřní odpor měřicího přístroje M

R_0 - celkový odpor snímače

$$R_0 = R_1 + R_2$$

x - posunutí, $x \in \langle 0,1 \rangle$

obr. 3 Schéma zapojení snímače

Pro $R_i \rightarrow \infty$ je

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U \frac{R_2}{R_0} = k \cdot x$$

$R_i < \infty$ je

$$U_2 = U \frac{\frac{R_2 R_i}{R_2 + R_i}}{R_1 + \frac{R_2 R_i}{R_2 + R_i}} = U \frac{R_2}{R_0 + \frac{R_1 R_2}{R_i}}$$

Odporové snímače

Dále

$$R_2 = x \cdot R_0$$

$$R_1 = R_0 - R_2 = (1 - x) R_0$$

Činitel zatížení $K = \frac{R_i}{R_0}$, pak dostáváme nelineární závislost $U_2 = f(x)$

$$U_2 = \frac{K \cdot x}{K + (1 - x) \cdot x} \cdot U$$

Přídavná chyba zátěže δ : $\delta = \left(\frac{U_2}{U} - x \right) \cdot 100 \%$

neboli $\delta = \frac{-x^2 (1 - x)}{K + x(1 - x)} \cdot 100 \% \Rightarrow$

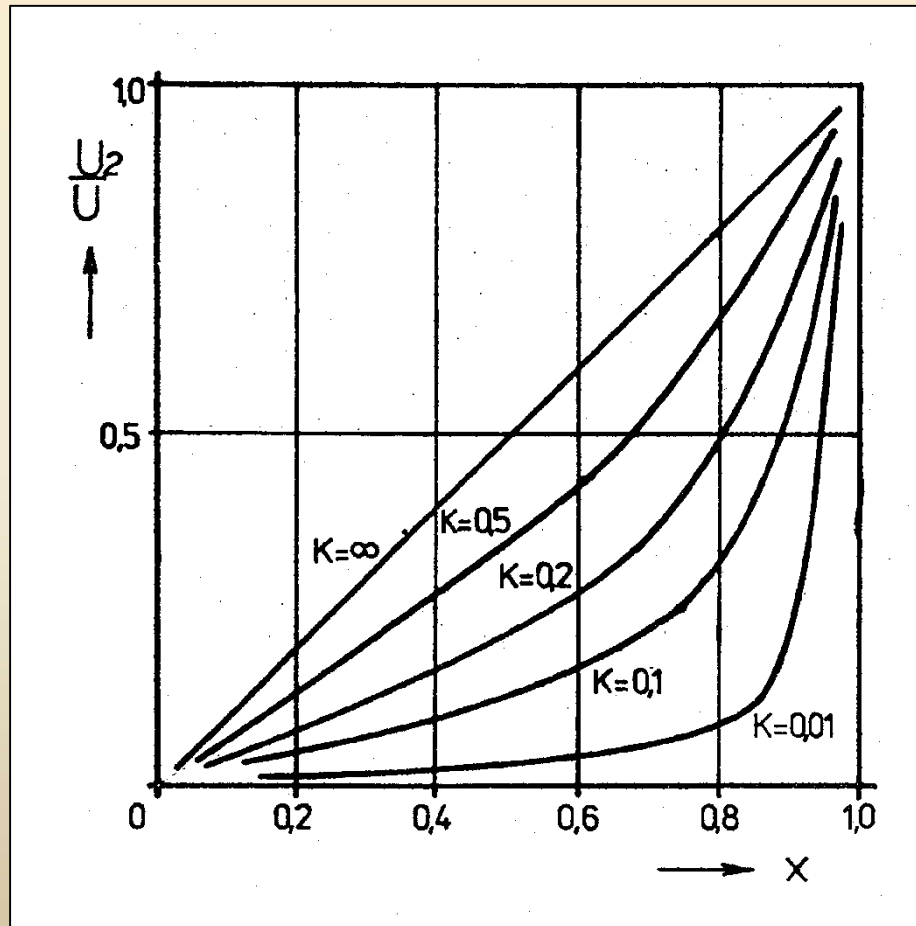
...je nutno použít vyhodnocovací obvod s velkým vstupním odporem, pak

$$K \gg x(1 - x) \quad \text{a} \quad \delta \rightarrow 0$$

Odporové snímače

Maximální chyba je pro $\frac{d\delta}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{2}{3}$ polohy běžce.

Poměr výstupního napětí U_2 k vstupnímu napětí U v závislosti na x pro různé hodnoty činitele zatížení K je na obr. 4.



obr. 4

Odporové snímače

2. Odporové tenzometry

jsou snímače, které mění svůj elektrický odpor v závislosti na změnách geometrických rozměrů a změnách krystalografické orientace způsobených mechanickou deformací snímače.

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

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} \cdot dl + \frac{\partial R}{\partial S} \cdot dS$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

Pro kruhový průřez tenzometru $S = \pi r^2$ je $dS = 2\pi r dr \Rightarrow$

$$\frac{dS}{S} = \frac{2\pi r \cdot dr}{\pi r^2} = \frac{2dr}{r}$$

Poměrné prodloužení $\varepsilon = \frac{dl}{l}$, poměrné příčné zkrácení $\eta = \frac{dr}{r}$

$$\eta = -\mu \cdot \varepsilon \quad (\mu - \text{Poissonův činitel}) \Rightarrow$$

Odporové snímače

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} \Rightarrow \frac{dS}{S} = -2\mu \frac{dl}{l}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_e \cdot E \cdot \frac{dl}{l}$$

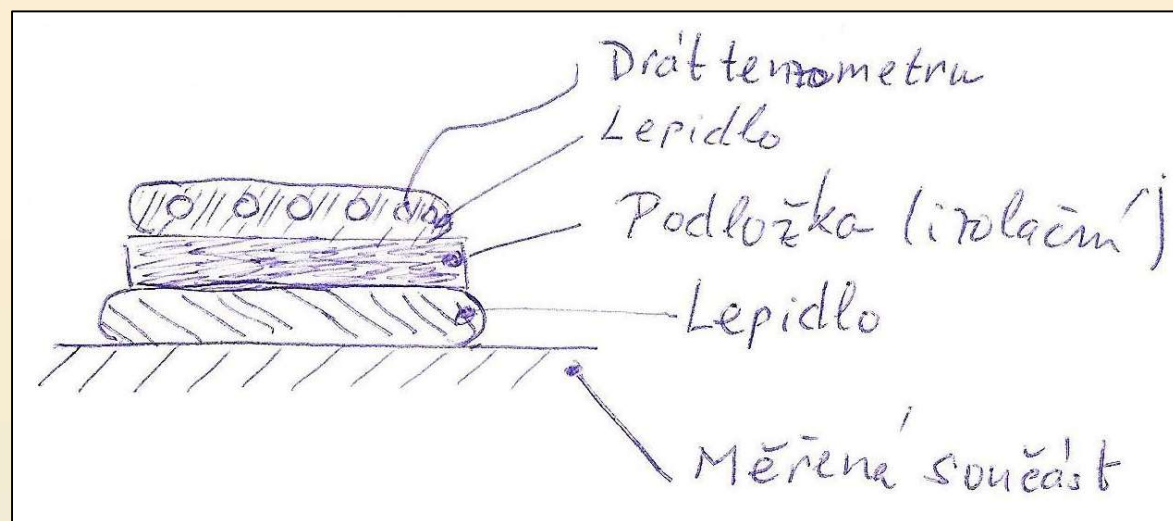
π_e - piezorezistentní součinitel
 E - modul pružnosti ve směru
namáhání

Tedy
$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu + \pi_e E) \cdot \frac{dl}{l} = K \cdot \frac{dl}{l}$$

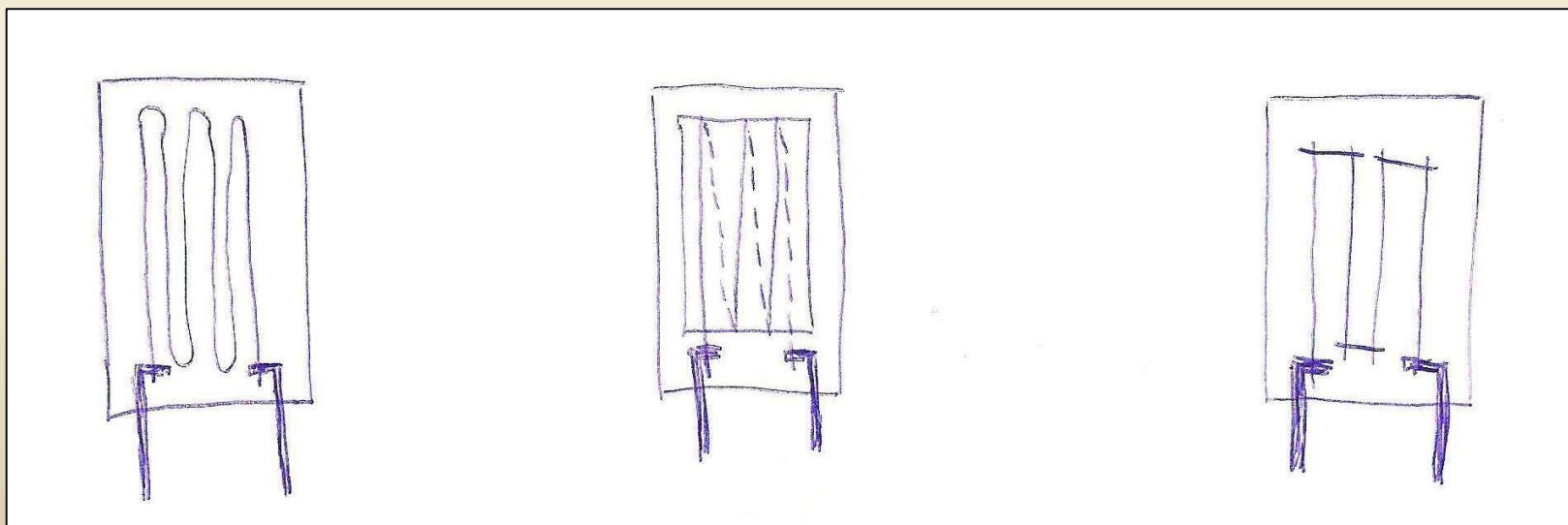
K - deformační citlivost tenzometru (funkcí poměrného prodloužení a teploty) platí přesně pro deformovaný rovný vodič.

Deformace se na sousední vodiče přenášejí lepidlem a podložkou (obr. 5).

Odporové snímače



obr. 5

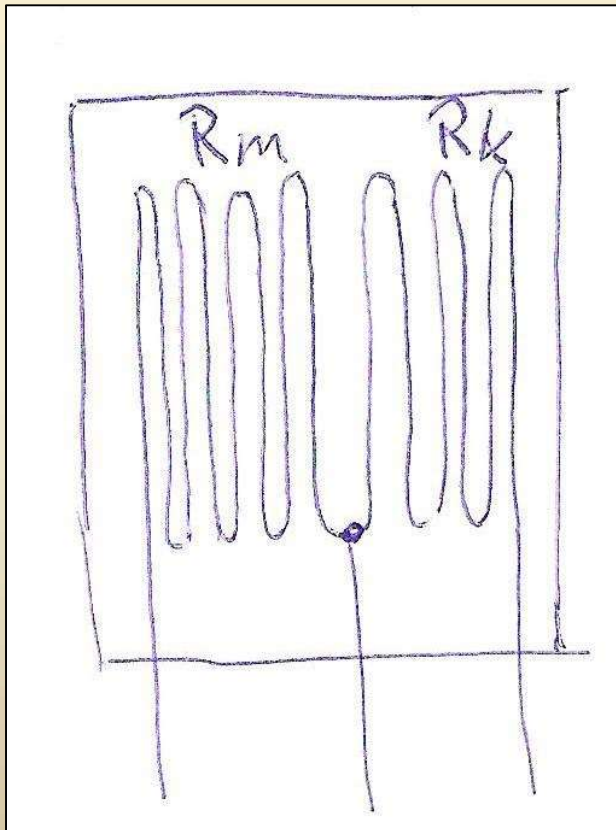


obr. 6

Odporové snímače

Odporový drát konstantan (60% Cu, 40% Ni), lineární závislost až do poměrného prodloužení 6,5%, součinitel tepelné roztažnosti $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5}$, modul pružnosti $E = 1,5 \cdot 10^5$ Mpa, deformační citlivost $K = 2,0$. Průměr drátku 0,01 mm až 0,03 mm.

Teplotní závislost se odstraní použitím kompenzačního tenzometru.



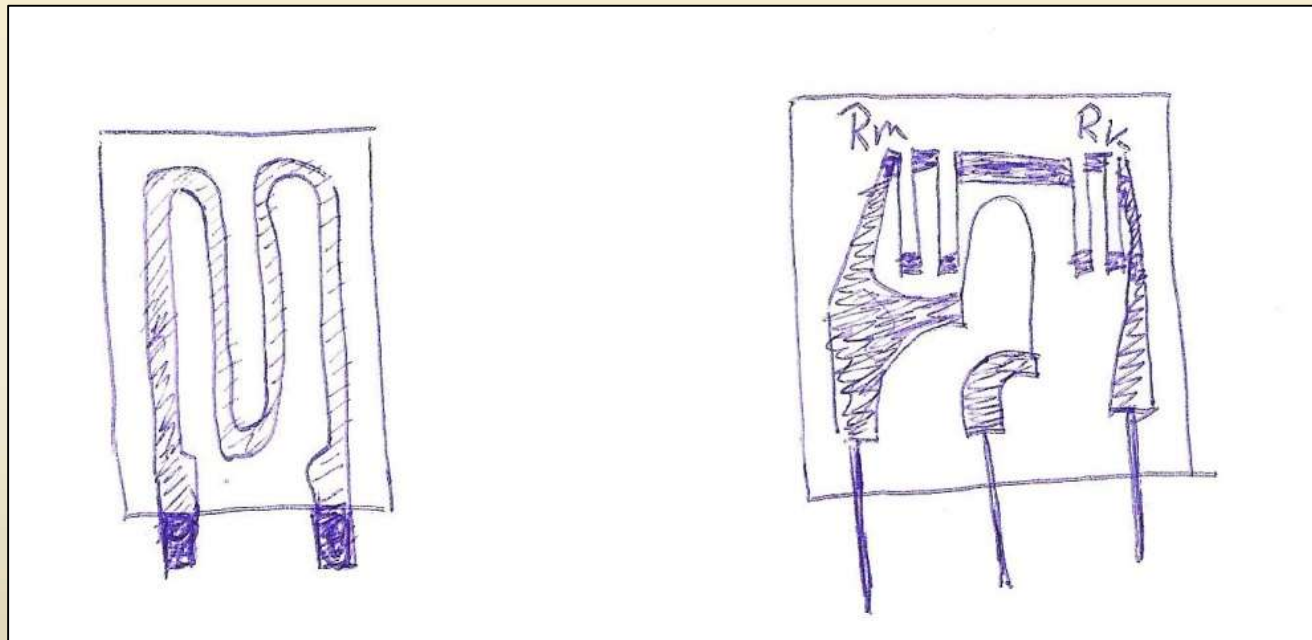
V sérii s měrným vinutím tenzometru R_m je zapojeno kompenzační vinutí R_k z vhodného materiálu (obr. 7). V rozsahu teplot je pak stálost o více než dva řády lepší než u původního tenzometru.

obr. 7

Odporové snímače

Dnes fóliové odporové tenzometry (leptáním geometrického tvaru do konstantanové fólie o tloušťce $5\text{ }\mu\text{m}$ až $8\text{ }\mu\text{m}$ slepením s izolační podložkou).

Hlavní výhoda – možnost zhotovit jakýkoliv tvar.



obr. 8

Odporové snímače

3. Polovodičové tenzometry

jsou snímače založeny na piezorezistentním efektu.

Výřezy monokrystalů vhodně orientovaných ke krystalickým osám o tloušťce několika desetin mm a většinou o délkách 0,25 mm až 12 mm se lepí na izolační podložku.

Deformační citlivost až 200.

V intervalu $\varepsilon = \frac{dl}{l} = \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ nejsou odchylky od linearity závažné, jinak odporová změna nemá lineární závislost na deformaci.

Kompenzace nelinearity:

- jeden tenzometr s kladným ($R_0 \pm \Delta R$, na tah) a druhým záporným ($R_0 \mp \Delta R$, na tlak) součinitelem deformační citlivosti zapojených v sousedních větvích můstku.

Odporové snímače

4. Odporové snímače teploty

Využíváme té vlastnosti, že el. odpor kovových a polovodičových materiálů se mění vlivem změn teploty.

- Kovové odporové teploměry
 - měříme elektrický odpor vodiče R , který je teplotou přímo ovlivňován
 - používají se čisté kovy
 - citlivost je dána teplotním součinitelem odporu α_R (střední hodnota poměrného přírůstku odporu při zvýšení teploty o 1 °C)

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \cdot \vartheta + \beta \cdot \vartheta^2) \quad \text{pro } \vartheta \in \langle 0^{\circ}\text{C}; 630,5^{\circ}\text{C} \rangle$$

α - konstanta ($3,9075 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ pro Pt)

β - konstanta ($-0,575 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}^2$ pro Pt)

Odporové snímače

Pro $\vartheta \in \langle -182,97\text{ }^{\circ}\text{C}; 0\text{ }^{\circ}\text{C} \rangle$

$$R_{\vartheta} = R_0 \left[1 + \alpha \cdot \vartheta + \beta \cdot \vartheta^2 + \gamma \cdot (\vartheta - 100) \cdot \vartheta^3 \right]$$

γ - konstanta $(-4,0 \cdot 10^{-12} \text{ } 1 / ^{\circ}\text{C}^4 \text{ pro } pt)$

Konstanty α, β, γ jsou závislé na čistotě platiny.

Pro $\vartheta \in \langle -60\text{ }^{\circ}\text{C}; 150\text{ }^{\circ}\text{C} \rangle$ se též používá nikl, pro který je

$$\alpha = 5,44 \cdot 10^{-3} \text{ } 1 / ^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = 6,00 \cdot 10^{-6} \text{ } 1 / ^{\circ}\text{C}^2$$

V ČR se průmyslově vyrábějí platinové měřicí odpory s $R_0 = 100\text{ }\Omega$.

Chyba oteplením: $\Delta\vartheta = \frac{R_{\vartheta} \cdot I^2}{D}$

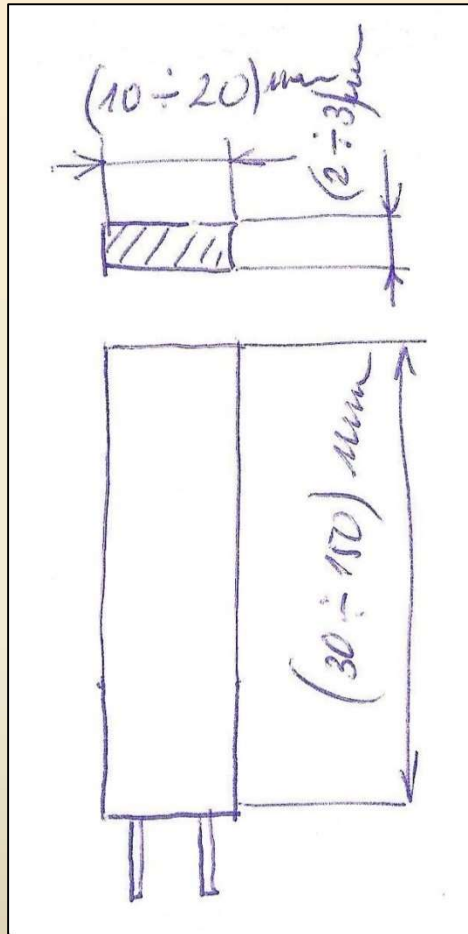
R_{ϑ} - odpor snímače při teplotě ϑ

I - proud procházející snímačem

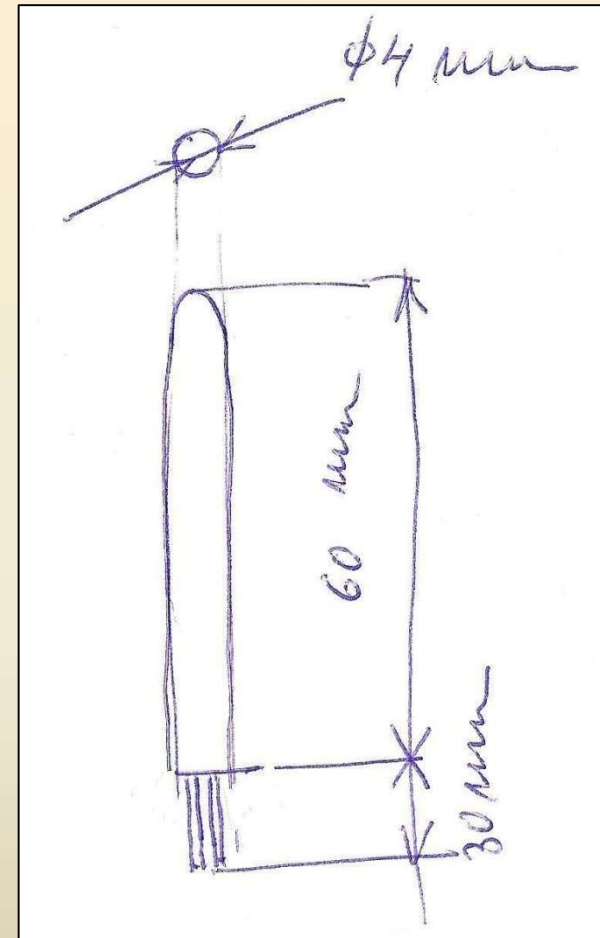
D - zatěžovací konstanta $\equiv$ příkon potřebný k ohřátí odporového snímače o $\Delta\vartheta = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na teplotu okolí.

Odporové snímače

$I_{maxPt}(R_0 = 100 \Omega) = 10 \text{ mA}$, požadujeme-li $\Delta\vartheta < 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, pak $I_{max} < 1 \text{ mA}$.
 $\varnothing$ platinového drátku je 0,002 mm až 0,1 mm.



obr. 9 Páskový odporový
snímač teploty



obr. 10 Válcový odporový
snímač teploty

Odporové snímače

- Polovodičové teploměry – termistory
 - jsou nelineární polovodičové součástky s velkou závislostí el. odporu na teplotě

$$\alpha_{R_{pol}} \square \alpha_{R_{kov}}$$

- termistory se dělí na dvě skupiny:
 - a) negistory (odpor s teplotou klesá)
 - b) pozistory (odpor s teplotou roste)

Odporové snímače

ad a) Negistory

- kyslíčníky niklu, manganu, titanu, železa, kobaltu, ...
- proti rušivým vlivům jsou chráněny skleněnou vrstvou
- mají tvar tyčinek nebo perliček
- závislost odporu snímače na teplotě: $R_1 = R_2 e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$

kde R_1 - odpor při teplotě T_1 [K]

R_2 - odpor při teplotě T_2 [K]

B - materiálová „konstanta“, která se udává pro $\vartheta_1 = 25\text{ °C}$, tj.

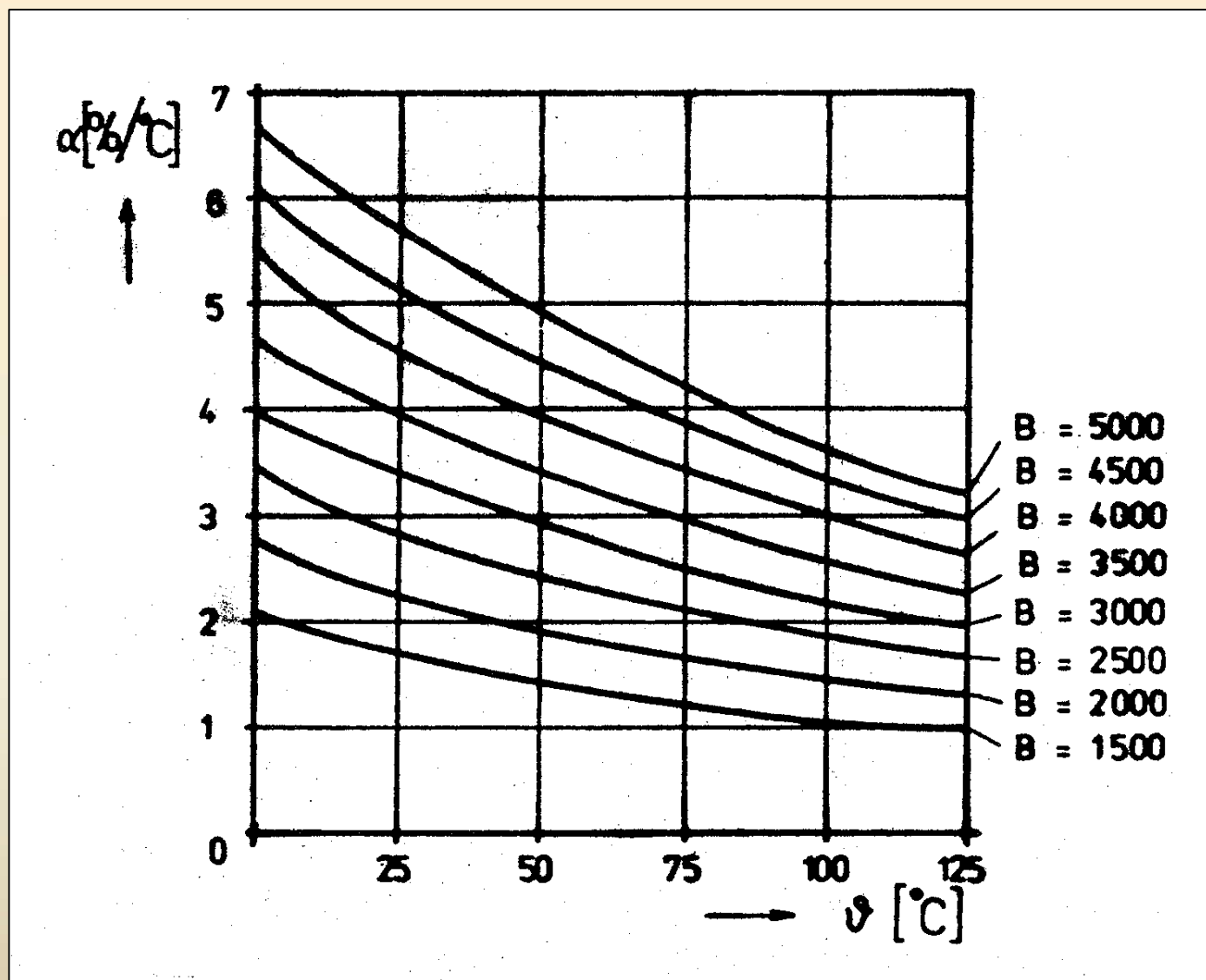
$T_1 = 298,15\text{ K}$ a $\vartheta_2 = 85\text{ °C}$, tj. $T_2 = 358,15\text{ K}$

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR_1}{dT_1} = -\frac{B}{T_1^2}$$

Závislost α_T na teplotě ϑ pro různé materiálové konstanty B je na obr. 11.

($R_{20\text{°C}} \in \langle 1\text{ k}\Omega; 200\text{ k}\Omega \rangle$, perlička $0,3\text{ mm}^3$)

Odporové snímače

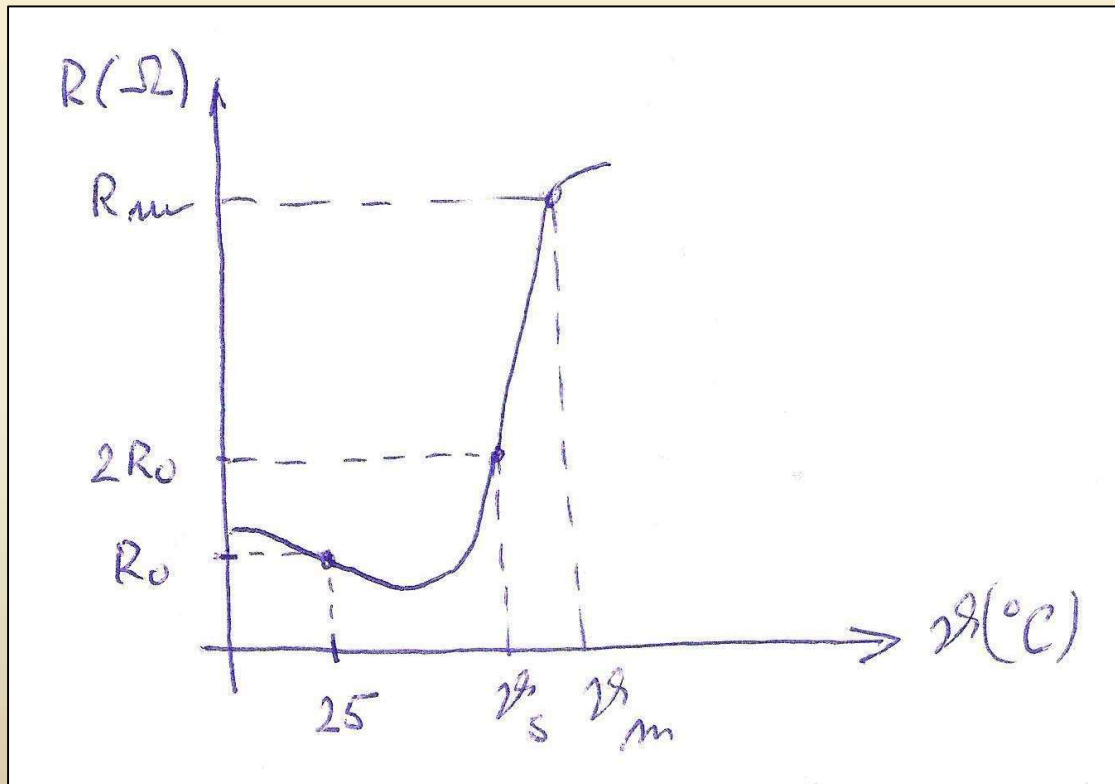


obr. 11

Odporové snímače

ad b) Pozistory

- polykrystalické polovodičové součástky s $\alpha_T > 0$
- závislost odporu R na teplotě ϑ je na obr. 12.
- pozistory lze užít k měření pouze ve velmi úzkém teplotním rozsahu



ϑ_s - spínací teplota

R_0 - jmenovitý odpor
při teplotě 25°C

obr. 12

Odporové snímače

- Časová konstanta snímače teploty

- označíme-li:
 - dQ_1 - teplo přivedené do snímače
 - dQ_2 - teplo akumulované ve snímači
 - S - plocha povrchu snímače, m^2
 - α - součinitel přestupu tepla, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
 - ϑ_m - teplota měřeného prostředí, $^{\circ}C$
 - ϑ_t - teplota snímače, $^{\circ}C$
 - m - hmotnost snímače, kg
 - c - měrná tepelná kapacita, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

pak za předpokladu přenosu tepla pouze konvekčí a nekonečně velké tepelné vodivosti, bude

$$dQ_1 = dQ_2$$

neboli

$$S \cdot \alpha \cdot (\vartheta_m - \vartheta_t) dt = m \cdot c \cdot d\vartheta_t$$

Odporové snímače

Pro dynamickou chybu měření $\Delta_D = \vartheta_m - \vartheta_t$ zavedeme označení ϑ ,
pak $d\vartheta_t = -d\vartheta$ a

$$\mathcal{G} \cdot dt = -\tau \cdot d\mathcal{G}$$

kde $\tau = \frac{m \cdot c}{S \cdot \alpha}$ je časová konstanta.

Řešením uvedené diferenciální rovnice pro skokovou změnu teploty z ϑ_0 na ϑ_m dostaneme:

$$\mathcal{G}_t - \mathcal{G}_0 = (\mathcal{G}_m - \mathcal{G}_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Kapacitní snímače

Kapacitní snímače využívají změn geometrických rozměrů kondenzátoru nebo změn permitivity mezi elektrodami působením měřené veličiny.

Základem snímače je:

- a) deskový kondenzátor
- b) válcový kondenzátor

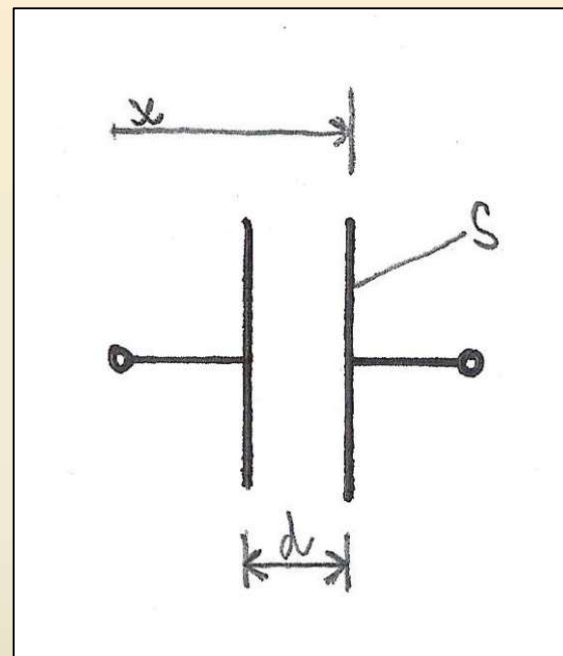
Kondenzátory mají kapacitu C .

Kapacitní snímače

a) Deskový kondenzátor

$$C_D = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$$

kde ε_0 je permitivita vakua
 ε_r je poměrná permitivita
 S je plocha elektrod
 d je vzdálenost elektrod



obr. 1 – Deskový kondenzátor

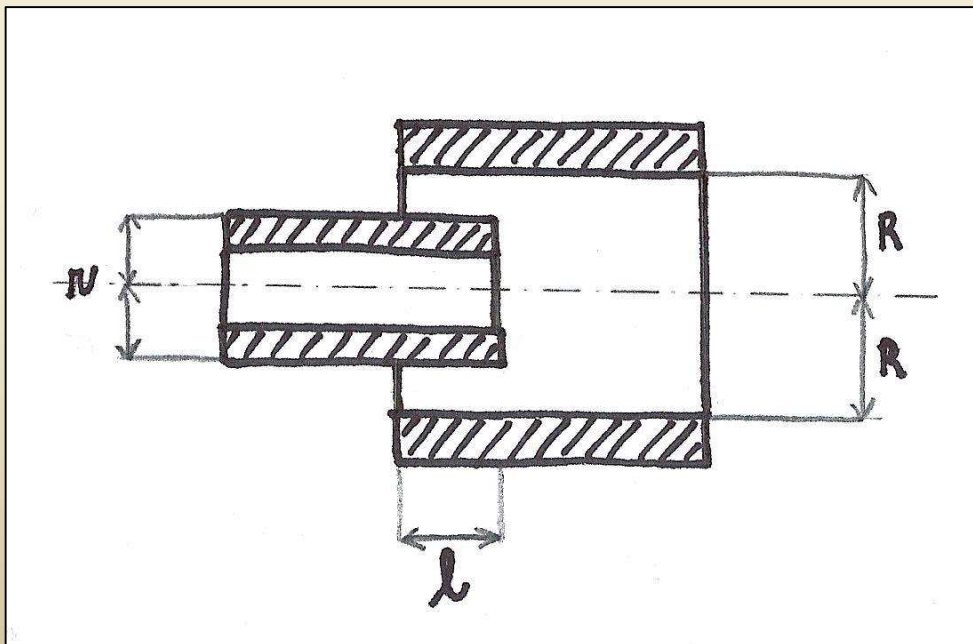
Kapacitní snímače

b) Válcový kondenzátor

- tvořený dvěma souosými válci

$$C_V = 2\pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{l}{\ln \frac{R}{r}}$$

kde l je délka překryvných válců
 R je poloměr vnějšího válce
 r je poloměr vnitřního válce



obr. 2 –
Deskový kondenzátor

Kapacitní snímače

Nejjednodušším tvarem kapacitního snímače je jednoduchý deskový kondenzátor s proměnnou mezerou mezi deskami.

Platí rovnice:

$$C_D = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Při oddálení desek o vzdálenost Δd dostaneme:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon S}{d + \Delta d} - \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon S}{d} \left(\frac{-\Delta d}{d + \Delta d} \right) = -C \frac{\Delta d}{d + \Delta d}$$

Citlivost snímače je dána podílem:

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -C \frac{1}{d + \Delta d} = -\frac{C}{d} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}} \right) = -\frac{C}{d} \left[1 - \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 - \dots \right]$$

Při $\frac{\Delta d}{d} \ll 1$ platí:

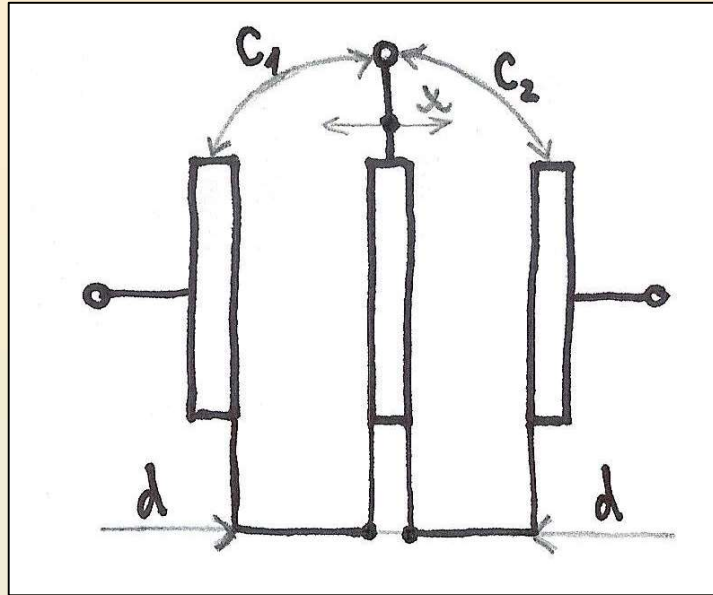
$$\frac{\Delta C}{\Delta d} \approx -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d} \right)$$

Předchozí vztah určuje nelineární závislost citlivosti snímače.

Kapacitní snímače

Linearizace lze dosáhnout tzv. diferenčním uspořádáním dvou deskových kondenzátorů.

$$\begin{aligned} C_1 &= C - \Delta C \\ C_2 &= C + \Delta C \end{aligned}$$



obr. 3 -
Diferenční
uspořádání

Diferenční citlivost lze pak odvodit ze vztahu:

$$\frac{C_2 - C_1}{\Delta d} = \frac{2 \cdot \Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left[1 - \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 - \dots + 1 + \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \dots \right]$$

Při $\frac{\Delta d}{d} \ll 1$ platí:

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} \approx -2 \cdot \frac{C}{d}$$

Odvození vztahů pro další typy snímačů je obdobné.

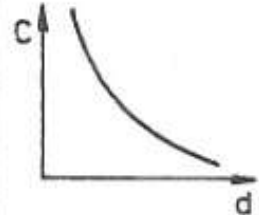
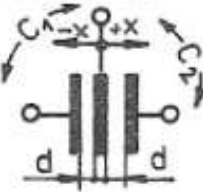
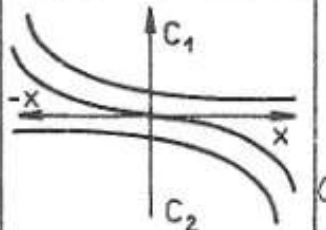
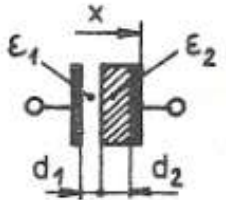
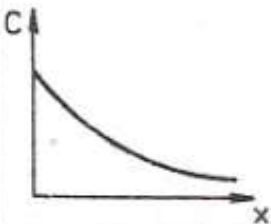
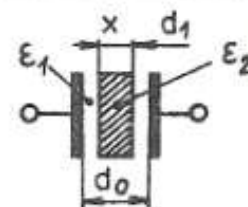
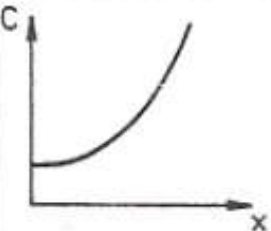
Kapacitní snímače

Výhody a nevýhody kapacitních snímačů

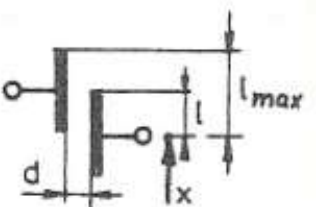
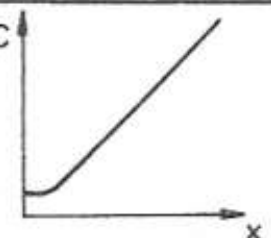
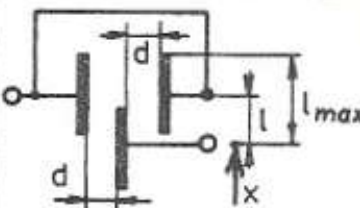
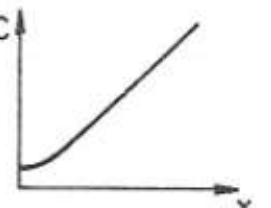
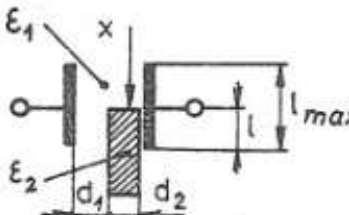
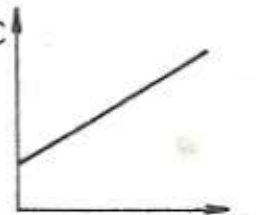
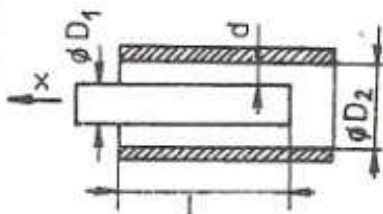
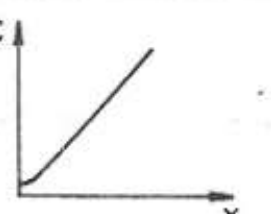
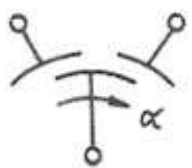
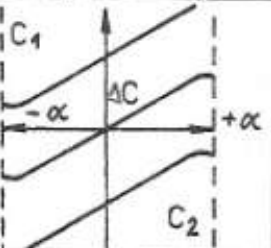
Výhodou kapacitních snímačů je velká přesnost a je vlastně dána rozměry elektrod, které lze vyrobit s vysokou přesností. Pracovní části i celé snímače mají malou hmotnost a tím i vysokou rezonanční frekvenci, která leží mimo oblast nejčastěji měřených kmitů. Zpětné působení na měření objekt je zanedbatelné (jedná se o síly působící mezi elektrodami). Velkou výhodou kapacitních snímačů při měření na pohyblivých částech (neklademe-li zvláštní důraz na přesnost) je možnost využít části objektu jako jedné elektrody eventuálně jako dielektrika.

Nevýhodou může být napájení. Kapacita snímačů se pohybuje řádově v desítkách až stovkách pikofaradů. Jestliže bychom pro napájení použili síťového kmitočtu, byla by reaktance poměrně velká a srovnatelná s hodnotou izolačního odporu, což by přinášelo určité potíže. Z tohoto důvodu používáme frekvenci > 1 kHz. Horní hranice kmitočtu závisí na dalším zpracování signálu a účelu měření. Nesmí se uplatnit rozptylové kapacity a ohřev dielektrika vysokofrekvenčním polem.

Kapacitní snímače

Typ snímače	schéma	funkční vztahy	charakteristika
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou	 a)	$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)} ; \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	
deskový diferenční s proměnnou mezerou	 b)	$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d(x)} ; \quad \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{2C}{d} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$ $C_2 = \varepsilon \frac{S}{d(x)} ;$	
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}} ; \quad \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} \frac{1}{N - \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2}}$ $N = \frac{\varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$	
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)}$	

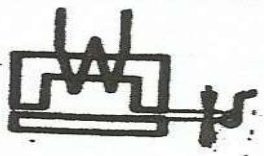
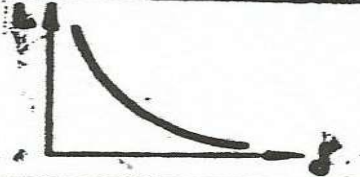
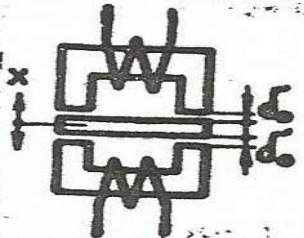
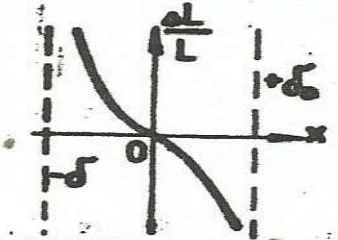
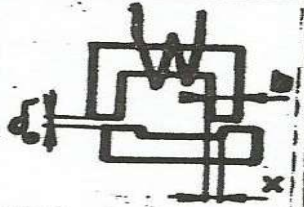
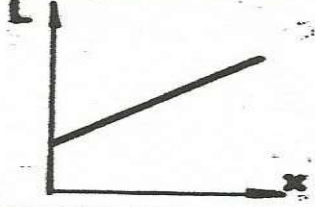
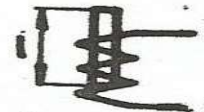
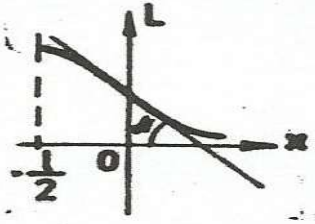
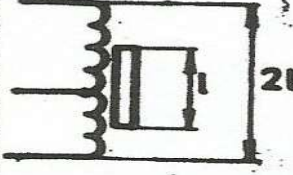
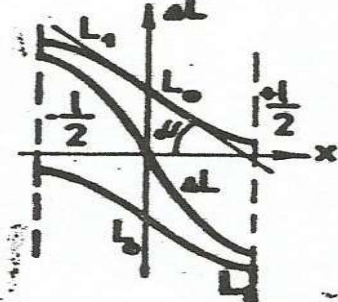
Kapacitní snímače

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

Indukčnostní snímače

Do skupiny indukčnostních snímačů neelektrických veličin zařazujeme ty snímače, u nichž změna měřené veličiny způsobí buď změnu vlastní indukčnosti L nebo změnu vzájemné indukčnosti M . Přímé ovlivnění snímače záleží na změně magnetického obvodu (magnetického odporu R_m). Indukčnostní snímače můžeme rozdělit na

- a) snímače parametrické,
- b) snímače transformátorové,
- c) selsyny.

Typ snímače	Schema	Závislost	Charakteristika	Rozsah
Jednoduchý mezerový		$L = \frac{\mu_0 S N^2}{2\delta}$		do 0,1 mm
Diferenční mezerový		$\frac{\Delta L}{L} = \frac{2 \frac{x}{\delta_0}}{1 - (\frac{x}{\delta_0})^2}$		do 1 mm
Jednoduchý plošný		$L = \frac{\mu_0 S N^2 x}{2\delta_0 b}$		do 10 mm
Jednoduchý jádrový		$L = L_0 (1 + x \cdot \operatorname{tg} \alpha)$		do 100mm
Diferenční jádrový		$\frac{\Delta L}{L} = 2x \operatorname{tg} \alpha$		do 100mm

Indukčnostní snímače

1. Snímače parametrické

U těchto snímačů měřená veličina mění buď velikost vzduchové mezery nebo její průřez a tím i vlastní indukčnost snímače. Uspořádání indukčnostního snímače s proměnnou vzduchovou mezerou je na obr. 1

Pro indukčnost s N závitů platí

$$L = \frac{N^2}{|Z_m|} \quad (1)$$

kde Z_m je magnetická impedance, pro kterou platí $Z_m = R_m + jX_m$

Indukčnostní snímače

kde

$$R_m = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i \mu_0 S_i} \quad \text{a} \quad \Phi_m = \frac{P_0}{\omega \phi^2} \quad (. 2 .)$$

kde l_i je délka úseku střední siločáry,

μ_i je permeabilita úseku magnetického obvodu,

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

S_i je průřez úseku,

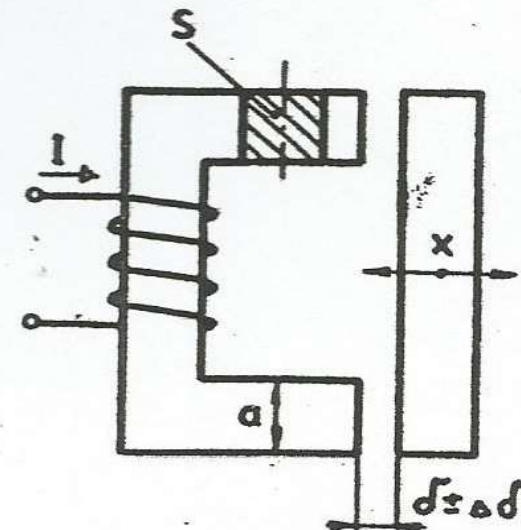
P_0 jsou ztráty hysterézní a vířivými proudy,

ω je kruhová frekvence napájecího proudu,

ϕ je magnetický tok.

Po dosazení do R_m dostaneme

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_{Fe} S_{Fe}} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_{\delta}} \quad (. 3 .)$$



Obr. 1

Indukčnostní snímač s proměnnou vzduchovou mezerou.

Indukčnostní snímače

Protože permeabilita vzduchu je rovna 1, je $\mu_{Fe} \gg \mu_{vz}$ a platí

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S\delta} \quad (4)$$

Zjednodušený výraz (4) platí pouze pro $\delta \leq 2a$. Pro oblast běžných napájecích kmitočtů (do 10^4 Hz) a pro poměr $\frac{\delta}{a} > 0,2$ lze zanedbat ztráty ve feromagnetiku ($X_m \approx 0$), lze psát

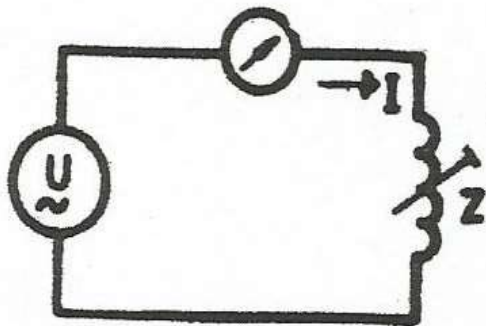
$$L \approx \frac{N^2 \mu_0 S\delta}{2\delta} \quad (5)$$

Indukčnost je tedy nepřímo úměrná velikosti vzduchové mezery. Jestliže zapojíme impedanci Z do jednoduchého obvodu podle obr. 2, pak pro proud tekoucí obvodem

Indukčnostní snímače

platí

$$I = \frac{U}{|Z|} = U \cdot \frac{2\delta}{\omega N^2 \mu_0 S_\delta} \quad (6)$$



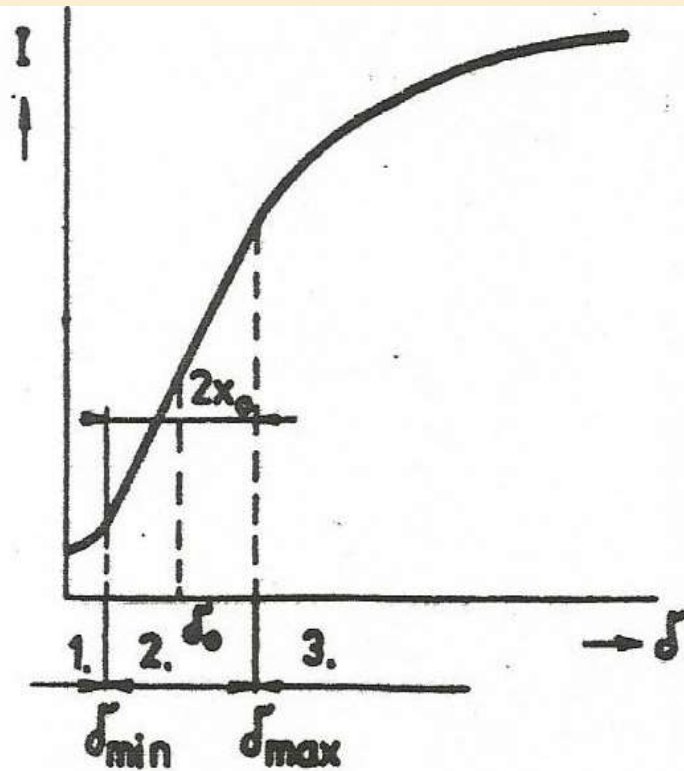
Obr. 2

Zapojení indukčního snímače do obvodu.

Pokud napájecí napětí zdroje a jeho frekvence zůstává konstantní, je závislost mezi I a δ lineární. Průběh závislosti $I = f(\delta)$ je na obr. 3.

Z obr. 3 je patrné, že pro měření budeme používat oblast 2 od $\delta_{\min}$ do $\delta_{\max}$. V oblasti 1 není zanedbatelný vliv magnetického obvodu a v oblasti 3 se uplatňuje ohmický odpor cívky. Nulu měřené veličiny musíme ztotožnit s minimální vzduchovou mezerou $\delta_{\min}$. V případě snímání dynamických veličin nastavíme snímač na klidovou vzduchovou mezeru δ_0 , která je větší než změny působené měřenou veličinou.

Indukční snímače



Obr. 3

Závislost proudu v obvodu na velikosti vzduchové mezery.

$$\delta = \delta_0 + x_0 \sin \nu t \quad (7)$$

kde x_0 je amplituda změn,

ν je jejich frekvence,

takže

$$L = \frac{\mu_0 S_d}{2 \delta_0} N^2 \left(1 - \frac{x_0}{\delta_0} \sin \nu t \right) \quad (8)$$

Jelikož snímač představuje také elektromagnet, je kotvička přitahována určitou silou a ovlivňuje tak měřenou mechanickou soustavu. Přitažlivá síla má být alespoň o řád menší než síla způsobující přemístění jádra.

$$F = \frac{\phi^2}{\mu_0 S} = \frac{(NI)^2}{R_m^2 \cdot \mu_0 S} \quad (9)$$

Při tomto uspořádání snímače se silně projevuje časová nestálost vlastností magnetického obvodu. Tuto nevýhodu lze odstranit diferenčním uspořádáním snímače.

Indukčnostní snímače

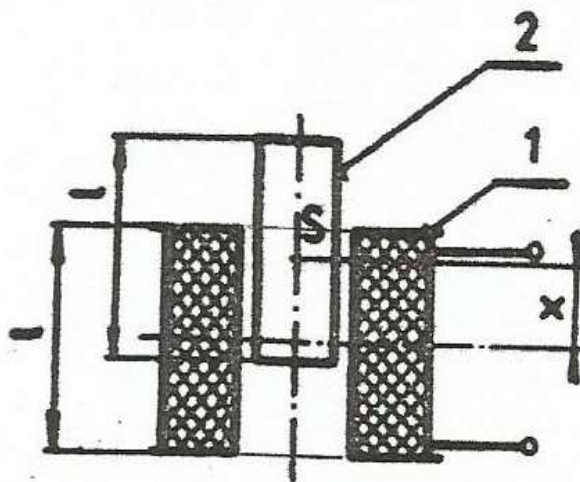
parametrické indukčnostní snímače

Principiální uspořádání tohoto snímače je na obr. 4.

Ve válcové cívce 1 se pohybuje vlivem měření mechanické veličiny jádro 2 z feromagnetického materiálu. Má-li jádro i cívka stejnou délku l , má charakte-

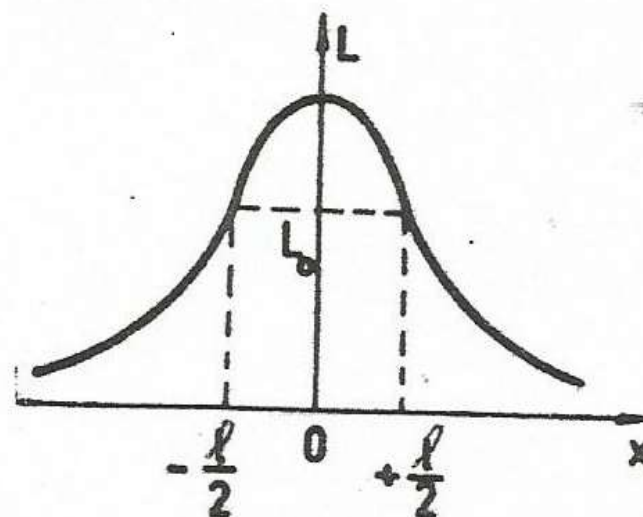
Indukčnostní snímače

řistika $L = f(x)$, závislost vlastní indukčnosti na vysunutí jádra průběh znázorněný na obr. 5 s inflexními body maximální citlivosti v okolí $x = \pm \frac{l}{2}$.



Obr. 4.

Uspořádání snímače s otevřeným magnetickým obvodem.



Obr. 5

Závislost vlastní indukčnosti na posunutí jádra.

Indukční snímače

$$R_m = R_{m0} + \Delta R_m; \quad \Delta R_m = k \cdot \Delta x,$$

kde k je konstanta úměrnosti a pak

$$L = \frac{N^2}{R_{m0} \left(1 + \frac{R_m}{R_{m0}}\right)} = \frac{N^2}{R_{m0}} \left(1 - \frac{R_m}{R_{m0}}\right) = \frac{N^2}{R_{m0}} \left(1 - \frac{k}{R_{m0}} \Delta x\right) \quad (10)$$

Indukčnostní snímače

2 Transformátorové snímače

Transformátorové snímače pracují na principu změny vzájemné indukčnosti.

Diferenční transformátor s magnetickým obvodem a malou vzduchovou mezerou.

Všimneme si blíže rozboru vlastností tohoto snímače, poněvadž výpočet je názorný a je možno ho zjednodušit. Základní zapojení snímače je na obr. 6 !.

Indukční snímače

Na pohyblivé kotvě 1 je umístěno primární vinutí s W závitů a indukčností L a je napájeno ze zdroje napětí U proudem I . Na dvou symetrických jhech 2 a 3 jsou navinuty snímací cívky 4 a 5 s N_1 a N_2 závitů a indukčnostmi L_1 a L_2 podle polohy kotvy a velikosti vzduchových mezer δ_1 a δ_2 . V klidové poloze je $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$ a pak rozdíl výstupních napětí ΔU je dán

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_1 - \hat{U}_2 = 0$$

(. 11 .)

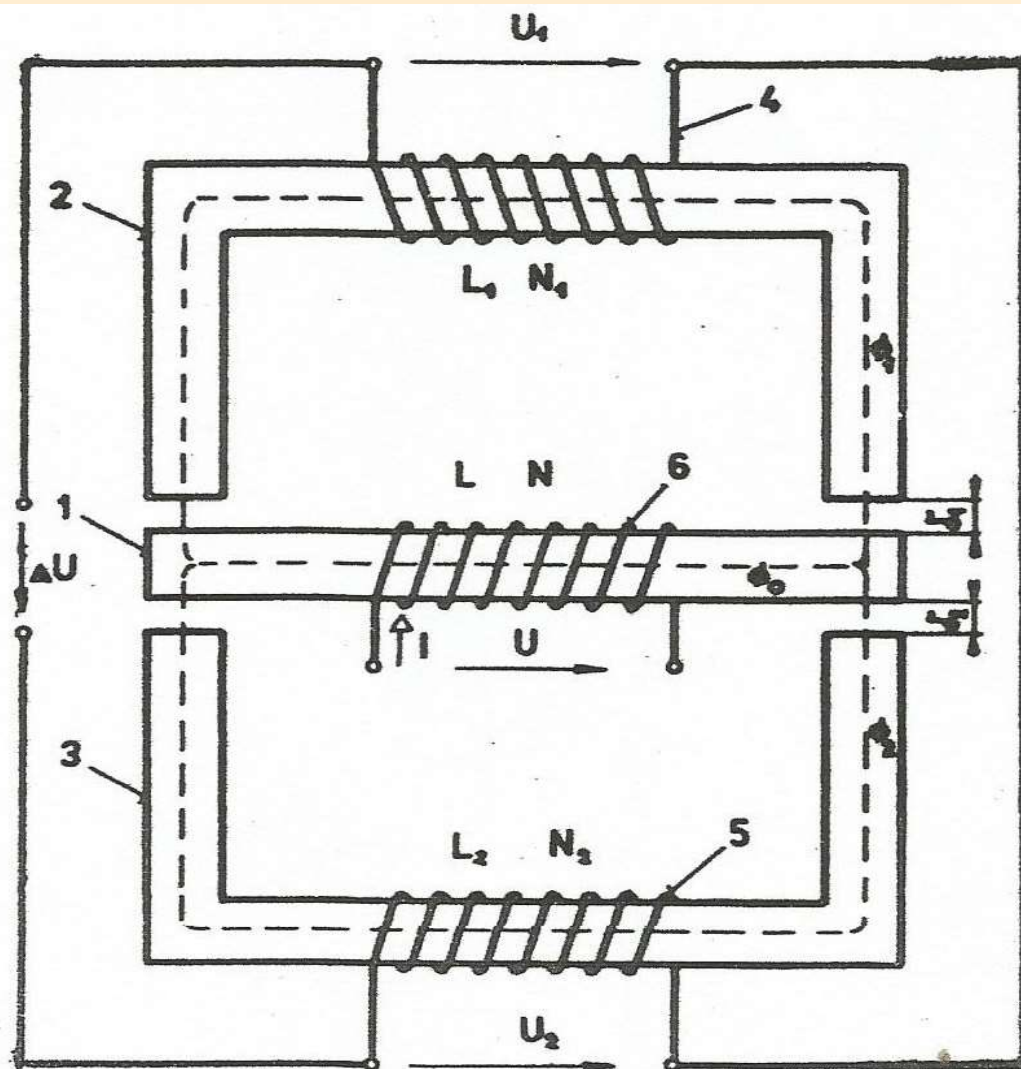
Indukčnostní snímače

V obecné poloze kotvičky se rozdělí tok ϕ_0 na dva toky ϕ_1 a ϕ_2 jednotlivými jhy v závislosti na magnetických odporech. Napětí indukovaná ve snímacích cívkách jsou

$$\hat{U}_1 = \frac{M_1}{L} \hat{U}$$

a

$$\hat{U}_2 = \frac{M_2}{L} \hat{U}$$



Obr. 6

Diferenční transformátor s magnetickým obvodem a malou vzduchovou mezerou.

poněvadž jsou zapojena proti sobě, je výsledné napětí

$$\begin{aligned}\Delta \hat{U} &= \hat{U}_1 - \hat{U}_2 = \\ &= \frac{(M_1 - M_2)}{L} \hat{U} \quad (12)\end{aligned}$$

Nyní je nutné stanovit vzájemné indukčnosti M_1 a M_2 a vlastní indukčnost L . Pro efektivní hodnoty těchto veličin platí rovnice

$$\begin{aligned}N \Phi_0 &= L I \\ \text{odtud} \quad L &= \frac{N \cdot \Phi_0}{I}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_1 \Phi_1 &= M_1 I \\ \text{odtud} \quad M_1 &= \frac{N_1 \Phi_1}{I}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_2 \Phi_2 &= M_2 I \\ \text{odtud} \quad M_2 &= \frac{N_2 \Phi_2}{I}\end{aligned}$$

Indukční snímače

Po dosazení do rovnice (12) za předpokladu $N_1 = N_2$ dostaneme pro efektivní hodnotu ΔU

$$\Delta U = \frac{N_1}{N} \left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_0} \right) U \quad (13)$$

Tok ϕ_0 určíme z Hopkinsonova zákona (předpokládáme, že magnetický odpor feromagnetika je zanedbatelný vůči magnetickému odporu vzduchové mezery).

$$\phi_0 = \frac{N I}{R_m} = \frac{\mu_0 S N I}{2} \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right) \quad (14')$$

Toky ϕ_1 a ϕ_2 se rozdělí v nepřímém poměru magnetických odporů a platí

$$\frac{\phi_1}{\phi_0} = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \quad \text{a} \quad \frac{\phi_2}{\phi_0} = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \quad (15')$$

Indukční snímače

dosadíme-li do (12) za ϕ_1 a ϕ_2 dostaneme

$$\Delta U = \frac{N_1}{N} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \cdot U \quad (16)$$

Vychýlení kotvičky ze střední polohy můžeme vyjádřit jako

$$\delta_1 = \delta_0 + x ; \quad \delta_2 = \delta_0 - x ; \quad \delta_1 + \delta_2 = 2\delta_0$$

a po dosazení do (16) dostaneme

$$\Delta U = \frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{N_1}{N} \cdot U \cdot x \quad (17)$$

Vychýl

a po d

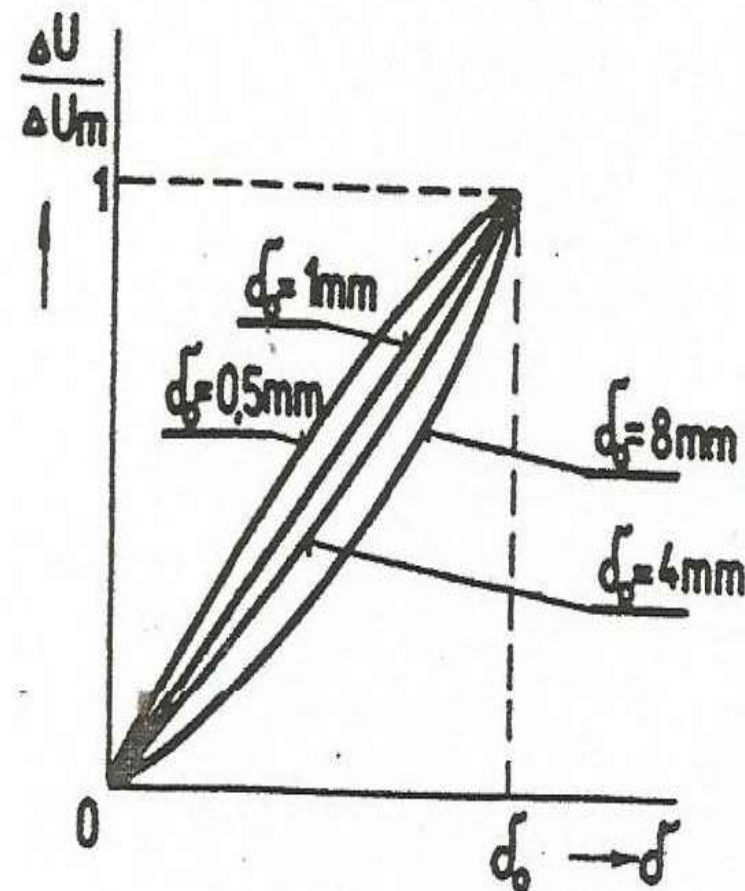
Indukční snímače

Ze vztahu (17) je patrné, že výstupní napětí ΔU je úměrné měřené veličině, jestliže magnetický obvod uspořádáme tak, aby uvažované předpoklady byly splněny. Závislost výstupního napětí vztaženého k maximální hodnotě v závislosti na klidové vzduchové mezeře při maximální magnetické indukci 0,8T je na obr. 7 i.

Indukční snímače

Obr. 7

Závislost výstupního napětí ze snímače
na klidové vzduchové mezeře
při $B_{\max} = 0,8 \text{ T}$.

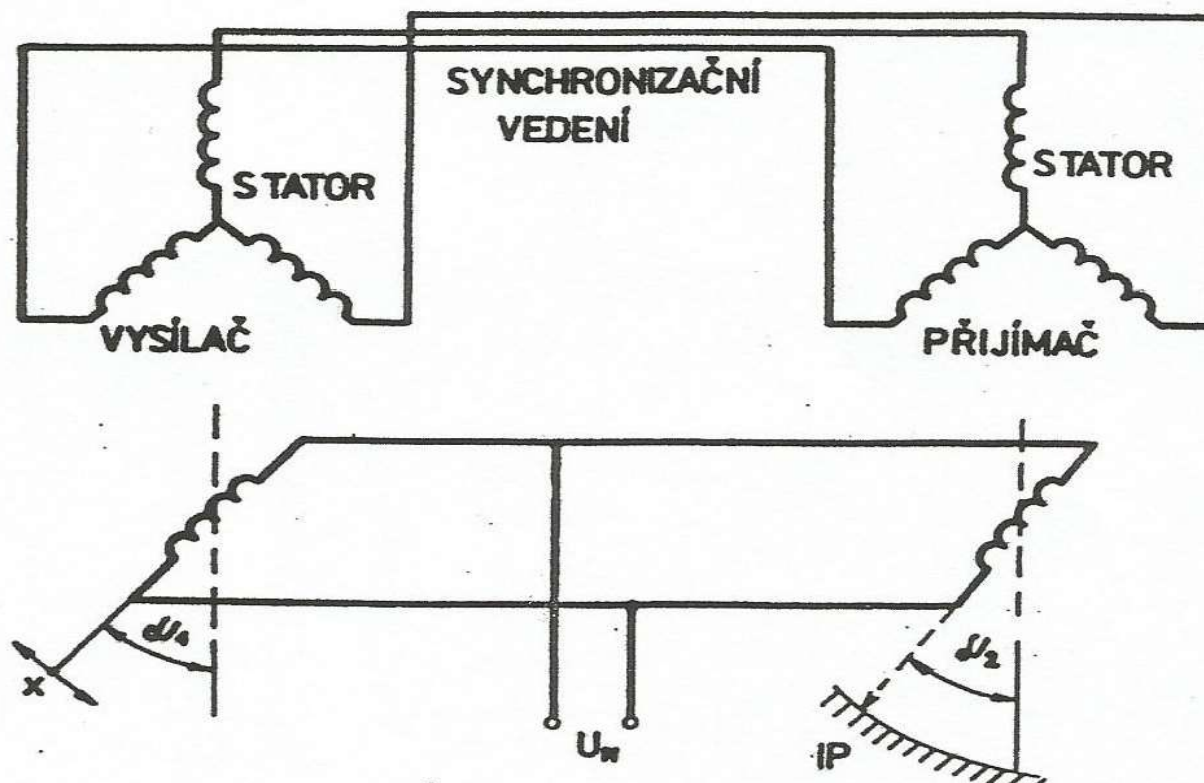


Indukčnostní snímače

3 Selsyny

Pro určení úhlu natočení se často používá měřicí systém složený ze dvou selsynů (obr. 8).

Obr. 8
Spojení dvou
selsynů pro pře-
nos výchylky.



Indukčnostní snímače

Selsyn se skládá ze statoru vinutého obdobně jako stator trojfázového asynchronního motoru se souměrným trojfázovým vinutím a z rotoru, který je navinut jednofázově a je napájen střídavým napětím přes kartáčky a kroužky.

Indukčnostní snímače

Jsou-li rotory vysílače a přijímače natočeny vzhledem ke svým statorům souhlasně ($\alpha_1 = \alpha_2$) neprochází synchronizačním vedením žádný proud. Jakmile se pootočí rotorem vysílacího selsynu, jsou indukovaná napětí ve vinutích statorů vysílače a přijímače různá a statorovým vinutím prochází proud. Tento proud způsobí magnetický tok, který spolu s magnetickým tokem rotoru přijímače vytvoří silové účinky, kterými působí na rotor. Rotor přijímače se natáčí do úhlu, ve kterém synchronizačním vedením opět nepoteče proud. Rotor přijímače sleduje rotor vysílače s jistou chybou závislou na zatěžovacím momentu hřídele přijímače; pasivních odporech a rychlosti změn úhlu.

Indukčnostní snímače

S rotorem přijímače je mechanicky spojen ukazatel indikačního přístroje IP, který na pevné stupnici zaznamenává změnu polohy.

Indukční snímače

Jinou aplikací selsynu je polohový transformátor (viz obr. 9). Magnetický tok statoru 2 indukuje v rotorovém vinutí napětí U_2 , jehož velikost je závislá na natočení rotoru 1. Indukované napětí je maximální, souhlasí-li směr magnetické osy rotoru 2 se směrem magnetické osy rotoru 1 neboli platí

$$U_2 = k \cdot U_1 \cdot \cos \alpha = k \cdot U_1 \cdot \sin \varphi$$

Indukční snímače

