Přednáška č. 3 a č. 4: Senzory neelektrických veličin

Ing. Petr Koudelka, Ph.D.

Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky

Měřící systémy I

23/10/2017

Mendelova univerzita v Brně

Obsah

- Základní rozdělení senzorů neelektrických veličin (dále jen "senzory NV")
- Odporové senzory

Základní rozdělení senzorů NV - Samotný senzor I

- Senzor neelektrických veličin:
  - snímá přímím nebo nepřímím způsobem měřenou neelektrickou veličinu,
  - využívá některý z fyzikálních principů na převod snímané veličiny na veličinu měřitelnou měřícím přístrojem,
  - snímač jako jediný člen měřícího řetězce má přímí kontakt s měřeným objektem,
  - jeho vlastnosti určují vlastnosti celého měřícího řetězce,
  - je nejslabším článkem měřícího řetězce,
  - cena snímače v porovnání s ostatní částí měřícího řetězce je srovnatelná a v některých případech dokonce i nákladnější.
- Požadavky kladené na senzory:
  - jednoznačná závislost výstupní veličiny od veličiny vstupní,
  - vhodný tvar základní přenosové funkce,
  - velká citlivost,
  - požadovaná přesnost,

Základní rozdělení senzorů NV - Samotný senzor II

- velká časová stálost,
- vhodná frekvenční charakteristika,
- na výstupu senzoru požadován co největší výkon,
- co nejmenší závislost na parazitních jevech,
- minimální zatěžování měřeného objektu senzorem,
- co nejjednodušší konstrukce,
- bez údržby

- Ve většině případů se při výběru senzoru jde cestou kompromisu.

Základní rozdělení senzorů NV - Skupiny senzorů I

- Aktivní senzory (generátorové) - Princip činnosti založen na působení neelektrické veličiny → senzor jako zdroj elektrické energie, tj. napětí, proud, elektrický náboj). Nepotřebují pomocný napájecí zdroj:
  1. odporové:
     - kontaktní,
     - tenzometrické (deformace, tlak),
     - teplotní,
     - polovodičové (měření teploty).
  2. kapacitní (měření výšky hladiny),
  3. indukční (měření posuvu),
  4. optoelektronické.

Základní rozdělení senzorů NV - Skupiny senzorů II

- Pasivní senzory (parametrické) - Princip činnosti založen na působení neelektrické veličiny → na senzoru se mění elektrický parametr (odpor, indukčnost, kapacita, frekvence, fáze, atd.). Potřebují pomocný napájecí zdroj:
  1. indukční (měření mechanických veličin):
     - elektrodynamické (průtokoměry),
     - elektromagnetické (snímání otáček),
  2. piezoelektrické (měření vibrací),
  3. termoelektrické,
  4. optoelektrické.

Základní rozdělení senzorů NV - Fyzikální jevy I

- Fyzikální jevy použité u čidel a snímačů na bázi křemíku

Neelektrický signál	Fyzikální jev	Realizace
mechanický	Piezoelektrický jev	piezorezistor, ...
tepelný	SEEBECKŮV jev	termorezistor, termoelektrický článek
zářivý	fotoefekt	fotorezistor, fotodioda, ...
magnetický	HALLŮV jev, GAUSSŮV jev	magnetorezistor, magnetotranzistor
chemický	Galvanoelektrický jev	ISFET k měření koncentrace

- Fyzikální jevy využívané v senzorice:
  1. Termoelektrické jevy:
     - teplotní závislost odporu polovodiče,
     - teplotní závislost PN přechodu v propustném směru,

Základní rozdělení senzorů NV - Fyzikální jevy II

- teplotní závislost odporu tenkých vrstev,
- pyroelektrický jev,
- termoelektrický jev,
- bolometrický jev.

2. Piezoelektrické jevy:
   - piezoodporový jev,
   - piezoelektrický jev,
   - akustickoelektrický jev.
3. Magnetoelektrické jevy:
   - Hallův jev,
   - magnetoodporový jev,
   - magnetodiodový jev,
   - magnetotranzistorový jev,
   - nábojový doménový jev.
4. Radiační jevy – neionizující elektromagnetické záření:
   - fotovodivost,
   - fotonapěťový jev,
   - laterární fotojev,

Základní rozdělení senzorů NV - Fyzikální jevy III

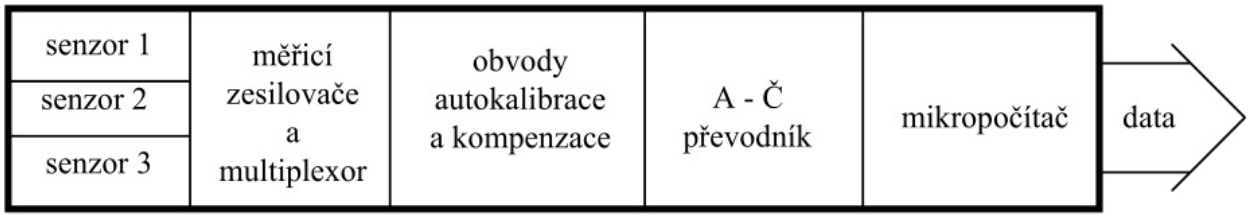
- obrazové snímání s prvky CCD (s přenosem el. náboje).

5. Radiační jevy – ionizující záření:
   - absorpce ionizujících částic,
   - ionizace,
   - sběr generovaných nosičů náboje,
   - polovodičové detektory ionizujícího záření.
6. Fyzikálně chemické jevy:
   - adsorpce vyvolané generací elektrochemického potenciálu,
   - sorpce vyvolaná změnou výstupní práce,
   - sorpce vyvolaná změnou vlastností dielektrik.
7. Mechanické jevy:
   - mechanická deformace (tenzometry),
   - vibrační rezonance (akcelerometry).

- Poznámka: V současné době se již využívají snímače III. generace, vyvinuté na aktuální technologické úrovni mikroelektroniky (I. generace - základní fyzikální jevy, II. generace - polovodiče, III. generace - inteligentní).

Základní rozdělení senzorů NV - Inteligentní senzor I

- III. generace senzorů (smart sensor)
- Struktura:



- Smart sensor = vlastní senzor zajišťuje fyzikální převod,
  - + obvody pro unifikaci signálu,
  - + obvody pro zpracování,
  - + obvody pro přenos dat.
- Složení:
  1. vstupní část:
     - vstupní převod,
     - zesílení,

Základní rozdělení senzorů NV - Inteligentní senzor II

- linearizace charakteristiky,
- autokalibrace,
- kompenzace.

2. vnitřní část:
   - A-D převod,
   - číslicová linearizace,,
   - autodiagnostika.
3. výstupní část:
   - mikropočítač,
   - aritmetické a logické operace,
   - komunikační obvody.

Odporové senzory - Úvod I

- Fyzikální podstata odporových senzorů:
  - Při zapojení elektrického napětí do elektrického obvodu vzniká usměrněný pohyb nábojů látkových částic prvků v obvodu. Průřezem prvků pochází tok kladných náboj v jednom směru a vytváří směr **elektrického proudu**. Velikost proudu I je posuzován jako množství kladného náboje prošlého za jednotku času: $I = \frac{dQ}{d\tau}$, kde je dQ elementární náboj a $d\tau$ doba toku.
  - **Elektrické napětí** připojené na tělese vytváří elektrostatické pole. Hustota procházejícího proudu i je úměrná intenzitě vytvořeného elektrostatického pole: $i = \gamma \cdot E_s$, kde γ je konstanta - měrná elektrická vodivost hmoty tělesa-vodiče, E_s intenzita elektrostatického pole . Tato rovnice vyjadřuje Ohmův zákon v diferenciálním tvaru. Pro měrnou elektrickou vodivost je udáván vztah: $\gamma = \frac{n_0 e_0^2 \tau}{2m_0}$, kde je n prostorová hustota pohyblivých částic s nábojem e, τ je střední doba toku částice, m hmotnost částice.

Odporové senzory - Úvod II

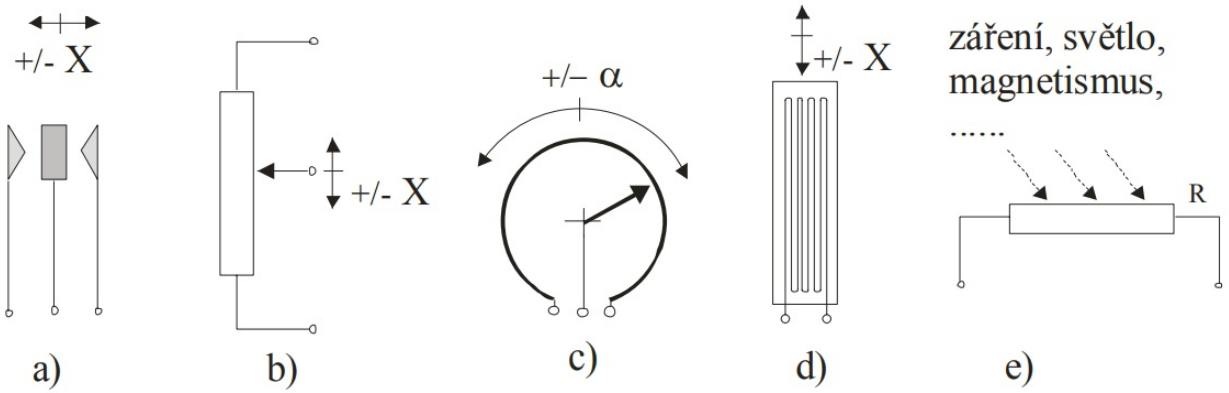
- Pro elektrický proud ve vodičích se odvodil Ohmův zákon v integrálním tvaru. Předpokládá homogenní vodič o průřezu S a délky l. Při zapojení elektrického napětí na vodič vzniká opět elektrostatické pole, pro které platí: $E_s = \frac{U}{l}$ a po dosazení předcházejících rovnic se dostane tvar pro elektrický proud: $I = S \cdot i = S \cdot \gamma \frac{U}{l} = G \cdot U$, kde je S průřez vodiče, i hustota proudu, $qgamma$ konstanta – měrná elektrická vodivost hmoty tělesa-vodiče, U přiložené elektrické napětí, l délka vodiče, G elektrická vodivost.
- Při zavedení pojmu elektrický odpor R, pro který platí: $R = \frac{1}{G} = \rho \cdot \frac{l}{S}$, kde je ρ měrný elektrický odpor vodiče dostáváme vztah pro Ohmův zákon v integrálním tvaru: $U = R \cdot I$.

- Rezistantní senzory je odborný název pro elektrické odporové senzory. Patří mezi pasivní senzory, protože vnější podnět (měřená veličina) mění vlastnost - elektrický odpor hmoty senzoru.

Odporové senzory - Úvod III

- Při vyhodnocování těchto změn v elektronických obvodech musíme používat pomocné napájecí napětí a proto se jedná o pasivní senzory.
- Vstupní podnět způsobuje u odporových senzorů změnu elektrického odporu. Takovým vnějším podnětem je např.:
  - poloha předmětu, změna rozměru předmětu u senzorů kontaktních a potenciometrických senzorů,
  - změna rozměrů u tenzometrických senzorů,
  - teplota okolí u senzorů teplotních,
  - emise viditelného světla u senzorů fotorezistivních,
  - elektromagnetické tepelné záření u bolometrů,
  - koncentrace disociovaných iontů u senzorů vodivosti kapalin,
  - magnetická indukce u senzorů magneto-rezistantních.

Odporové senzory - Úvod IV

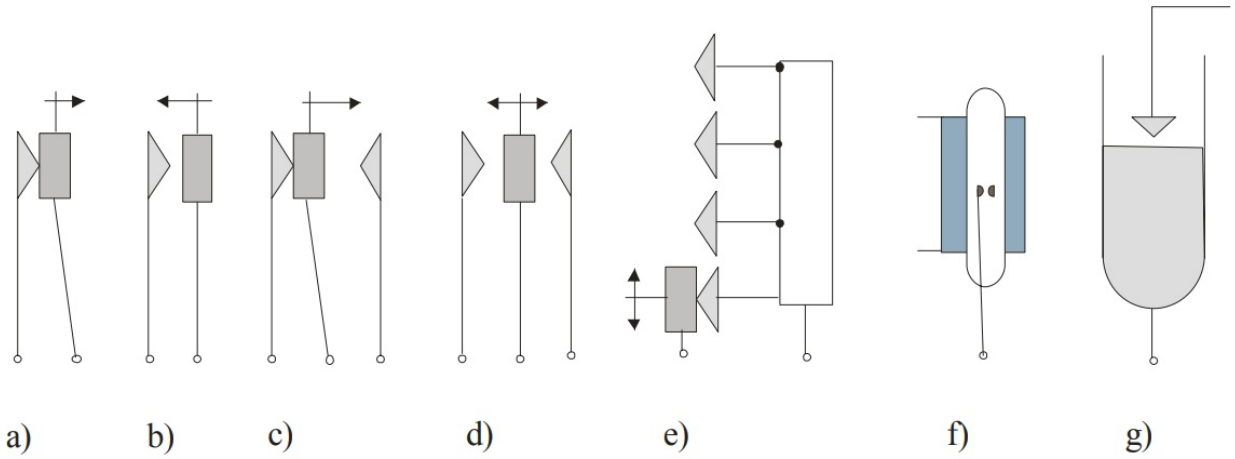


Kontaktní senzor je zobrazen pozicí a), potenciometrický odporový senzor pozicemi b), c), tenzometr pozicí d), kdy se celý tenzometr natahuje a typy senzorů, kde se mění elektrický odpor vlivem změn parametrů vnějšího prostředí, např. intenzity záření, magnetické indukce apod. jsou zobrazeny na pozici e)

Odporové senzory - kontaktní I

- Vnější podnět způsobuje u kontaktních senzorů skokovou změnu elektrického odporu sepnutím nebo rozepnutím kontaktů. Jedná se o nespojité skokové změny elektrického odporu. Princip se používá u všech snímačů nebo zařízení při indikaci polohy předmětu, jeho stavu, přítomnosti předmětu.
- Obecný vztah: $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$
- Lze aplikovat na kontaktní odporové senzory tak, že platí pro stav sepnuto. Mezi kontakty je vodivé propojení, R_0 dosahuje malé hodnoty , např. 0,01 Ω, ρ je měrný odpor materiálu kontaktu, l je jeho tloušťka a S dotyková plocha kontaktů. Pro stav rozepnuto je hodnota R velmi veliká např. $> 1.1025\Omega$ pro reálné podmínky kontaktů ve vzduchu.

Odporové senzory - kontaktní II



Na pozici a) je kontakt ovládaný vnějším podnětem od změny polohy tak, že je rozepínán, na pozici b) je spínán, na pozici c) jsou kontakty přepínány dvoupolohově, na pozici d) jsou přepínány třípolohově a na pozici e) jsou spínány vícepolohově. Kontaktní systém hermeticky umístěný v krytu je ovládán od vnějšího magnetického pole a je použit u tzv, jazýčkových relé, pozice f). Spínání kontaktů může být provedeno také vodivou kapalinou, např. vodou, rtutí, jak zobrazuje pozice g).

Odporové senzory - kontaktní III

- Základem kontaktních senzorů jsou vlastní kontakty. Materiál, konstrukce a provedení kontaktů určují přesnost, spolehlivost a stálost funkce spínání kontaktů a současně i střední dobu života kontaktů. Požadavky na kontakty lze stanovit v těchto bodech:
  - malý přechodový odpor,
  - stálost při malých proudech a napětí a při malých tlacích,
  - krátká doba ustálení kontaktů,
  - odolnost materiálu proti vlastnostem prostředí.
- Ideální dotyková plocha kontaktů je vytvořena na styku dvou ideálně rovných ploch. U reálných kontaktů toho nelze dosáhnou. Na kontakty dále působí nestejnoměrný přítlačný tlak, zahřívání od přechodového odporu, elektrický oblouk při spínání nebo rozpínání neohmických zátěží, oxidace od vnějšího prostředí atd. Proto se stanovuje reálná dotyková

Odporové senzory - kontaktní IV

plocha vždy větší než ideální podle vztahu: $S_r = \frac{S_i}{0.001}$, kde S_r je reálná dotyková plocha, S_i ideální dotyková plocha.

- Přítlačná síla kontaktů se volí podle tvrdosti jejich materiálu s tím, že platí: $p = H = \frac{F}{S_r}$, kde je p přítlačný tlak, H tvrdost materiálu kontaktů (asi $5 \cdot 10^2$ MPa), F je přítlačná síla, S_r reálná dotyková plocha.
- Přechodový odpor je ovlivňován přítlačnou silou, velikostí dotykové plochy a stavem oxidace přechodové vrstvy kontaktů. Změnou přítlačné síly např. chvěním vznikají změny přechodového odporu a tím vzniká rušivé elektrické napětí na kontaktech podle vztahu: $\Delta u = \Delta R \cdot I$, kde je ΔR změna přechodového odporu, I proud kontaktů.

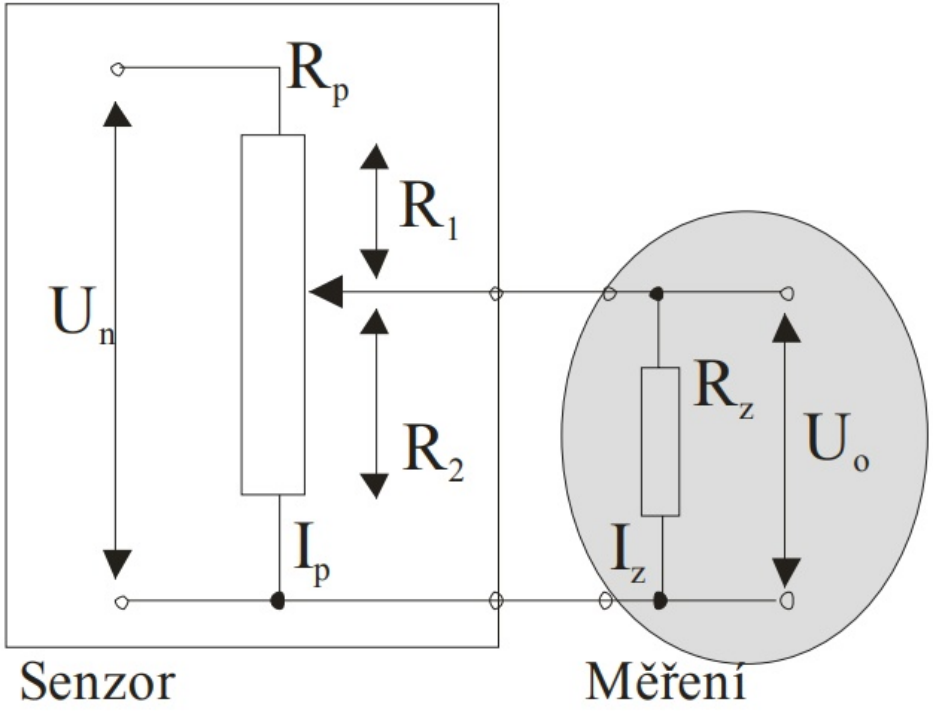
Odporové senzory - kontaktní V

- Nepříjemný stav nastává při jiskření nebo při vzniku oblouku na kontaktech. Teplota oblouku dosahuje hodnoty až 5000 °C. Ztráta objemu materiálu opalováním je vyjádřena vztahem: $V = k_0 \cdot I^3$, kde je k_0 konstanta materiálu pro opalování (cca $k_0 = 6 \cdot 10^{-14}$), I proud protékající kontakty.
- Z tohoto důvodů je důležitá volba materiálů kontaktů. Při hledání optimální slitiny kovů se navíc musí brát v úvahu i požadavky ekologie, tj. omezení použití těžkých kovů. U senzorů se jedná o kontakty s malým proudovým zatížením. Proto se používá materiál ze slitin stříbra s platinou, wolframem, grafitem, rhodiem, paladiem.

Odporové senzory - potenciálové I

- Potenciometrický senzor obsahuje odporovou dráhu s pohyblivým kontaktem - sběračem. Tento kontakt při změně polohy od vnějšího podnětu mění elektrický odpor mezi vývodem kontaktu a jedním koncem odporové dráhy.
- Tvar odporové dráhy je buď přímkový nebo kruhový nebo speciální, jako např. šroubovice. Potenciometrický senzor může být také kapalinový elektrolytický nebo rtuťový.

Odporové senzory - potenciálové II

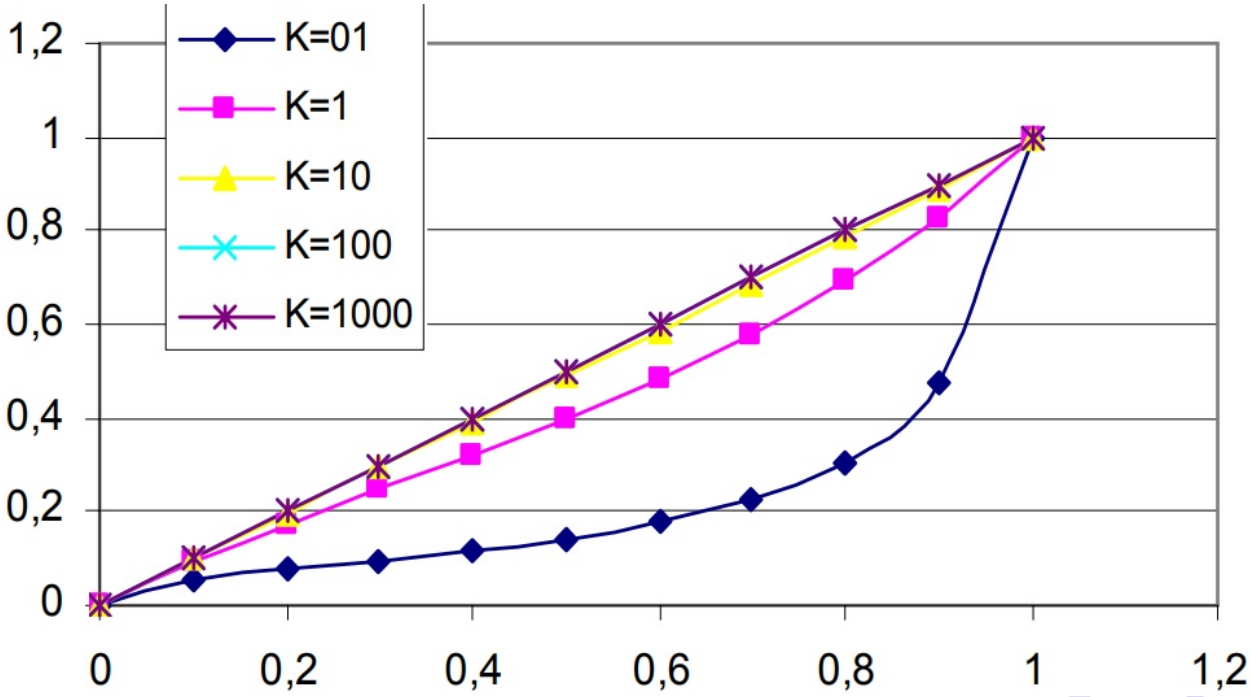


- Potenciometr je napájen napětím U_n. Podle polohy středního bodu je potenciometr rozdělen na část R_1 a R_2. Připojený vytváří sériově paralelní zapojení odporu R_1 a R_2 a R_z. Po výpočtech hodnot proudů tekoucí přes potenciometr I_p a přes měřicí prvek I_z lze odvodit vztah:

Odporové senzory - potenciálové III

$$U_0 = \frac{\frac{R_2 \cdot R_z}{R_2 + R_z}}{R_1 + R_2} \cdot U_n = \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha(1-\alpha)}{K}},$$

kde je U_0 výstupní napětí, R_1 odpor první části potenciometru ($R_1 = \alpha \cdot R_p$), α poloha sběrače, R_2 odpor druhé části potenciometru $R_2 = (1 - \alpha) \cdot R_p$), R_z zátěžný odpor, U_n napájecí napětí, K činitel zatížení ($K = \frac{R_z}{R_p}$).



Odporové senzory - potenciálové IV

- Velikost zátěžného odporu převodníku způsobuje také zavedení přídavné chyby. Např. pro $K = 1$ je přídavná chyba až 15 %, pro $K = 1000$ je 0.001 %. Pro přídavnou chybu platí: $\delta^z = \frac{U_0}{U_n} - \alpha$.
- Celková přesnost potenciometrického senzoru je udávána pro stejnosměrné napájecí napětí. Při použití střídavého napětí vzniká další chyba komplexní impedancí od indukčnosti vinuté odporové dráhy.
- Velmi důležité je dodržet minimální proud přes potenciometr I_p. Velikost tohoto proudu způsobuje zahřívání potenciometru, vzniká přídavná chyba od změn odporu potenciometru od vyšší teploty.
- Potenciometrické senzory jsou aplikované do různých snímačů délkových rozměrů, do snímačů hladin, plováků, polohy kuželky regulačního ventilu.

Odporové senzory - teploty I

- Teplotní odporový senzor využívá fyzikální princip závislosti elektrického odporu kovů nebo polovodičů na teplotě. Vstupním podnětem je teplota prostředí, které je v přímém styku se senzorem. Senzor je tak součástí procesu přenosu tepla vedením, prouděním nebo sáláním z vnějšího prostředí do materiálu senzoru.
- Materiálem pro senzor je nejčastěji vybraný **kovový** nebo **polovodičový** materiál. Pro správnou funkci musí tento materiál mít správné složení, především musí být fyzikálně i chemický stálý.
- Teoretický výklad jevu změn odporu podle teploty používá argument, že při zvyšující se teplotě zvětšuje se amplituda termických kmitů krystalové mřížky materiálu a zvětšuje se pravděpodobnost srážek elektronů a iontů.

Odporové senzory - teploty II

- Tím se zkracuje volná dráha elektronů a doba zrychlování částic elektrickým polem. Proto klesá elektrický vodivost γ daná výrazem: $\gamma = \frac{n_0 e_0^2 \tau}{2m_0}$.
- Pro závislost změn odporu podle teploty platí Lorentzův-Lorenzův zákon: $\frac{\lambda}{\gamma} = T$, kde je λ tepelná vodivost, γ elektrická vodivost, T absolutní teplota.

Kovové odporové senzory - teploty

- Principem kovových odporových senzorů je teplotní závislost odporu kovového materiálu na jeho teplotě. Kov má v krystalové mřížce soubor kladných iontů a chaoticky se pohybující elektrony, které ovlivňují změny elektrického odporu.

Odporové senzory - teploty III

- Jako materiál slouží především čisté kovy. Požadavkem je konstantní teplotní součinitel v čase, nulová hystereze a dostatečně vysoký měrný odpor. Nejčastěji používaným kovovým materiálem je platina, nikl, měď, molybden, slitina stříbra a zlata, případně další kovy.
- Významným parametrem pro teplotní závislosti senzorů je tzv. teplotní součinitel. Pro teplotní součinitel kovových senzorů teploty α je stanoven vztah: $\alpha = \frac{\rho_{100}-\rho_0}{100\cdot\rho_0}$, kde je ρ_{100} měrný odpor při 100°C, ρ_0 měrný odpor při 0°C. Jednotkou je (1/K) nebo (ppm, hodnota $1 \cdot 10^{-6}$ větší). Hodnoty měrného elektrického odporu ρ_{20} a teplotního součinitele α(ppm) pro některé kovy jsou v následující:

Odporové senzory - teploty IV

Kov	ρ_{20} (Ωm). 10^{-6}	α (ppm)	Kov	ρ_{20} (Ωm). 10^{-6}	α (ppm)
Ag	0,0149	4100	Na	0,0434	5460
Al	0,0241	4300	Ni	0,0605	6900
Au	0,0204	3900	Pt	0,098	3920
Cu	0,0155	4330	Re	0,198	3100
Fe	0,10	5600	Rh	0,044	4400
Mo	0,05	4700	W	0,0491	4820

Platinové odporové senzory - teploty

- Platina se používá u kovových odporových senzorů pro svoji vysokou chemickou stálost, vysokou teplotu tavení a možnost dosažení vysoké výrobní čistoty.
- Používá se vysoce "čistá" platina s obsahem nečistot do 0.07 %. Nečistotami jsou zpravidla železo, iridium ap. Tato čistota zaručuje změny základního odporu kolem $5 \cdot 10^{-6}$, což odpovídá změnám teploty pro typ **Pt 100** asi 0.001 K.

Odporové senzory - teploty V

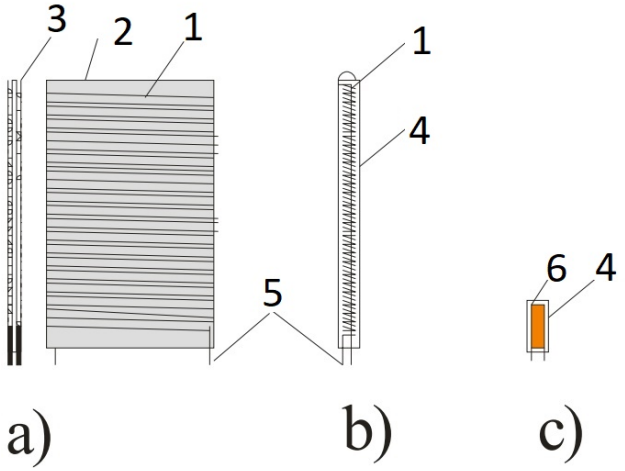
- Platina vyhovuje pro měření teploty od -200 do 860°C. Její měrný odpor při teplotě 20°C je $0,098 \cdot 10^{-6}$ Ωm . Změna odporu v závislosti na teplotě je dána funkcí:
- $R = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$, kde je R_0 odpor při 0°C, t teplota °C, $A = 3,9075 \cdot 10^{-3}$, $B = -0,575 \cdot 10^{-6}$, nebo podle standardu IEC má funkce tvar:
- $R = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3(t - 1000))$, kde $A = 3,90802 \cdot 10^{-3}$, $B = -0,508 \cdot 10^{-6}$, $C = 0$ pro $t > 0$°C a $C = -4,27350 \cdot 10^{-12}$ pro $t < 0$°C.
- Platinové senzory mají podle standardu IEC 751 stanovené toleranční pásmo: třída A až třída D.
- Používají se senzory s odporem při 0°C $R_0 =$ 100 Ω, 500 Ω, 1000 Ω, dnes již přistupuje hodnota 10000 Ω a ve vývoji jsou senzory s hodnotou 100 kΩ.

Odporové senzory - teploty VI

- Teplotní součinitel v ČR je α= 0,00385 (1/K) čili 3850 (ppm/K). Poměr odporů $W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}$ je 1,385.
- Pro platinové senzory platí tyto hodnoty podle normy ČSN 25 8301 nebo IEC 751.
- Standardem platinových senzorů teploty je senzor **Pt 100**. Toto značení znamená, že se jedná o kov platina, která vykazuje při $0°$C elektrický odpor 100 Ω. Citlivost tohoto senzoru je pro teplotní součinitel 3850 ppm 0,385 $\Omega/°$C. Pro zvýšení citlivosti jsou vyvíjeny senzory **Pt 1000** a další.

Odporové senzory - teploty VII

Typ	Ω pro 0°C	Citlivost Ω/°C
Pt100	100	0,385
Pt1000	1000	3,85
Pt10000	10000	38,5
Pt100000	100000	385
? co bude následovat ?		



- Senzor je vyroben z platinového drátu o průměru 0,045 mm nebo jako folie z platiny na keremické podložce.

Odporové senzory - teploty VIII

- Vinutí z drátu je bifilární, jednoduché nebo dvojité. Provedení je se 2 nebo 4 vývody, tvar nosné části je plochý, válcovitý z keramiky, skla nebo slídy nebo umělé hmoty.
- Příklad provedení: pozice a) zobrazuje plochý senzor s platinovým vinutím (1) na slídové podložce (2) opatřené krytem (3), pozice b) zobrazuje válcový senzor s vinutím (1), s keramickým tělískem (4) a vývody (5). Pozice c) je typ foliového senzoru, kde na keramické podložce (4) je folie Pt (6). Foliové senzory jsou zpravidla v provedení typu Pt 1000, Pt 10k a Pt 100k.
- Proudové zatížení senzorů např. v obvodech vyhodnocování se musí dodržet na hodnotě do 1 mA (dříve 10 mA), aby nevznikala nejistota v měření v důsledku ohřátí od protékajícího proudu. Dlouhodobá stabilita závisí na čistotě kovu a má hodnotu 0,05%/1000h.

Odporové senzory - teploty IX

Niklové odporové senzory - teploty

- Významným kovem pro odporové teploměry je nikl. Použitelný rozsah měření je od -60 do 150°C, krátkodobě 180°C.
- Při teplotách nad 300°C nastávají již strukturní nezvratné změny. Nikl je napadán kyselinami a čpavkem. Používá se proto, že je **levnější** než platina.
- Používají se senzory s $R_0 = 100\Omega$ (teplotní součinitel je 0,618 (1/K), $R_0 = 891\Omega$ (teplotní součinitel je 0,6371 (1/K)) a $R_0 = 1000\Omega$ (teplotní součinitel je 0,618 nebo 0,5 (1/K)).
- Podle DIN je absolutní chyba Ni senzorů teploty při 0°C ±0,6°C, při 160°C je ±2°C a v záporných teplotách při -60°C je ±2,3°C.
- Dlouhodobá stabilita závisí na čistotě a má hodnotu 0,08%/1000h při 150°C.

Odporové senzory - teploty X

Měděné odporové senzory - teploty

- Měď jako kov pro odporový teploměry je praktický použitelný pro rozsah od -200 do 200°C.
- Měrný odpor Cu při 20°C je $0,0155 \cdot 10^{-6}$ Ωm.
- Měď má malý měrný odpor a vysokou citlivost vůči kyslíku, který způsobuje oxidaci.
- Materiál lze ale použít pro přímé měření teploty např. ve vinutí elektrických motorů.

Molybdenové odporové senzory - teploty

- Novým kovem pro odporové teploměry je molybden. Má dobrou linearitu a vhodný rozsah dilatace vůči podložkám z keramiky.

Odporové senzory - teploty XI

- Vyrábí se moderní technologií a pokrývá se barevným polymerem.
- Použitelný rozsah měření je -200 do 200°C. Měrný odpor při 20°C je $0,055 \cdot 10^{-6}$ Ωm.
- Používají se senzory s odporem při 0°C $R_0 = 1000$ typ Mo (teplotní součinitel je 0,3 (1/K)) a typ MoP (teplotní součinitel je 0,385 (1/K)).

Ostatní odporové senzory - teploty

- Jako kov ve výjimečných provedeních senzorů se používá např. stříbro do 200°C s měrným odporem $0.0149 \cdot 10^{-6}$ Ωm při 20°C, zlato do 400°C s měrným odporem $0.0204 \cdot 10^{-6}$ Ωm při 20°C.
- Slitina zlato-stříbro je náhrada za platinu se stejnou závislostí změn odporu pro rozsah do 120°C.

Odporové senzory - teploty XII

Polykrystalické polovodičové odporové senzory - teploty

- U polovodičů je důležitá teplotní závislost koncentrace nosiče náboje. Pro polovodičový jev platí přibližně vztah:
- $n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$, kde je n počet elektronů v jednotkovém objemu, E rozdíl mezi energetickými hladinami mřížky, k Boltzmannova konstanta, T je teplota absolutní. Pro měrnou vodivost polovodičů platí obdobně jako u kovů vztah:
- $\delta = n \cdot e^2 \frac{\tau}{m}$, kde je n počet elektronů v jednotkovém objemu, e elementární náboj, relaxační čas elektronů, m hmotnost nosiče náboje. Pro teplotní součinitel platí:
- $\alpha = \frac{\delta(\ln n)}{\delta t} \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \cdot \frac{1}{T}$.
- Odporové polovodičové senzory podle druhu použitého materiálu dělíme na:
  - polykrystalické (termistory),
  - monokrystalické (bez přechodu PN s dotací P nebo N).

Odporové senzory - teploty XIII

Termistory

- Termistor je odporový senzor s výrazně nelineární závislostí odporu na teplotě.
- V určité oblastí dosahuje vysokou citlivost, tj. velkou změnu odporu na jednotkou změnu teploty v porovnání s kovovými senzory.
- Termistory jsou používány jako senzory teploty pro dotykové měření, ale i jako žhavené senzory nad teplotou okolí procházejícím elektrickým proudem.
- Termistor má podle druhu materiálu amorfní (beztvarou) a polykrystalickou (mnoho krystalickou) strukturu:
  - záporný teplotní součinitel (NTC-negastor),
  - kladný teplotní součinitel (PTCpozistor).

Odporové senzory - teploty XIV

Termistory NTC - negastory

- Vyrábí se práškovou technologií (lisováním a slinováním za vysokých teplot) ze směsi oxidů kovů (např. Fe_2O_3+TuO_2, MnO+CoO, případně TiO_2, CuO, NiO, BaO).
- Aplikují se běžně v rozsahu teplot od -80 do 200°C, speciálně pro rozsahy od 4.2 K až do 1000°C.
- Negastory mají velkou negativní teplotní závislost elektrického odporu na teplotě. Teplotní součinitel je pětkrát až padesátkrát větší než u kovů.
- Závislost odporu na teplotě je velmi nelineární. Je dána přibližným vztahem:

Odporové senzory - teploty XV

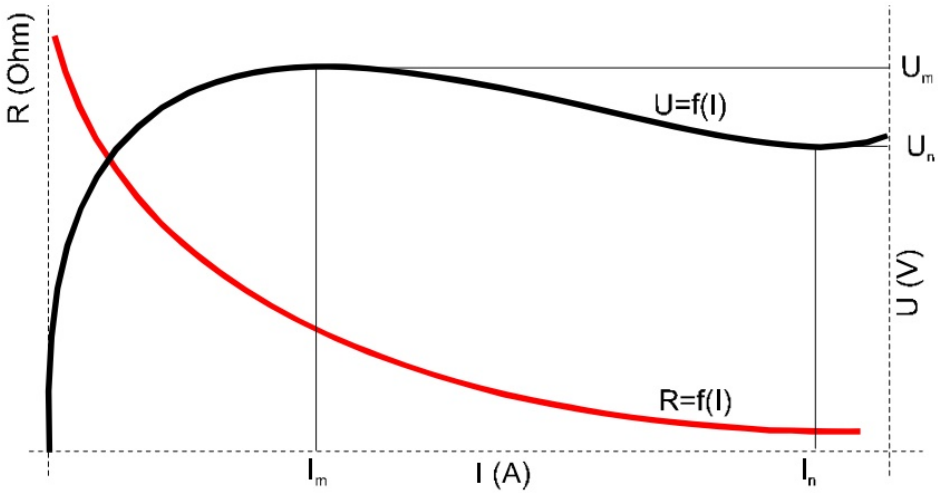
- $R = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$, kde je A konstanta daná geometrickým tvarem a použitým materiálem, B teplotní konstanta (pro některé materiály je funkcí měrného odporu materiálu $B = \mathrm{lm}(\rho)$), T absolutní teplota, e základ přirozených logaritmů e=2,718. Konstanta B se u reálných senzorů jeví jako závislá na teplotě ve větším rozsahu teplot.
- Pro dvě teploty lze vztah upravit na tvar vhodný pro výpočet odporu termistoru pro libovolnou teplotu T:
- $R = R_r \cdot e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15})}$, kde je R_r referenční odpor (např. 25°C), B teplotní konstanta, T teplota sledovaná. Konstanta B je udávána výrobcem pro konkrétní typ nebo se vyhodnotí z naměřených hodnot pro dvě teploty podle vztahu:
- $B = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln(\frac{R_1}{R_2}$, kde se podle DIN volí T_1=291,15 K a T_2=358,15 K a odpor senzoru R_1 a R_2 pro dané teploty se zjistí měřením.

Odporové senzory - teploty XVI

- Přesné vyhodnocení teplotní závislosti termistoru (v rozsahu 0 až 100°C ± 0,1 K) dává také rovnice:
- $\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c(\ln(R)^3)$, kde konstanty a, b, c se určují regresní metodou při teplotách 25, 40 a 70°C z charakteristiky.
- Pro správnou funkci termistoru jako senzoru teploty je nutné napájet senzor proudem co nejmenším, aby se neohříval. Pro posouzení tohoto stavu se uplatňuje vztah:
- $T = T_0 + C_p \cdot P$, kde je T teplota termistoru (K), T_0 teplota okolí (K), C_p výkonová citlivost (K/W), P elektrický příkon (W, $P = U \cdot I$).
- Pro odpor termistoru lze odvodit závislost odporu na napájecím napětí a získává se vztah:
- $R = R_0 \cdot e^{(-B\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_0 + C_p \cdot P})}$.

Odporové senzory - teploty XVII

- Druhou základní charakteristikou pro termistory je statická voltampérová charakteristika. Vyjadřuje změnu elektrických vlastností při ohřívání od Jouleova tepla při průchodu elektrického proudu při konstantní teplotě okolí.



Odporové senzory - teploty XVIII

- V počáteční fázi je charakteristika lineární. Zde je ohřívání malé a teplo se přenáší do okolí. V dalším průběhu s rostoucím proudem vykazuje křivka maximum napětí, pak nastává pokles a další nárůst. Tato část je ovlivněna poměry vzniku tepla od proudu a přenosem tepla do okolí.
- Vedle statické voltampérové charakteristiky se uvádí také ohřívací a ochlazovací charakteristiky. Jsou to časové průběhy odporu termistoru při ohřívání elektrickým proudem podle podmínek zapojení nebo při ohřívání nebo ochlazování při změnách okolní teploty (vložením do jiné teploty) nebo podmínek přenosu tepla (ofukování). Je to exponenciální funkce ve tvaru:

Odporové senzory - teploty XIX

- $t = (t_1 - t_0)e^{-\frac{t}{T_r}}$, kde t_1 je původní zvýšená teplota, t_0 teplota okolí, t je teplota v čase, T_r $(= H \cdot C_p)$ časová konstanta, H je tepelná kapacita termistoru (J/K), C_p výkonová citlivost (K/W).
- Výrobci vyrábí termistory různých parametrů a tvarů. Především se jedná o parametr R25, tj. o hodnotu odporu při 25°C, která bývá od 10 Ω po 1 MΩ. Dále je to tepelná konstanta B, která dosahuje hodnot od 1000 do 5000. Podle velikosti a tvarů se jedná o termistory válcové, plošné, perličkové.
- Pro zajištění časové stálosti termistorů, shodnosti charakteristik a jejich zaměnitelnosti se stále hledají nové materiály. Velmi známý je tenkovrstvý termistor SiC pro rozsahy od -100 do $+450$°C. Je napařen na substrátu Al_2O_3 s Pt vývody.

Odporové senzory - teploty XX

- Negativní vlastností negastorů je jejich nestabilita, velká neurčitost ($\pm$ 1K) a nelinearita. Nepříznivé jsou poměry při stárnutí a změny při zatížení. Kvalitní termistory podléhají umělému stárnutí (až 1000h). Výhodou je malý rozměr a vysoký teplotní součinitel.

Vlastnosti	Tyčinkový NR001	Destičkový NR-F1-22	Šroubový NR-G2-100	Perličový NR-17-10
Odpor R_{25} (Ω)	<1000	22	100	<1000
I provozní (mA)	100	1	1	0,1
Konstanta 1/Cp (mW/K)	20	9,5	12	0,1
Příkon Pmax (W)	3	0,75	0,5	0,001
Konstanta B (K)	2700	3050	3550	3000

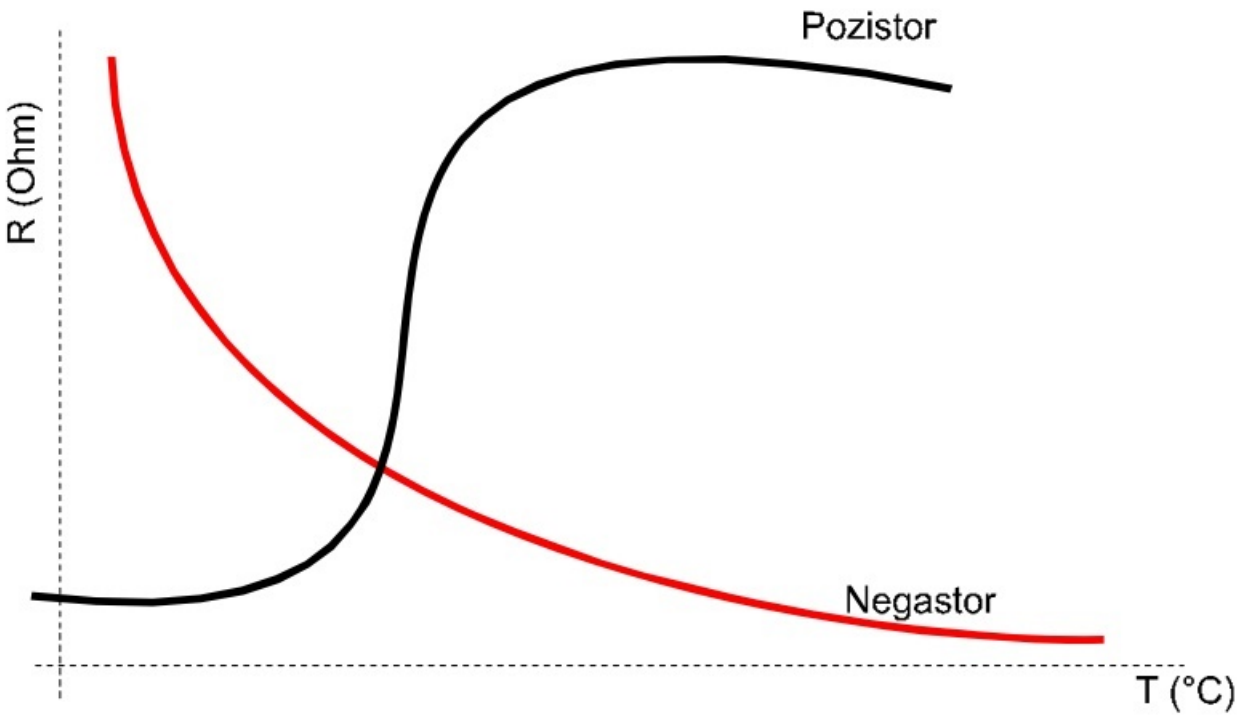
Odporové senzory - teploty XXI

Termistory PTC - pozistory

- Pozistor je polykrystalický termistor s kladným teplotním součinitelem odporu. Se stoupající teplotou od záporných teplot dochází nejprve k mírnému poklesu odporu.
- Při určité teplotě, tzv. Curieově teplotě (podle druhu materiálu od 60 do 180°C a vysvětluje se to chováním spinů) dochází k prudkému růstu odporu s tím, že po dosažení další tepelné hranice se odpor přestává měnit a opět začne klesat.
- Pro oblast nárůstu platí: $R = R_r \cdot e^{A \cdot t}$, kde je $A = 0{,}16$ (1/K), t je teplota nad Curieovou teplotou.
- Pozistory jsou používány v praxi u limitních snímačů a u snímačů pro spojité měření v určitém úzkém pásmu teplot. Často jsou používány pozistory jako ohřívací odpory pro malé rozsahy teplot ohřátí (např. pro ohřev skel automobilů).

Odporové senzory - teploty XXII

- Vyrábí se z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. z titaničitanu barnatého ($BaTiO_3$).



Odporové senzory - teploty XXIII

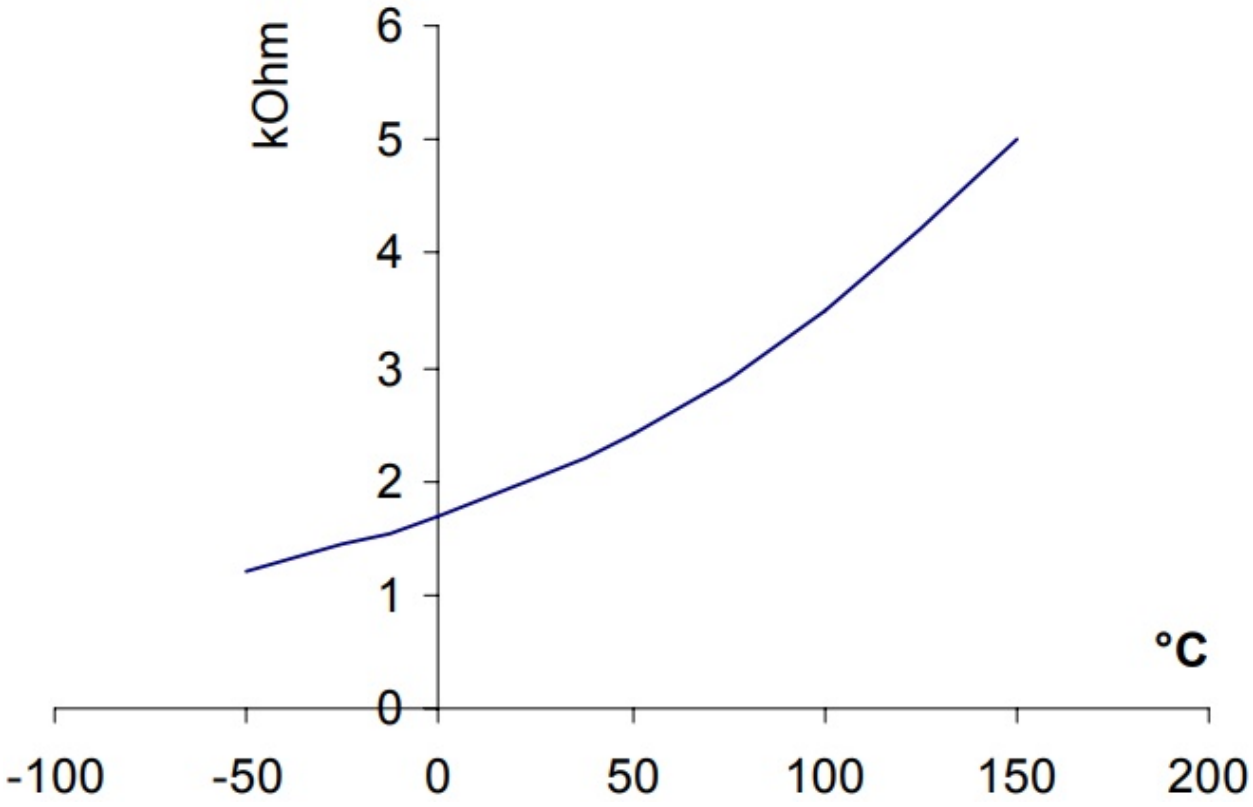
Monokrystalické polovodičové odporové senzory teploty

- Monokrystalické odporové senzory používají pro senzor polovodičový materiál a to buď materiál z čistého monokrystalu polovodičového materiálu (tj. čistý vykrystalizovaný křemík, germanium, indium a další polovodiče a jejich slitin) nebo z čistého polovodičového materiálu dotovaného atomem dalšího prvku typu P nebo N, ale bez přechodů PN.
- Germaniové senzory jsou vhodné pro měření nízkých teplot, např. od –190°C. Např. materiál z dendritního (stromečkovitě krystalického) germania typu P má lineární charakteristiku v rozsahu teplot –60 až +100°C s velmi dobrou časovou stálostí při měrném odporu 1Ω·cm. Jeho teplotní součinitel změn odporu je od $5 \cdot 10^{-3}$ až $8 \cdot 10^{-3}$ (1/K).

Odporové senzory - teploty XXIV

- Senzor vyrobený napařováním india má lineární závislost odporu na teplotě v rozsahu od –196 až do +100°C. Jeho teplotní součinitel odporu je $3,5 \cdot 10^{-3}$ až $4,3 \cdot 10^{-3}$ (1/K).
- Křemíkové polovodiče typu N jsou určeny pro rozsah –150 až +350°C. Měrný odpor při 25°C je podle dotační koncentrace 0.5 až 5, případně 10 až 20 Ω·cm.
- Teplotní závislost odporu podle charakteristiky lze aproximovat vztahem:
- $R = R_r + k(t - t_r)^2$, kde je R_r základní odpor (typická hodnota pro senzor Si je $R_r = 16\Omega$, t_r referenční teplota $t_r = .241,52°$C, $k = 2,7931 \cdot 10^{-2}$.

Odporové senzory - teploty XXV



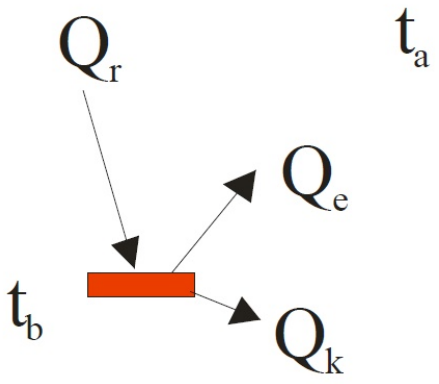
Odporové senzory - Bolometry I

Bolometry

- Bolometr je neselektivní senzor tepelného (elektromagnetického) záření pracující na principu změny elektrického odporu v důsledku absorpce záření.
- Závislost lze vyjádřit přibližným vztahem:
- $\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T$,
- kde α je teplotní součinitel změny odporu R, jehož velikost je určena použitým materiálem čidla bolometru a pracovní teplotou ($\alpha =$ 0,5 - 5000 K^{-1}).
- Oblast měření IR pomocí těchto senzorů je velmi široká a obsahuje spektrum záření od 0,8 až 200 µm i více (např. v astronomii snímání kosmického záření).

Odporové senzory - Bolometry II

- Hmotnost senzoru je malá a proto časová konstanta je v jednotkách milisekund.



- V ustáleném stavu je tepelná bilance na senzoru dána vztahem:
- $Q_r = Q_e + Q_k,$

Odporové senzory - Bolometry III

- kde je Q_r tepelný tok elektromagnetického záření absorbovaný na senzoru, Q_e tepelný tok elektromagnetického záření emitovaný ze senzoru podle jeho povrchové teploty t_b, Q_k tepelný tok ztrátový do okolí o teplotě t_a . Elektrický odpor senzoru bolometru je pak daný teplotou hmoty senzoru t_b.
- Tepelná bilance senzoru v dynamickém režimu je dána vztahem:
- $\Delta Q = m \cdot c \cdot \frac{dt_b}{d\tau}$,
- kde je m hmotnost senzoru (kg), c tepelná kapacita materiálu senzoru (J/kg/K), t_b teplota senzoru (K), τ čas (s).
- Materiálem senzoru může být kov, polovodič nebo supravodič.

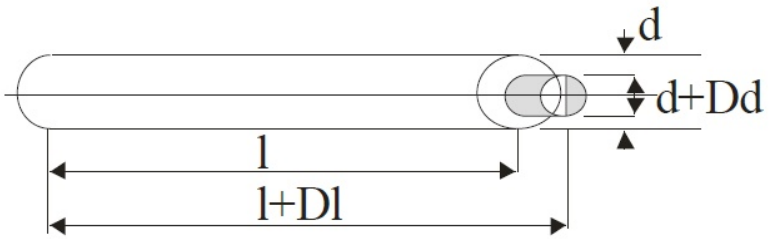
Odporové senzory - Bolometry IV

- Kovové bolometry jsou vyrobeny jako tenká vrstva - folie kovu v tloušťce 0,1 až 3 μm. Jako materiál se používá nejčastěji platina, nikl, vizmut, antimon. Délka senzoru je v jednotkách milimetrů a šířka v jednotkách desetin milimetru. Citlivost senzoru se dosahuje v hodnotách 1V/W.
- U polovodičových bolometrů se používá polykrystalický materiál na bázi CuO_2 nebo monokrystalický křemík. Geometrické rozměry jsou podobné kovovým s rozdílem větší tloušťky a to až do 10 μm.
- Pro speciální aplikace se používá materiálů ze supravodičů. Je to např. Pb s teplotou t_0=7,2 K, Sn s teplotou t_0=3,7 K, nitrid niobu s teplotou t_0=14 K, kdy dochází k velké a rychlé změně odporu. Tyto senzory mají malý šum a malou časovou konstantou. Teplotní součinitel je velký.

Odporové senzory - Tenzometry I

Tenzometry

- Tenzometrické senzory reagují na vnější podněty od mechanického napětí, tlaku změnou svého odporu v důsledku vlastní deformace.
- Závislost elektrického odporu na deformaci objevil Wheatstone v r. 1843 a rozpracoval Kelvin kolem roku 1856. K využití tohoto jevu ovšem dochází později až v letech 1920 až 1945.

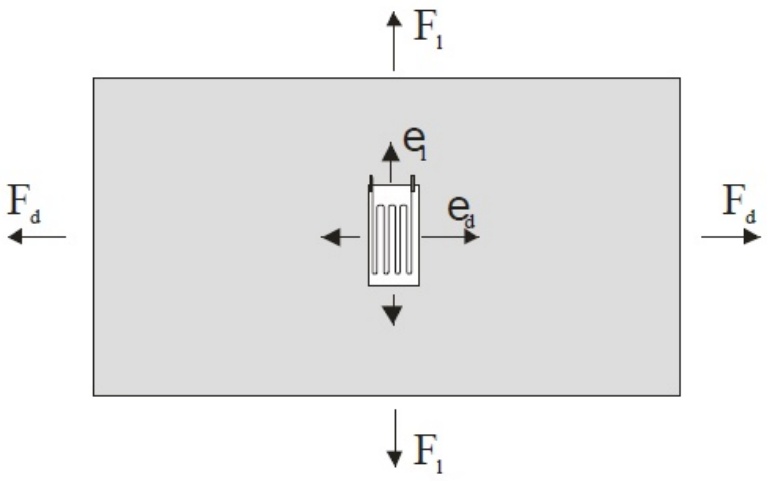


Odporové senzory - Tenzometry II

- Pro elektrický odpor R válcového vodiče platí $R = \rho \frac{l}{S}$.
- Působí-li na vodič tvaru válce vnější prostorový mechanický tlak p nebo osová síla F platí pro změnu průměru d vztah:
- $\frac{\Delta S}{S} = 2\frac{\Delta d}{d}$
- Po dosazení hodnot je změna odporu při uvažování jen podélné prodloužení pak:
- $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}(1 + \beta_p + 2\mu_p) = K\frac{\Delta l}{l}$,
- kde K je součinitel deformační citlivosti vodiče, β_p je součinitel úměrnosti měrného odporu na relativní změně délky, μ_p součinitel příčného stlačení (Poissonovo číslo).
- Na součinitel deformační citlivosti K pro kovy mají největší vliv změny rozměrů a měrný odpor se neuplatní. Pro polovodiče se uplatňují i změny součinitele β_p. Silný parazitní vliv má dále i změna teploty.

Odporové senzory - Tenzometry III

- Tenzory jsou v praxi používány jako senzory pro prostorové tlaky, např. až > 1000 MPa nebo pro zjišťování podélného prodloužení vlivem mechanického napětí. Využívá se zde princip délkového prodloužení nebo zkrácení.
- Výše uvedené odvození uvažuje s délkovými i s příčnými změnami. Proto jsou tenzometry vyráběny tak, že mají malou citlivost na příčné změny rozměrů.

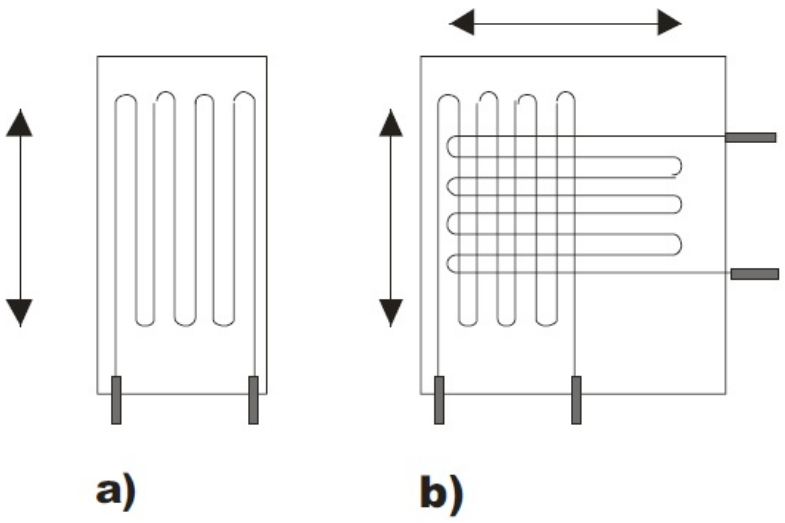


Odporové senzory - Tenzometry IV

- Síla podélná F_1 vyvolává délkové prodloužení senzoru ϵ_1 a síla příčná F_d způsobuje příčnou změnu rozměrů tenzometru ϵ_d.
- Pro každý délkový element tenzometru můžeme psát pro změnu odporu rovnici:
- $\frac{\Delta R}{R} = k_1\epsilon_1 + k_d\epsilon_d$,
- kde je k_1 součinitel délkové citlivosti, ϵ_1 délkové prodloužení $(=\frac{\Delta l}{l})$, k_d součinitel příčné citlivosti, ϵ_d příčné prodloužení $(=\frac{\Delta d}{d})$.
- Po zavedení koeficientu příčné citlivosti $K_t = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_l}$ a dále označíme $\epsilon_d = -\mu_p \cdot \epsilon_l$ platí:
- $\frac{\Delta R}{R} = k_l(\epsilon_l - K_t \cdot \mu_p \cdot \epsilon_l) = K \cdot \epsilon_l$,
- kde je K součinitel deformační citlivosti tenzometru.

Odporové senzory - Tenzometry V

- Běžné použití nachází tenzometry vyrobené pro namáhání v jednom směru. Jsou to tenzometry kovové drátové nebo foliové nebo tenzometry polovodičové páskové nebo membránové.

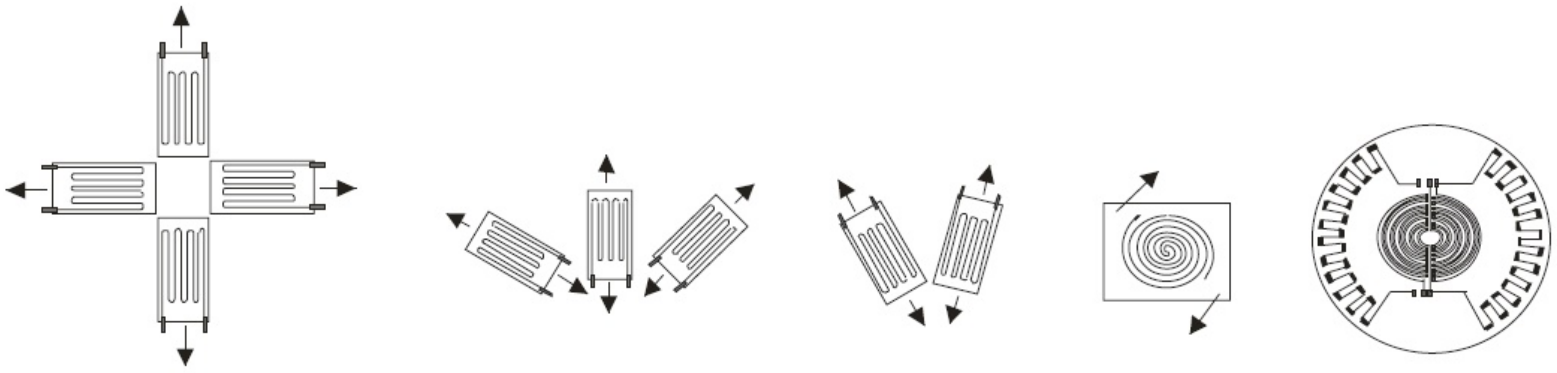


Odporové senzory - Tenzometry VI

- Kovové drátové tenzometry jsou navinuté na podložce pro nalepení.Podložka je plochá keramická nebo jako tkanina nebo papír. Drátové vinutí je vytvořeno pro jednoosé zatížení (pozice a) nebo dvouosé zatížení (pozice b).
- Tenzometry používají jako materiál kovy a polovodiče. Jako kovový materiál se používá např. platina (K=6), nebo slitiny kovů (chromel K=2,5). Základní odpor kovových tenzometrů je 50 až 2500 Ω. Drát je kruhový (průměr 5-25 μm) nebo plochý (foliový tenzometr o tloušťce 1-10 μm).
- Pro praktické aplikace ve strojírenství nebo v automatizaci jsou vyráběna i jiná provedení: Jedná se o provedení citlivé na mechanické napětí vyvolané v rovině ve dvou kolmých osách (pozice a) nebo šikmo ve tří osách (b) nebo dvou šikných směrech (c) nebo jako spirála (d). Růžicové provedení tenzometru (pozice e) obsahuje 4 sdružené tenzometry. Je

Odporové senzory - Tenzometry VII

vyráběn pro snímače s membránovým deformačním členem. Na jednotlivé tenzometry je zapojeno prodloužení od radiálního (od středu) a tangenciální (tečného) napětí při jejím zatížení od tlaku.



a) b) c) d) e)

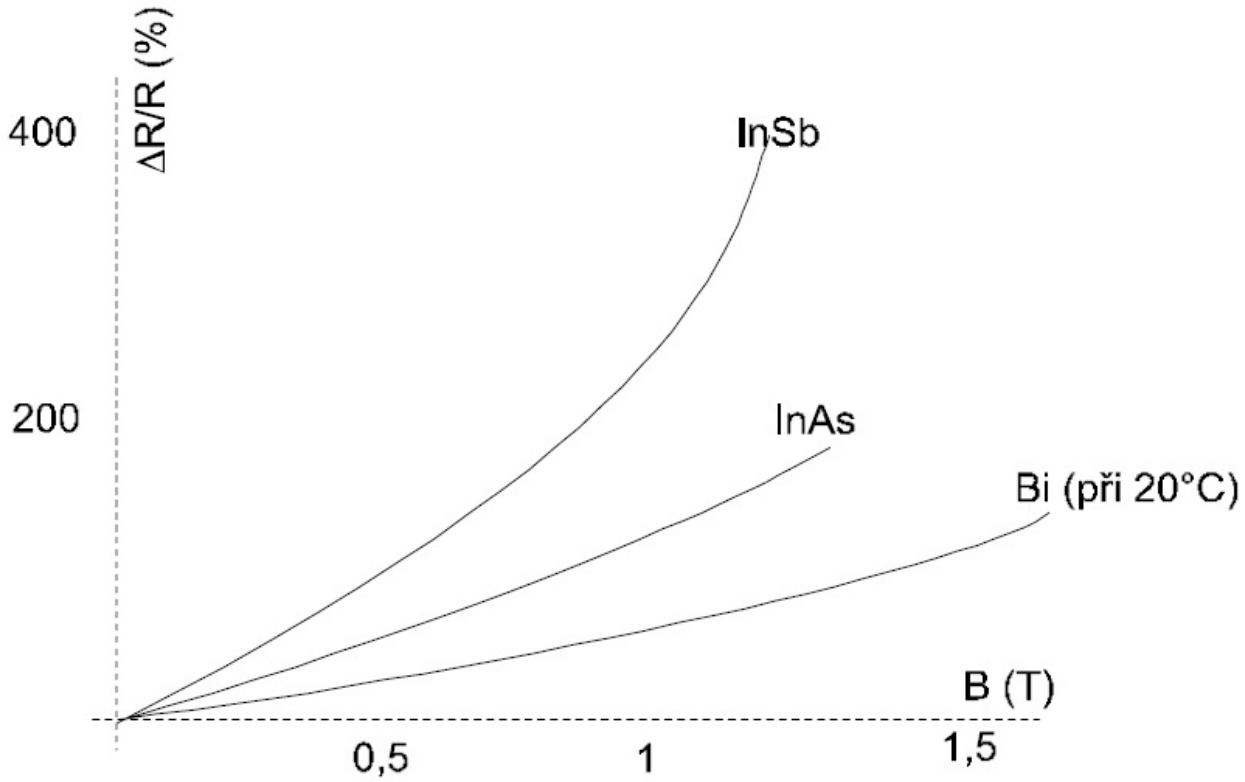
Magnetorezistory I

Magnetorezistory

- Magnetické pole působí na elektrony materiálu, které mají vektor rychlosti orientovaný kolmo na směr magnetického pole. Vysvětlení vychází z faktu, že **tato složka** rychlosti pohybu elektronů způsobuje tato složka. **Druhá kolmá složka** způsobuje změny Druhá kolmá složka.
- Magnetorezistivní jev se projevuje omezeně u kovů, ovšem výrazně u polovodičových materiálů. Je to germanium, křemík, indiumantimonid, indiumarsenid jako monokrystaly a speciální chemické sloučeniny jako polykrystaly. Je závislý na krystalické orientaci materiálu.
- Poměrná změna elektrického odporu R u těchto senzorů je dána vztahem:

Magnetorezistory II

- $\frac{\Delta R}{R} = k_m \cdot \mu^2 \cdot H^2$,
- kde je k_m konstanta senzoru závislá na materiálu a velikosti, μ pohyblivost nosiče náboje proudu, H intenzita magnetického pole.



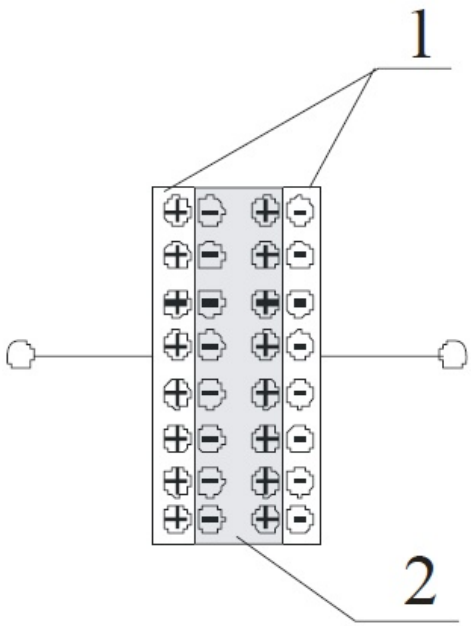
Magnetorezistory III

- Závislost změny elektrického odporu senzoru na magnetické indukci je nelineární.
- Je nutno počítat i s velkou závislostí změn odporu na teplotě.
- Použití odporových senzorů je u snímačů magnetických veličin, případně u snímačů polohy, posuvu, polohy s tím, že se mění magnetické pole nebo jeho intenzita. Tento princip se také využívá u konstrukce odporového potenciometru bez sběrače. Takový potenciometr se vyznačuje velkou životností, malým šumem, malým momentem.

Kapacitní senzory - Úvod I

- Kapacitní senzor je tvořen dvěma nebo více elektrodami, kde se mění kapacita senzoru pod vlivem působení vnějšího podnětu.
- Kapacita je definována mezi dielektrikem a elektricky vodivými deskami kondenzátoru v elektrickém poli, kdy mezi deskami vzniká elektrický potenciál.
- Kapacita je podle teorie elektrického pole poměr velikosti opačných volných nábojů na elektrodách k elektrickému potenciálu vytvořenému těmito náboji. Platí proto vztah:
- $C = \frac{Q_0}{U_1 - U_2}$,
- kde jsou Q_0 volné náboje, U_1, U_2, elektrický potenciál elektrody 1 a 2.

Kapacitní senzory - Úvod II



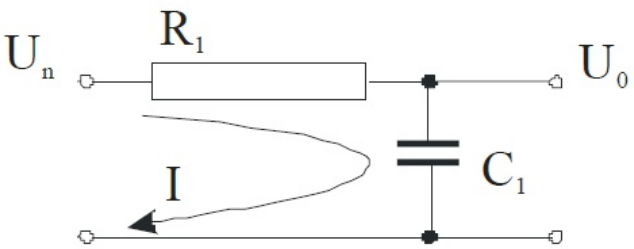
- Praktickou realizací kapacity jsou kondenzátory. Jsou to soustavy vodičů, kde se dá udržet náboj s velkou hustotou a značně ho kondenzovat. Výše uvedený lze upravit pro kulový, rovinný a válcový typ kondenzátoru:
- $C = \frac{4\ cdot\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1}$,

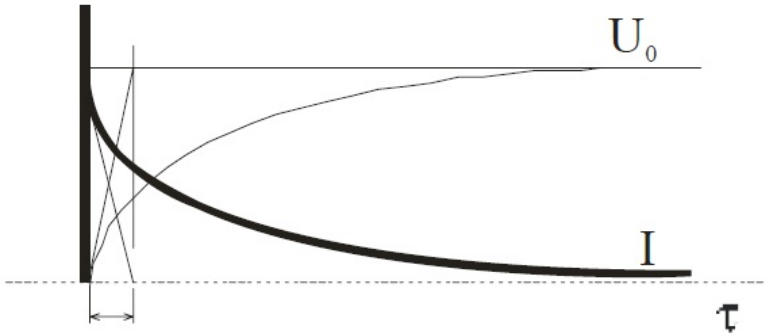
Kapacitní senzory - Úvod III

- kde je R_1 průměr vnitřní kulové plochy, R_2 průměr vnější kulové plochy. Kapacita je určena pouze permitivitou dielektrika a rozměry kondezátoru.
- Ideální rovinný (deskový) kondenzátor má kapacitu danou vztahem:
- $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot G$,
- kde je ϵ_0 permitivita vákua, ϵ_r permitivita relativní, S plocha elektrod, d vzdálenost, G geometrická vodivost (která je uváděna v tabulkách).
- Ideální válcový kondenzátor má kapacitu:
- $C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\frac{R_2}{R_1}}$,
- kde je l výška válcové plochy, R_1 průměr vnitřní válcové plochy, R_2 průměr vnější válcové plochy.

Kapacitní senzory - Úvod IV

- Chování kondenzátoru v elektrickém obvodu je vhodné vysvětlit především z dynamického pohledu. Kapacita má různé projevy pro stejnosměrný a střídavý elektrický obvod na rozdíl od elektrického odporu. Ten se chová stejně při zapojení pro stejnosměrný i pro střídavý proud.
- Při zapojení kondenzátoru s odporem v zapojení tzv. čtyřpólu ve stejnosměrném obvodu jsou možné dvě varianty. Podle varianty 1 je zapojena kapacita C_1 k nulovému potenciálu za odporem R_1 a sleduje se elektrický proud I a napětí U_0 na kondenzátoru.





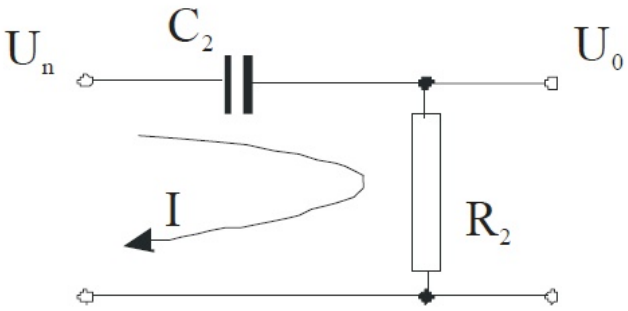
Kapacitní senzory - Úvod V

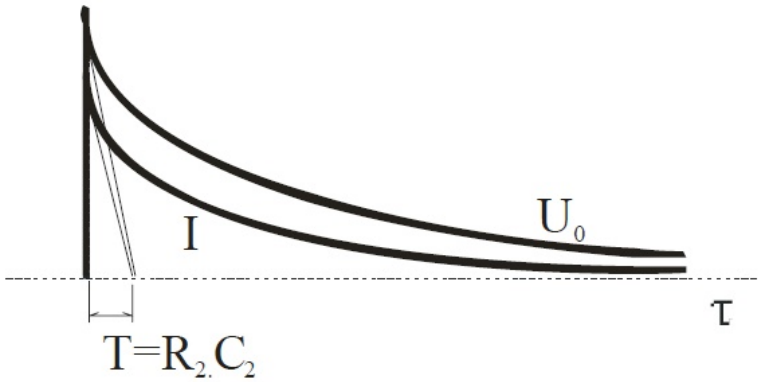
- Dynamická závislost výstupního průběhu proudu I a výstupního napětí U_0 na zapojení vstupního napětí U_n je dána vztahy:
- $u_n(t) = u_r(t) + u_c(t)$,
- $u_r(t) = R_1 \cdot i(t) =\rightarrow$ Laplaceova transformace $\rightarrow$
- $U_n = (R_1 + \frac{1}{s \cdot C_1}) \cdot I$.
- Obrazový přenos pro závislost výstupu $U_0 = U_c$ na vstupním napětí U_n má tvar:
- $\frac{U_c}{U_n} = (\frac{1}{1+s \cdot R_1 \cdot C_1})$.

Kapacitní senzory - Úvod VI

- Toto zapojení představuje statickou soustavu I.řádu a má integrační charakteristiku. Po ustálení přechodového děje dosahuje U_c hodnoty U_n . Tento přechodový děj znamená, že po zapnutí napětí na odpor a kondenzátor je průběh proudu přes kondenzátor od nekonečné hodnoty zmenšován na hodnotu nula, elektrické napětí ale postupně podle exponeciální závislosti narůstá až na hodnotu napájecího napětí s časovou konstantou τ.
- Varianta 2 je zapojení čtyřpólu, kde je zapojen sériově kondenzátor C_2 a odpor R_2. Výsledkem přechodového děje pro proud I a výstupní napětí $U_R = U_0$ na skokovou změnu U_n. Obrazový přenos výstupu U_R na vstupním napětí U_n má tvar:
- $\frac{U_R}{U_n} = (\frac{s \cdot R_2 \cdot C_2}{1 + s \cdot R_2 \cdot C_2})$

Kapacitní senzory - Úvod VII





- Obrazové přenosy pro průběh proudu i napětí na odporu na výstupním napětí podle tohoto zapojení mají derivační charakter se zpoždění 1. řádu. Po ustálení je proud i napětí na výstupu rovno nule.

Kapacitní senzory - Aplikace I

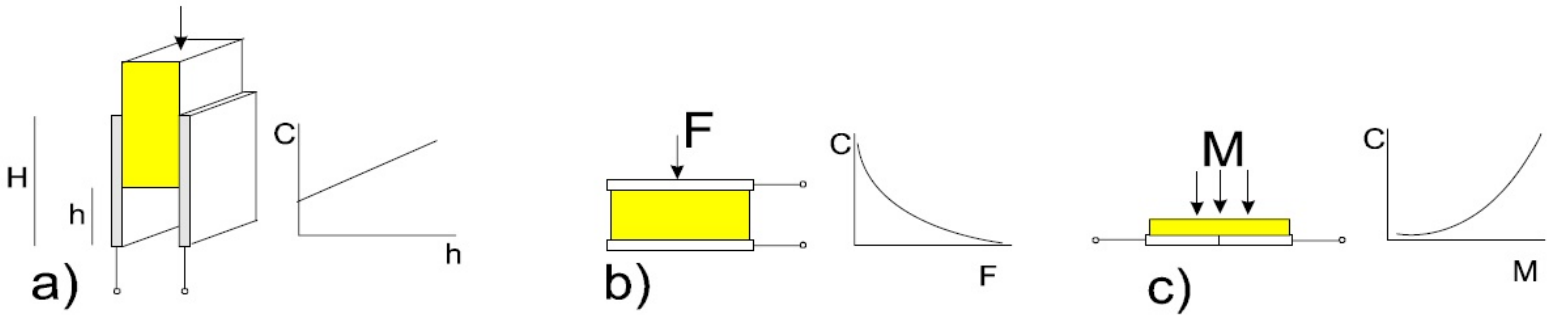
Aplikace kapacitních senzorů

- Vnější podmět může působit na kapacitní senzor tak, že změní jeho relativní permitivity, plochy elektrod a nebo vzdálenost elektrod.
- Charakteristika senzoru jako závislost výstupu – kapacitu ku vstupu vnějšího podnětu je zpravidla nelineární (změna tloušťky, plochy, ale může být i lineární (výška hladiny, vlhkost vzduchu).
- Využívá se základní vzorec pro změnu kapacity ΔC v diferenčním vyjádření:
- $C + \Delta C = \frac{\epsilon_0(\epsilon_r + \Delta\epsilon_r)}{(d+\Delta d)} \cdot (S + \Delta S)$,
- kde je $\Delta\epsilon_r$ změna relativní permitivita, Δd je změna vzdálenosti elektrod a ΔS je změna ploch elektrod.

Kapacitní senzory - Změna dielektrické konstanty I

Změna dielektrické konstanty kapacitních senzorů

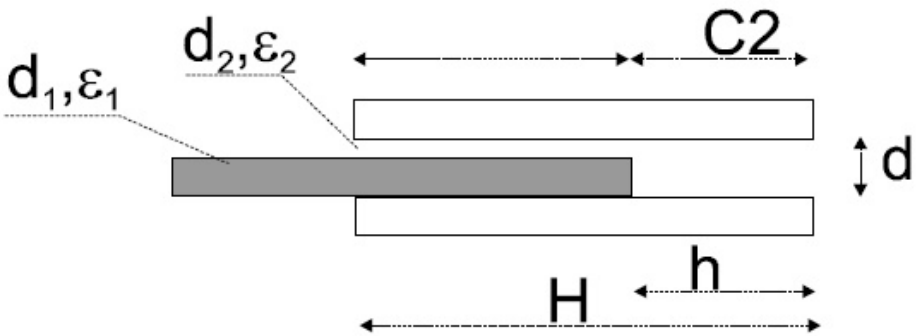
- Použití kapacitních senzorů je rozšířené při vnějších podnětech, které mění hodnotu permitivity prostředí mezi elektrodami senzoru. Změna permitivity je vyvolána např. při působení tlaku na dielektrikum nebo při působení vnější vlhkosti na dielektrikum.



Kapacitní senzory - Změna dielektrické konstanty II

- Pozice a) znázorňuje senzor, kde se mění permitivita změnou plochy mezi deskami kondenzátoru. Jeho kapacita je dána součtem kapacity pro plochu se zasunutým dielektrikem a pro plochu bez zasunutého dielektrika. Označíme–li C_1 kapacitu pro plochu se zasunutým dielektrikem s relativní permitivitou ϵ_1 a C_2 pro plochu bez zasunutého dielektrika s relativní permitivitou ϵ_2 lze psát:
- $C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{b(H-h)}{d}$,
- $C_2 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot \frac{b(h)}{d}$,
- kde je b šířka desek kondenzátoru, H výška desek kondenzátoru, h výška nezasunutí dielektrika, d vzdálenost elektrod, ϵ_0 permitivita vákua, ϵ_1 relativní permitivita posuvného dielektrika, ϵ_2 relativní permitivita prostředí bez dielektrika.

Kapacitní senzory - Změna dielektrické konstanty III

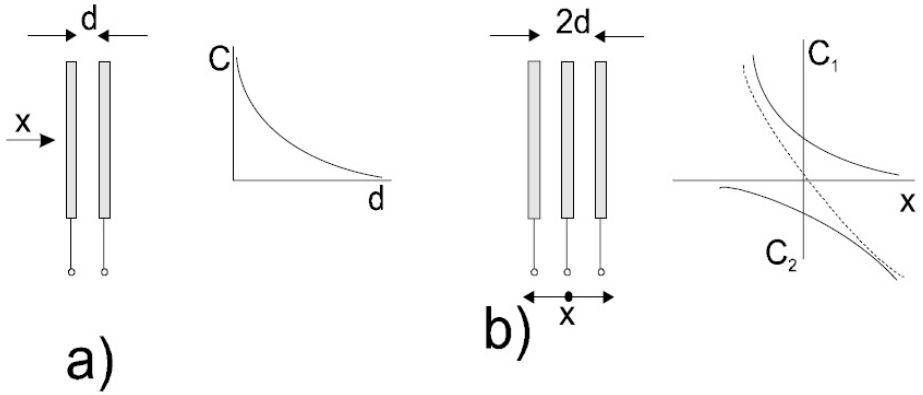


- V případě, že posuvné dielektrikum nevyplňuje plně prostor mezi elektrodami, je nutno výše uvedený vzorec vzorec upravit:
- $C_1 = \epsilon_0 \cdot b(H-h)\frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1}\frac{d_2}{\epsilon_2}}$
- Kondenzátor na pozici b) má změny permitivity dielektrika způsobené tlakem od síly F na jednu desku kondenzátoru. V tomto případě je dielektrikum v celé ploše kondenzátoru a mění se tloušťka dielektrika. Platí obdobné vzorce s tím, že $h = 0$.

Kapacitní senzory - Změna rozměrů elektrod I

Změna rozměrů elektrod kapacitních senzorů

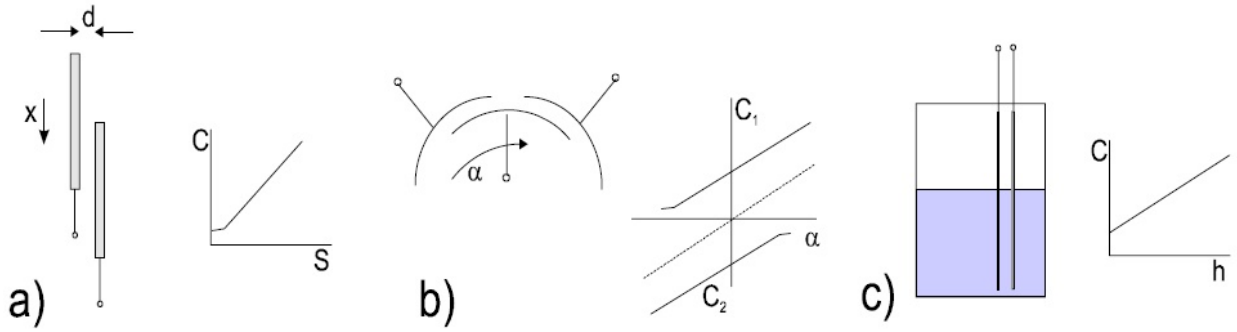
- Změna rozměrů elektrod, tj. jejich vzdálenosti nebo plochy, je další druh působení vnějších podnětů na kapacitní senzor.
- Platí vzorec:
- $C + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot S}{d + \Delta d}$.



Kapacitní senzory - Změna rozměrů elektrod II

- Přibližování nebo vzdalování elektrod u kapacitního senzoru zobrazuje schéma pozice a). Charakteristika této změny je velmi nelineární a posuv vzhledem k nelinearitě je možný do 1 mm. Lze odvodit, že pro relativní změnu kapacity od změny vzdálenosti Δd u dvouelektrodového senzoru platí:
- $\frac{C}{C_m = \frac{1}{1-\frac{\Delta d}{d}}}$,
- kde je C_m kapacita pro vzdálenost d, C kapacita pro vzdálenost $(d - \Delta d)$.
- Zlepšení nelinearity zajistí diferenciální uspořádání, např. tzv. tříelektrodový kondenzátor podle pozice b). Změna vzdálenosti se provádí střední elektrodou, kdy jedna mezera se zvětšuje a druhá zmenšuje. Výsledná kapacita je dána rozdílem kapacit dvou kondezátorů a výsledkem je vztah:
- $\frac{C}{C_m = \frac{1}{1-(\frac{\Delta d}{d})^2}}$.

Kapacitní senzory - Změna rozměrů elektrod III

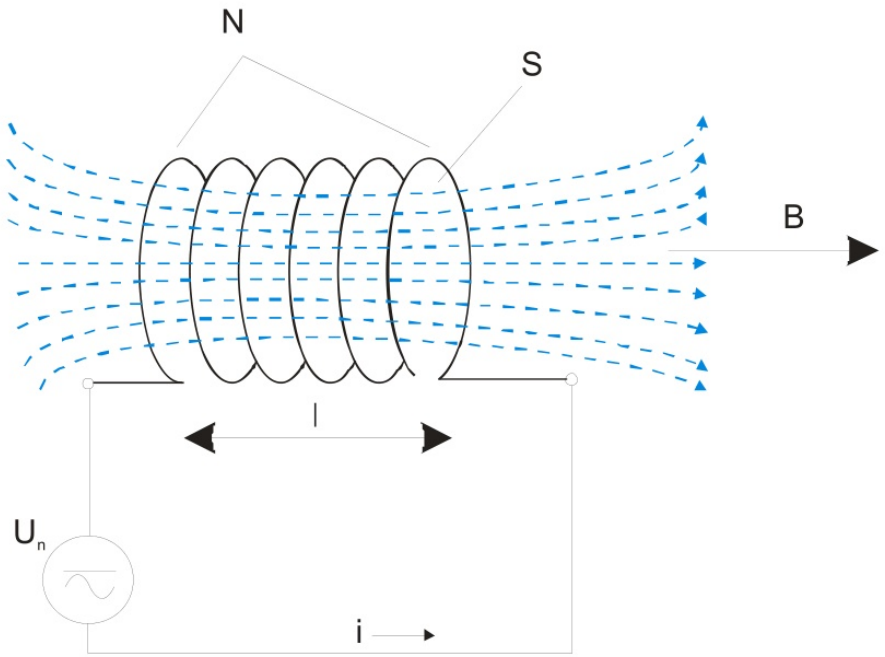


- Na výše uvedeném obrázku jsou senzory, kde se mění plocha elektrod kondenzátoru od vnějšího podnětu. Schéma pozice a) ukazuje senzor pro změnu polohy nebo vzdálenosti, schéma b) je senzor pro změny úhlu natočení a schéma c) je senzor pro měření výšky hladiny. Využívá se základní vzorec:
- $C + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_R}{d} \cdot (S + \Delta S)$.

Indukční senzory - Úvod I

- Vnější podnět u těchto senzorů je převeden na změny elektrické indukčnosti.
- Indukčnost (často nazývaná jako induktivita) je vlastnost cívky na rozdíl od indukce (indukční senzory), kde je aktivní generování elektrického napětí vlivem změn magnetického toku.
- Indukčnost a cívka mají blízko k magnetickému poli cívky.
- Pro indukčnost L válcové cívky bez jádra platí vztah:
- $L = \mu_0 \mu_R N^2 \frac{S}{l}$,
- kde je μ_0 permeabilita vakua, μ_r relativní permeabilita jádra, N počet závitů, S je plocha cívky, l délka cívky. Indukčnost cívky je závislá jen na permeabilitě prostředí jádra cívky, na počtu závitů, ploše závitů cívky a délce cívky.

Indukční senzory - Úvod II



- Po zapojení cívky do obvodu elektrické proudu vznikne uvnitř a kolem cívky elektromagnetické pole, které je charakterizováno vektorem magnetické indukce B (nazývaná také hustota magnetického pole). Jednotkou je Tesla.

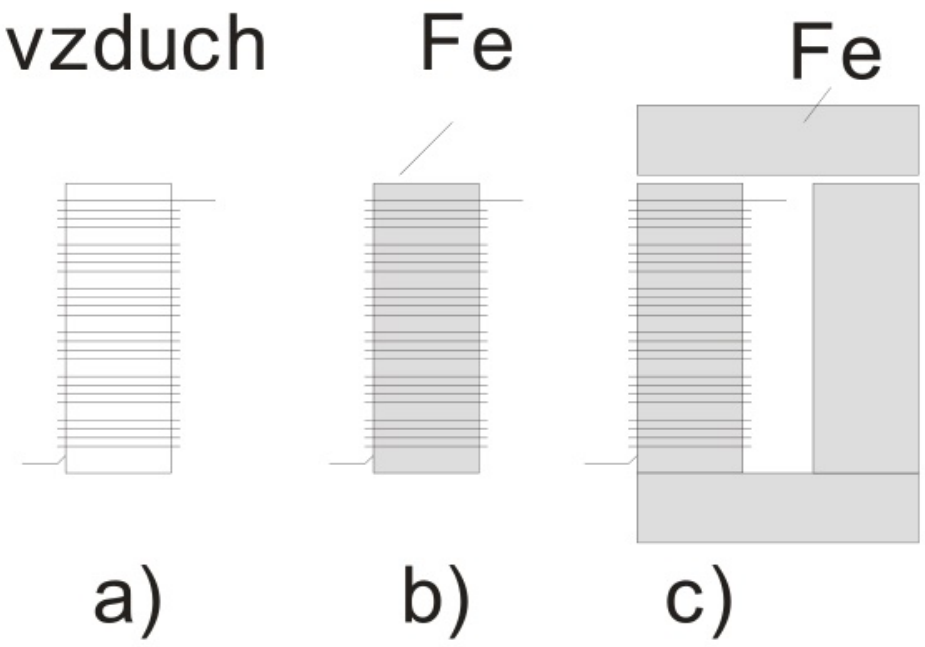
Indukční senzory - Úvod III

- Dalším vektorem charakterizující elektromagnetické pole je vektor intenzity magnetického pole H. Vztahy mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetické pole lze uvést ve tvaru:
- $B = \mu_R \times B_0 = \mu_0 \mu_R \times H = \mu_0 \mu_R \frac{N \times I}{l}$,
- $B = \mu \frac{N \times I}{l} \frac{\Phi}{S_m}$,
- kde je B_0 magnetická indukce ve vakuu (T), μ permeabilita celková, μ_0 permeabilita vakua (je rovna $\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6}$ H, μ_r permeabilita relativní, H intenzita magnetického pole (A/m), S_m plocha magnetického toku (m^2), Φ magnetický tok (Weber, Wb).
- Magnetické chování látky se také vyjadřuje magnetickou susceptibilitou, platí vztah:
- $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \kappa_m$,

Indukční senzory - Úvod IV

- kde je κ_m magnetická susceptibilita. Podle hodnoty magnetické susceptibility dělíme látky na feromagnetické ($\kappa_m > 1$, např. Fe až 5800, Ni až 1120), paramagnetické ($1 > \kappa_m > 0$) a diamagnetické ($\kappa_m < 1$).
- Podle materiálu a provedení cívky a jejího jádra jsou definované cívky: *vzduchová* (magnetické siločáry vznikají v jádru a jsou uzavírány přes vzduch, magnetickému toku je kladen velký odpor), *s jádrem s otevřeným magnetickým polem* (je uzavírán přes vzduch, zde se klade toku velký odpor) a *jádrem s uzavřeným magnetickým obvodem* (magnetické siločáry jsou uzavírány v jádru, magnetickému toku není kladen odpor, je-li jádro feromagnetický materiál). závitů, ploše závitů cívky a délce cívky.

Indukční senzory - Úvod V



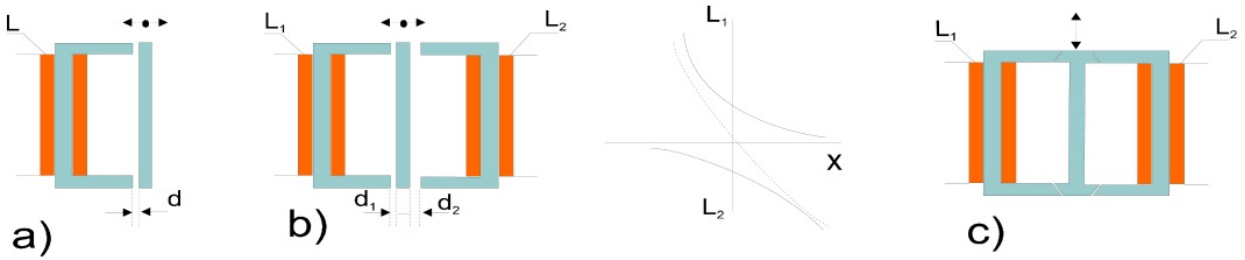
- Obdobně jako u kapacitního senzoru, indukční senzor se chová jinak v obvodu DC proudu a v obvodu AC proudu.

Indukční senzory - Úvod VI

- Při zapojení cívky s odporem v zapojení tzv. čtyřpólu ve stejnosměrném obvodu se cívka chová opačně jak kondenzátor. Při zapnutí proudu klade cívka velký odpor, který se zmenšuje s časem. Proto proud v okamžiku zapnutí je malý a postupně s časem se zvětšuje.
- Napětí naopak na cívce se naměří při zapnutí veliké a postupně se zmenšuje.
- Další rozdíl je v tom, že cívka je tvořena závity nejčastěji z kovu (měď) a proto po odeznění přechodového děje proud musí překonávat odpor daný délkou vodiče, který vytváří cívku.
- Senzory s indukčnostními principy využívají nejčastěji změny indukčnosti přes změny magnetického toku, některé i přes změny permeability.

Indukční senzory - s malou vzduchovou mezerou I

- Senzor s malou vzduchovou mezerou je velmi rozšířen pro měření geometrických rozměrů, polohy, posuvu a dalších veličin.
- Vnější podmět působí na senzor změnou velikosti vzduchové mezery a změnou plochy vzduchové mezery.



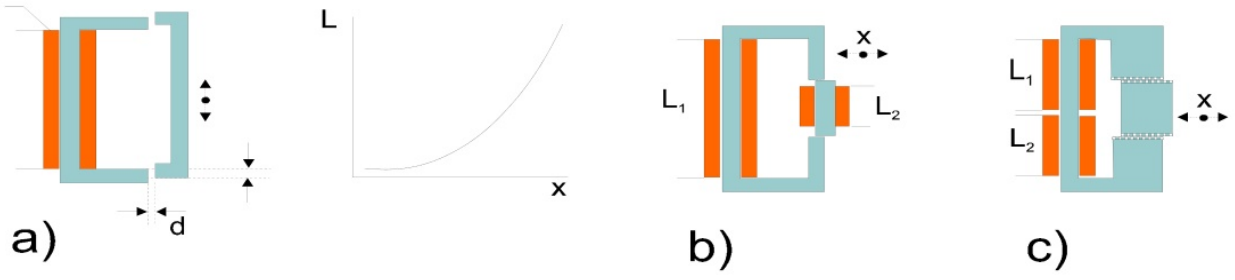
- Magnetický obvod senzoru je vytvořen jádrem z feromagnetického materiálu. Jádro může být jednoduché složené z částí ve tvaru **UI** (pozice a) nebo diferenciální ve tvaru **UIU** (pozice b).

Indukční senzory - s malou vzduchovou mezerou II

- Mezi částí **U** a **I** se vytváří vzduchová mezera o velikosti d.
- Pro magnetický obvod platí všechny výše uvedené vztahy. Protože magnetický tok přechází přes vzduchovou mezeru, vytváří se výrazný povrchový jev a jeho rozptyl při toku přes vzduchovou mezeru. Proto se musí používat korekční křivky pro výpočty magnetického odporu.
- Pro návrh cívky u senzoru s malou vzduchovou mezerou podle dané indukčnosti používáme také vztah:
- $L = \frac{\mu \cdot S}{l} n^2 = \frac{\mu_0 \mu_R}{1+(\frac{d}{l}) \cdot \mu_f} \cdot \frac{S \cdot n^2}{l}$,
- kde je μ permeabilita obvodu vytvořená permeabilitou vakua μ_0 a jádra μ_f , S plocha jádra, l délka jádra, d vzduchová mezera, n počet závitů.
- Změny indukčnosti podle změny vzduchové mezery lze určit derivací z výše uvedeného vztahu. Citlivost na změny vzduchové mezery je veliká a pohybuje se již od 3 µm.

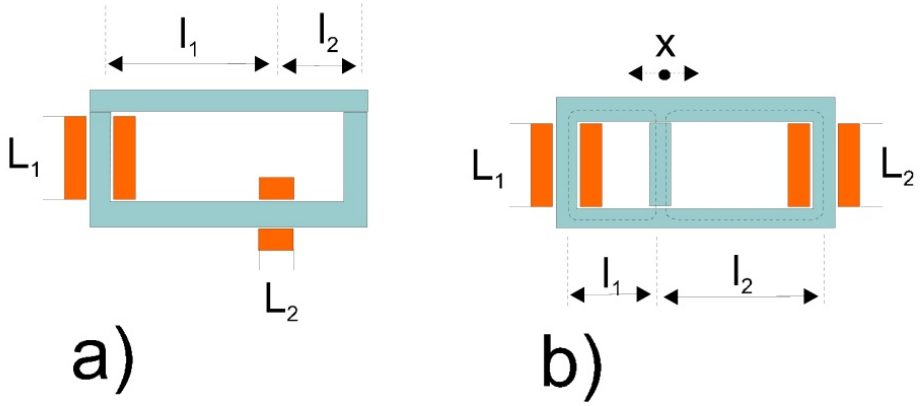
Indukční senzory - s malou vzduchovou mezerou III

- Problém nelinearity jednoduchého magnetického obvodu u senzoru s malou vzduchovou mezerou se částečně zlepší diferenciální zapojení tím, že na jedné straně se zvětšuje a na druhé se mezera zmenšuje (viz pozice b)
- Jádro senzoru může být provedeno také tak, že lze měnit plochu vzduchové mezery. Provedení a) ukazuje jednoduchý senzor, provedení b) zobrazuje senzor diferenciální transformátorový a provedení c) je určeno pro malé posuvy s tím, že používá zubové vícenásobné změny plochy vzduchové mezery.



Indukční senzory - s malou vzduchovou mezerou IV

- Základní charakteristika jednoduchého senzoru se změnou plochy vzduchové mezery je odlišná od charakteristiky senzoru s proměnou délkou mezery. Řešení magnetického obvodu, vliv deformace magnetického toku a vliv povrchového jevu je obdoba jako u výše uvedeného typu.
- Často se vyskytuje i kombinace změny plochy a délky mezery.



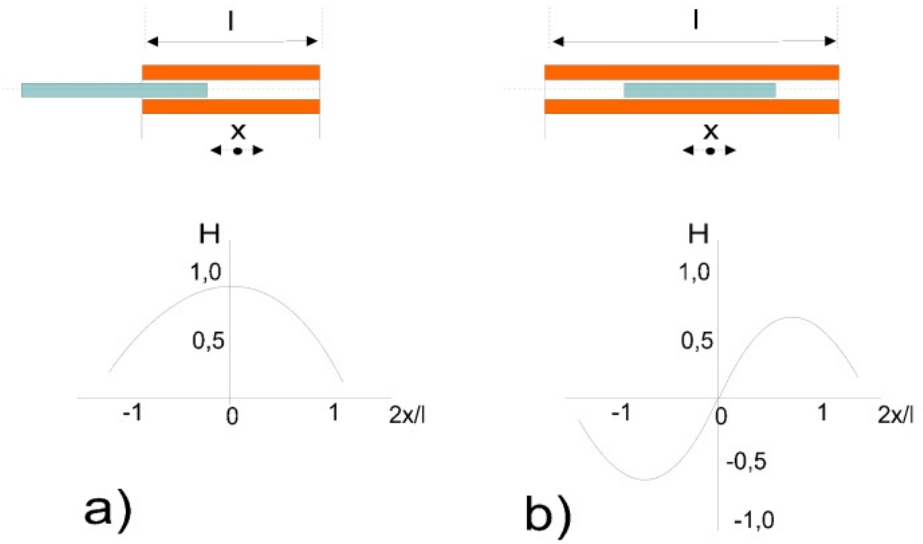
Indukční senzory - s malou vzduchovou mezerou V

- Pro velké posuvy např. nad 100 mm nelze použít změny délky nebo plochy vzduchové mezery. Používá se řešení se senzorem se vzduchovou mezerou a pohyblivou cívkou (provedení a) nebo s pohyblivou částí jádra (provedení b).
- Je-li posuvná cívka nebo posuvná část jádra uprostřed, tj. $l_1 = l_2$, je magnetický tok symetrický a ruší se. Na cívce L_2 je indukované napětí rovno nule. Při vysunutí ze středu vzniká nesymetrie a na cívce L_2 je indukované napětí úměrné nesymetrii, tj. posunutí. Charakteristika těchto senzorů je téměř *lineární*.

Indukční senzory - s otevřeným magnetickým polem I

- Senzor s otevřeným magnetickým obvodem tvoří zpravidla válcová cívka a vnitřní posuvné jádro.
- Pozice a) zobrazuje jednoduchý senzor a jeho charakteristiku, kde pohyb jádra od středu do krajů v rozsahu 0 až $\frac{l}{2}$ mění intenzitu magnetické pole a tím indukčnost cívky.
- Diferenční uspořádání je na pozici b), Charakteristika má tvar sinusové funkce. Intenzita magnetického pole je ale poloviční.
- Intenzita magnetického pole H pro jednoduchý senzor se mění podle polohy jádra a to od minima (vysunuté jádro na okraji) do maxima (jádro uprostřed cívky). Intenzita magnetického pole H má vztah:
- $H = \frac{I \cdot n}{2 \cdot l} = \left[\frac{l+2x}{4r^2+(l+2x)^2} + \frac{l-2x}{4r^2+(l+2x)^2} \right]$,
- kde je I proud cívky, n počet závitů, x poloha jádra v cívce, l délka cívky, r střední poloměr závitů cívky.

Indukční senzory - s otevřeným magnetickým polem II



- Diferenční zapojení cívky má dvě cívky a jádro se pohybuje od středu na obě strany. Průběh intenzity magnetického pole H se mění podle sinusovky od záporné hodnoty přes hodnotu 0 do kladného maxima a dále do nuly. Do hranaté závorky předchozí rovnice je nutné přidat vztah:
- $\frac{2x}{\sqrt{(r^2+x^2)}}$.

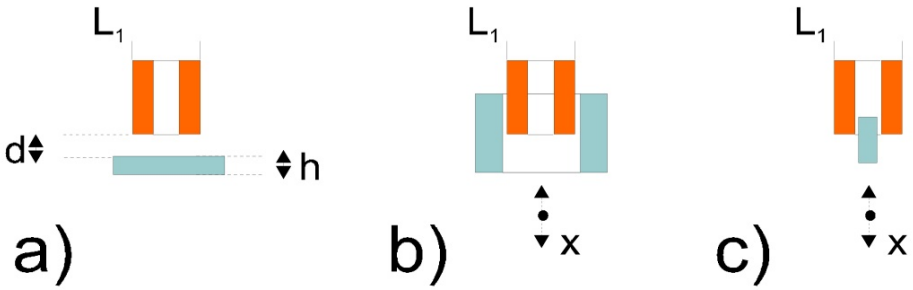
Indukční senzory - s otevřeným magnetickým polem III

- Pro jednovrstvou cívku s jádrem kratším než délka cívky při zanedbání nerovnoměrnosti rozložení pole uvnitř cívky je indukčnost cívky rovna:
- $L = \frac{n^2 \cdot r^2}{l^2}$,
- kde je l délka cívky, n počet závitů, r poloměr závitů cívky.
- Senzor s otevřeným magnetickým polem má tyto nevýhody: *menší citlivost*, je nutný *větší počet závitů* a velký vliv má *parazitní kapacita*. Velký je také vliv vnějších magnetických polí a proto je *nutné stínění*. Je vyžadováno přesné provedení cívek a projevuje se velká vzájemná indukčnost.
- Má ale současně výhody: Senzor je vhodný pro snímání velkých změn polohy a to až ± 300 mm. V praxi je častá kombinace tohoto typu senzorů s typy se vzduchovou mezerou.

Indukční senzory - s potlačeným magnetickým polem I

- Indukčnostní senzor s potlačeným magnetickým polem tvoří zpravidla válcová cívka bez jádra. Indukčnost cívky se mění podle přítomnosti elektricky vodivých předmětů v blízkosti.
- Mění–li se v blízkosti cívky velikost magneticky vodivého předmětu (např. jeho tloušťka h), jeho vzdálenost d od cívky, druh materiálu podle permeability, případně jeho elektrická vodivost, teplota, složení apod., mění se indukčnost cívky. Okolí může tvořit i elektricky vodivá kapalina.
- Ovlivňování se vysvětluje vznikem vířivých proudů v jeho vodivých nehomogenních vrstvách působením magnetických siločar. Tyto vířivé proudy vytváří vlastní ekvivalentní magnetické pole působící zpětně na původní pole a zmenšuje jeho intenzitu. Proto hovoříme o potlačení magnetického pole nebo o obvodu se vnesenou impedanci.

Indukční senzory - s potlačeným magnetickým polem II

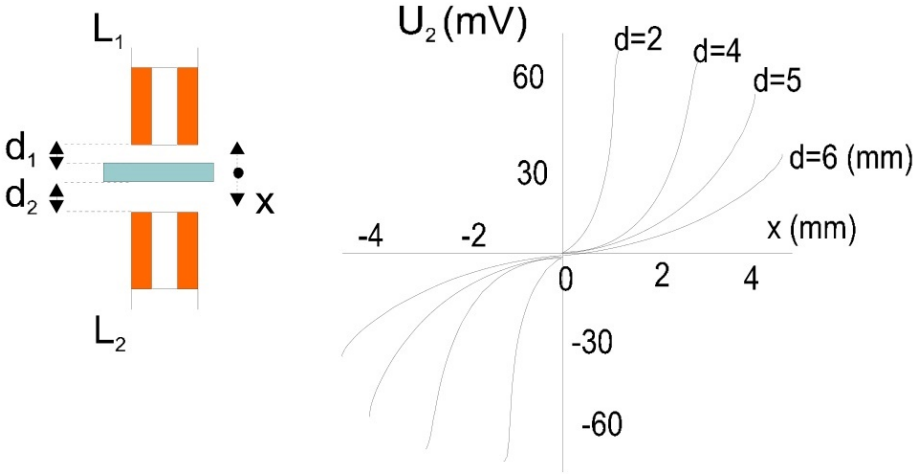


- Provedení a) má v okolí čelní plochu s elektricky vodivého materiálu o tloušťce h ve vzdálenosti d. U provedení b) má cívka z vnější strany prstenec a u provedení c) ovlivňuje indukčnost cívky materiál uvnitř cívky jako jádro např. z mědi.
- Odvození poměrů na senzoru je velmi obtížné. Je nutno si představit, že elektricky vodivý předmět je sekundární vinutí další cívky a jeho obvod je složen z ekvivalentního činného magnetického odporu R_e a magnetické reaktance X_e . Složky odporu jsou tvořeny součtem dílčích odporů nehomogenity podle vztahů:

Indukční senzory - s potlačeným magnetickým polem III

- $R_e = \sum_k \rho_k \frac{l_k}{S_k}$,
- $X_e == \sum_k \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{S_k}$,
- kde je l_k délka toku v materiálu, S_k plocha toku v materiálu , ρ_k měrný odpor materiálu, ω úhlový kmitočet, μ_k permeabilita materiálu.
- Z výše uvedených vztahů vyplývá, že impedance primární cívky je závislá na změnách rozměrů, měrného odporu a permeability vodivého materiálu okolí.
- Změny impedance cívky L 1 podle změn vzdálenosti předmětu jsou značně nelineární. U diferenciální provedení senzoru je charakteristika částečně lineární.

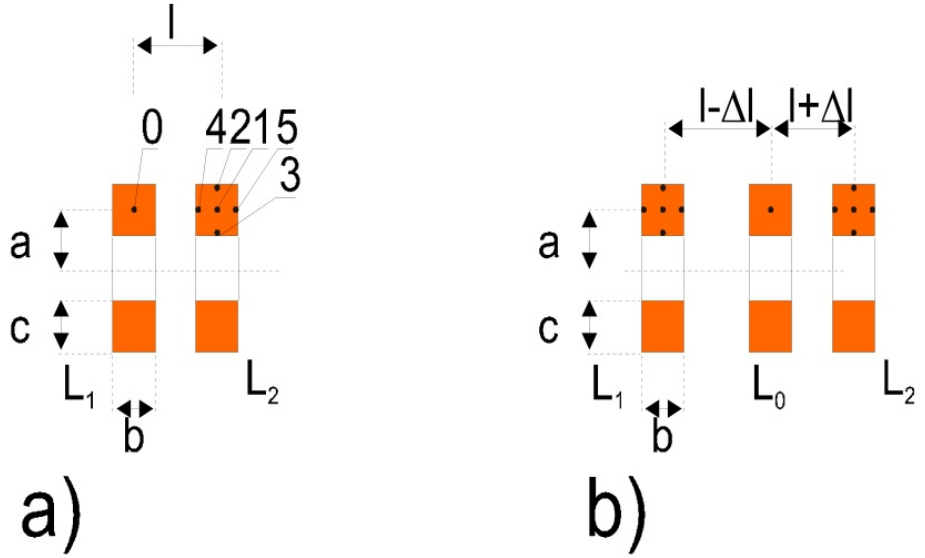
Indukční senzory - s potlačeným magnetickým polem IV



- Senzory se aplikují zpravidla pro limitní snímače polohy, při defektoskopii, při měření vzdálenosti nebo tloušťky vodivého materiálu na nevodivém, při měření průměru drátu, nerovnoměrnosti tloušťky stěn trubek nebo při detekci kovů. Zajímavé uplatnění nalézají také při měření vibrací, při sledování kvality apod.

Indukční senzory - bez feromagnetika I

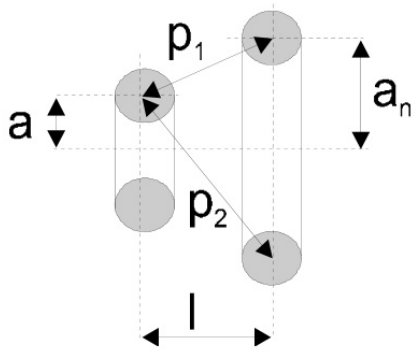
- Senzor tvoří zpravidla nejméně dvě nebo více válcových cívek s možností vzájemného přímočarého nebo úhlového posunutí. Jedná se vždy o diferenční zapojení. V magnetickém obvodu se nevyskytuje feromagnetický materiál, takže se neprojevují parazitní vlivy. Senzor lze přesně navrhnout pomocí výpočtů.

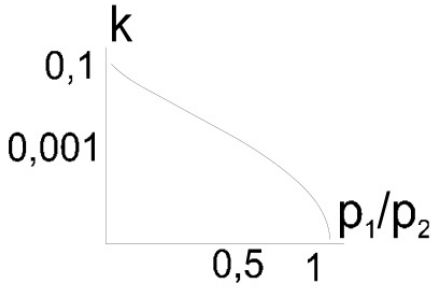


Indukční senzory - bez feromagnetika II

- Pro indukčnost ploché válcové cívky (s chybou ± 1 %) platí:
- $L = \frac{2.03 \cdot a^2 \cdot N^2}{6a+9b+10c}$,
- kde je n počet závitů, a střední poloměr cívky, b šířka cívky, c výška mezikruží cívky.
- Jsou-li v blízkosti dvě cívky, uplatňuje se vzájemná indukčnost podle vzorce:
- $M = \frac{n_1 \cdot n_2}{3}(M_{02} + M_{03} + M_{04} + M_{05} - M_{01})$,
- kde je n_1, n_2 počet závitů v cívkách, $+M_{0i}$ vzájemná indukčnost prstenců závitů 1, 2,..5.
- Výpočet dílčí vzájemné indukčnosti prstenců se vypočítá podle vztahu a schématu:
- $M = k\sqrt{(a_1 a_n)}$,
- kde je k součinitel daný rozměry a, hodnoty a_1, a_n jsou poloměry prstenců.

Indukční senzory - bez feromagnetika III





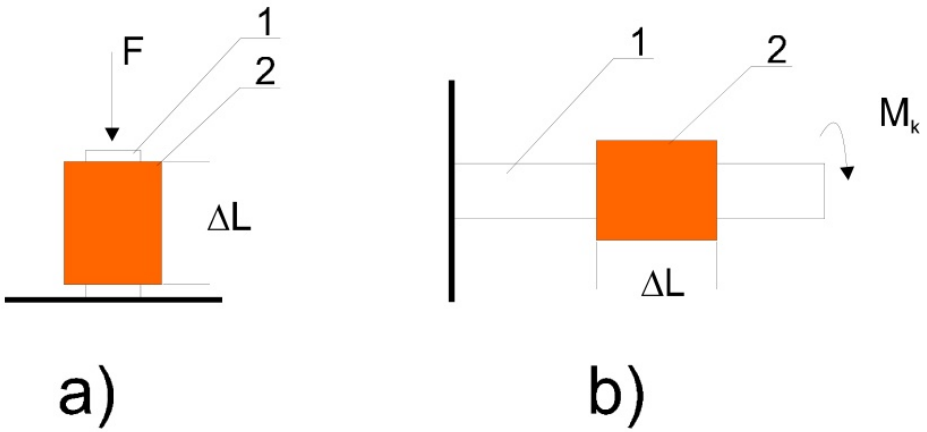
- Užití senzorů bez feromagnetika jsou aplikovány ve snímačích pro měření malých rozměrů nebo malých posunutí. Ploché cívky jsou výhodnější než široké. Používají se i pro měření při vysokých teplotách. Umožňují měření:
  - tlakových veličin
  - tahových sil
  - kroutícího momentu
  - zrychlení.
- V praxi se používá diferenční zapojení, kdy mezi dvěma plochými cívkami je měřicí cívka.

Indukční senzory - magnetoelastické I

- Vnějším jevem nebo podnětem je změna vlastností feromagnetika při jeho deformaci silou F.
- Charakteristika udává závislost magnetické indukce B při dané intenzitě magnetického pole H na síle F.
- Je zaveden termín činitel magnetostrikce, pro který platí:
- $\lambda_m = \lambda_{ms} \cdot \frac{B^2}{B_S^2}$,
- kde je λ_{ms}činitel magnetostrikce při nasycení, B, B_S magnetická indukce skutečná a při nasycení.
- Pro permeabilitu bez síly F platí:
- $\mu = \frac{B}{H}$,
- a se sílou F:
- $\mu + \Delta\mu = \frac{B_f}{H}$
- a následně platí vztah pro relativní změnu permeability:

Indukční senzory - magnetoelastické II

- $\epsilon_\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\cdot\lambda_{ms}}{B_S^2} = \mu \cdot \delta$,
- kde je δ mechanické napětí od síly F.
- Pro magnetoelastické senzory se používá materiál, který má velkou hodnotu magnetostrikce, velkou permeabilitu a malou indukci při nasycení. U materiálů se dále hodnotí konstanta:
- $k = \frac{\epsilon_\mu}{\epsilon_l}$ (má hodnotu kolem 200),
- kde je ϵ_m permeabilita, $\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ relativní změna délky při deformaci.

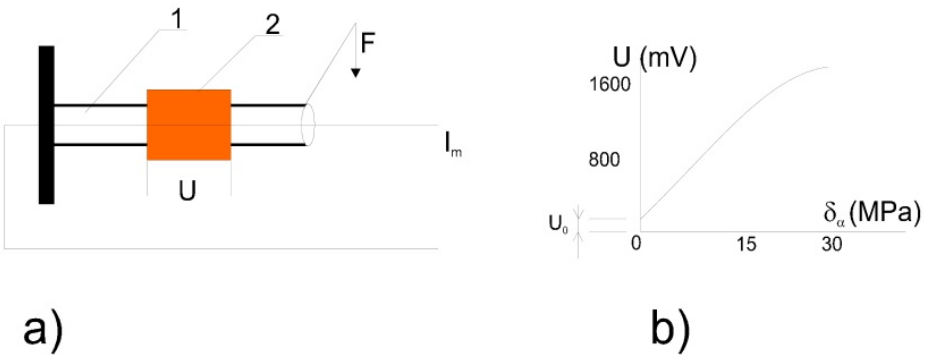


Indukční senzory - magnetoelastické III

- Změny permeability na zatížení se vyhodnocují jako změna indukčnosti cívky navinuté na jádru z magnetoelastického materiálu. Příklad snímání tlakové síly a) a kroutícího momentu b) pomocí magnetoelastických senzorů.
- Použití senzorů je především ve snímačích pro měření tlakových a tahových sil, kroutícího momentu, deformací atd. Nahrazují tenzometry v těžkém provozu.

Indukční senzory - s inverzí Wiedmannova jevu I

- Wiedmannův jev (r. 1884) se týká torzního deformování tyče nebo kruhové trubky z feromagnetického materiálu v důsledku současného působení podélným a kruhovým magnetickým polem.
- Podle Yamamota (1958) zde vzniká podélná i příčná magnetostrikce. Inverze tohoto jevu znamená, že vlivem vnějšího působení torzní síly a při podélné magnetizaci se mění parametry nebo rozložení magnetického pole v materiálu.



Indukční senzory - s inverzí Wiedmannova jevu II

- Feromagnetický materiál ve tvaru torzní tyče (1) je namáhán na krut a je buzen kruhovým magnetickým polem H_c přímo proudem do tyče nebo do podélné cívky v trubce v nasyceném stavu.
- Podle velikosti kroucení je natáčena magnetizace a vzniká magnetické pole H a natočené o úhel α proti intenzitě H_c.
- Natočené magnetické pole vytváří podélnou složku magnetického pole o intenzitě H_1, která je úměrná při konstantním H_c velikosti natočení tyče α a součiniteli magnetostrikce materiálu λ_m.
- Ve snímacím vinutí (2), které je navinuto kolmo na osu trubky, se indukuje elektrické napětí U podle velikosti podélné složky H_1. Platí:
- $U_2 = K \cdot \delta_a + U_0$,

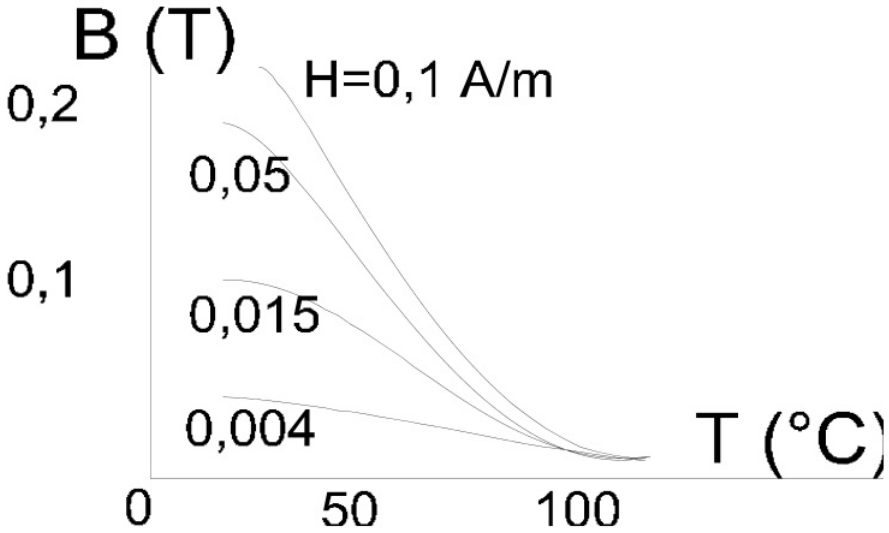
Indukční senzory - s inverzí Wiedmannova jevu III

- kde je K konstanta citlivosti senzoru, δ_a torzní napětí, U_0 napětí při klidové poloze.
- Jako materiál pro magnetoelastické senzory se používá ocel třídy 12013. Materiál má nastavenou magnetickou indukci 1.615 T při intenzitě 30 A/cm, počáteční permeabilitu 340 až 2830, činitel magnetostrikce kolem $2 \cdot 10^{-6}$ A/cm.
- Parazitní vlivy vznikají především od teploty. Důležité je najít vhodnou frekvenci napájecího napětí. Senzory se používají pro měření tlakové a tahové síly, kroutícího momentu i deformace.

Indukční senzory - teploty I

- Závislost magnetické indukce B feromagnetického materiálu na teplotě vykazuje inflexní bod, který udává tzv. Curieovu teplotu.
- Její hodnota je závislá na složení a na zpracování feromagnetika.
- Příklad závislosti magnetické indukce B na teplotě pro kovový feromagnetický materiál thermalloy. Materiály feritů vykazují velkou strmost charakteristiky. Roste-li teplota za Curieovu teplotu, stává se feromagnetický materiál paramagnetický.

Indukční senzory - teploty II



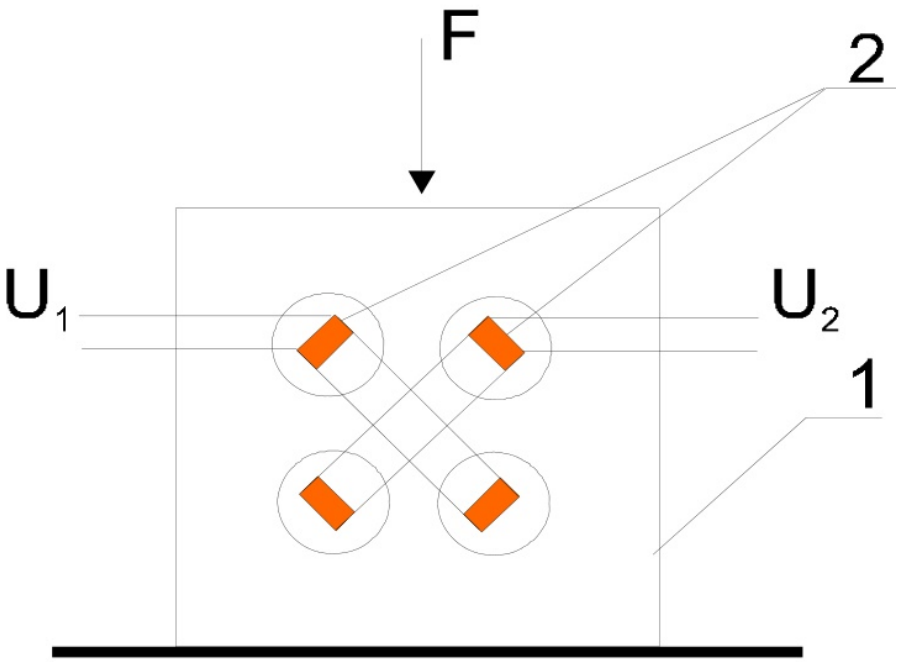
- Konstrukce senzoru používá cívky typu toroidu. Magnetický obvod je uzavřený a změny indukce se projeví jako změna indukčnosti cívky, který feromagnetický materiál nese.
- Magnetické senzory teploty se používají výjimečně. Důvodem jsou jejich nedostatky, jako např. malá časová stálost, velké rozměry.

Indukční senzory - magnetoanizotropní I

- Vnějším jevem nebo podnětem u magnetoanizotropních senzorů je změna rozložení magnetického toku ve feromagnetiku při jeho deformaci silou F. Feromagnetický materiál a dvě cívky vytváří měřicí senzor.
- V magnetickém tělese (1) z plného feromagnetického materiálu nebo z plechů jsou vytvořené otvory , kde jsou navinuty primární a sekundární cívky (2). Není-li senzor zatížen silou F, je dokonalá geometrická a magnetická symetrie a do sekundárního vinutí se indukuje minimální napětí.
- Jestliže prvek je zatížen silou, naruší se symetrie, změní se rozložení magnetického toku jeho natočením a zvětší se vazba mezi cívkami. Na výstupu dostáváme napětí:
- $U_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot f \cdot B \cdot S \cdot N_2 \cdot sin\alpha,$

Indukční senzory - magnetoanizotropní II

- kde je k_1 součinitel konstrukce magnetického obvodu, k_2 součinitel materiálu magnetického obvodu, f kmitočet, B magnetická indukce, S průřez plochy magnetického obvodu, N_2 počet sekundárních závitů, α úhel mezi vektorem intenzity magnetického pole a osou budící cívky.



Indukční senzory - magnetoanizotropní III

- Počet otvorů a provedení cívky volí konstruktér podle požadavků na rozsah a citlivost. Mohou být také 4 a více otvorů ve dvou nebo více řadách.
- Aplikace senzorů je u snímačů velkých tlakových a tahových sil, krouticího momentu i deformace. Senzory se uplatňují ve snímačích především pro těžký průmysl, ocelárny, hutě, cementárny apod. Jako materiál se používá permalloyová slitina (65 % Ni) nebo transformátorová ocel. Zatížení je v rozsahu od 100 kN do 200 000 kN s až 200 % přetížitelností. Stlačení je kolem 0,05 mm.