

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu

Senzor – je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Citlivá část senzoru se někdy označuje jako čidlo. Senzor snímá sledovanou fyzikální veličinu – nejčastěji analogový nebo číslicový elektrický signál.

Typy senzorů

- Dle měřené veličiny: senzory teploty, tlaku, mechanických a optických veličin, chemické a biologické senzory, aj.
- Dle fyzikálních principů: senzory odporové, kapacitní, magnetické, piezoelektrické, optické, chemické aj.
- Dle styku senzoru s měřeným prostředím: bezdotykové, dotykové
- Dle transformace signálu: aktivní, pasivní
- Dle použité technologie: elektromechanické, mechanické, pneumatické, elektrické, elektronické, elektrochemické, aj.
- Dle výstupu: analogový, číslicový, dvoustavový

Aktivní senzor je senzor, který se působením snímané veličiny chová jako zdroj energie (termoelektrický článek, fotodioda v aktivním režimu, indukční senzor)

Pasivní senzor potřebuje napájení.

Senzory polohy

Dělíme je do následujících kategorií:

- Dvoustavové senzory (polohové spínače)
 - Kontaktní: mikropsínače, taktilní spínače
 - Bezkontaktní: magnetické, optické, kapacitní
- Senzory s binárním výstupem
 - Optické
 - Magnetické
- Senzory se spojitým výstupem
 - Odporové
 - Indukčnostní
 - Kapacitní
 - Optické
 - Ultrazvukové

Magnetické senzory a spínače

Zdrojem magnetického pole pro magnetické spínače je zpravidla permanentní magnet (ferit či magnety NbFeB). Permanentní magnet může být připevněn na měřený objekt, ale

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu většinou je součástí magnetického senzoru. Změna magnetického pole je pak vyvolána změnami magnetického toku.

Jazyčkové kontakty

Dva kontakty zhotovené z plíšků z magneticky měkkého materiálu jsou spínány polem permanentního magnetu. Hodnoty magnetického pole pro sepnutí a rozepnutí kontaktů se liší a vzniklá hystereze přispívá k odolnosti proti náhodnému sepnutí. Oba jazyčky jsou pokryty vrstvou vzácných kovů (Au, Ag, Pt) a zataveny do skleněné trubičky naplněné inertním plynem pod nízkým tlakem. Bez působení magnetického pole jsou kontakty zpravidla rozpojeny.

Hallův senzor a spínač

Hallův spínač je nejrozšířenějším typem senzorů polohy. Jedná se o elektronický spínač ovládaný hallovým napětím $U_H = K_H B \cdot I$ generovaným na elektrodách při působení magnetického pole B na plodičovou destičku napájenou kolmo na elektrody proudem I . Zesilovač U_H a obvody tvoří spolu s halovým prvkem prvek o pleše asi $1,5 \text{ mm}^2$ jeden integrovaný obvod. Nejvíce se využívá levné technologie CMOS. Halovy spínače mají často jen 3 vývody (€napájení, zem, výstup), přestože samotný Hallův senzor musí mít 4 vývody. Hallův senzor s analogovým výstupem obsahuje spínaný proudový zdroj pro napájení Hallový destičky, teplotní korekce, A/D převodník a DSP procesor. V základní režimu pracuje s kalibračními konstantami v EEPROM paměti a analogový výstup vytváří D/A převodníkem. Do číslicového režimu se přepne zvýšením napájecího napětí. Pak lze s obvodem v servisním módu obousměrně komunikovat a data v EEPROM paměti měnit. Obvod se vyrábí s dvoustavovým výstupem.

Magnetorezistory

Polovodičové magnetoristory mají menší citlivost a kvadratickou charakteristiku, používají se v oblasti vyšších pracovních polí (cca 0,5T). Nicméně se tyto prvky v menší míře stále používají jako senzory polohy zejména pro velké teplotní rozsahy.

Kapacitní senzory

Jsou vhodné pro měření veličin ovlivňujících kapacitu kondenzátoru, tj. geometrii elektrod (plochu, vzdálenost) a permitivitu ϵ prostoru, v němž se uzavírá elektrické pole kondenzátoru. **U kontaktních** kapacitních senzorů je měřený objekt spojen s pohyblivou elektrodou, která je součástí senzoru. **Bezkontaktní** kapacitní senzory detekují přítomnost objektů z deformace elektrického pole.

Kontaktní kapacitní senzory

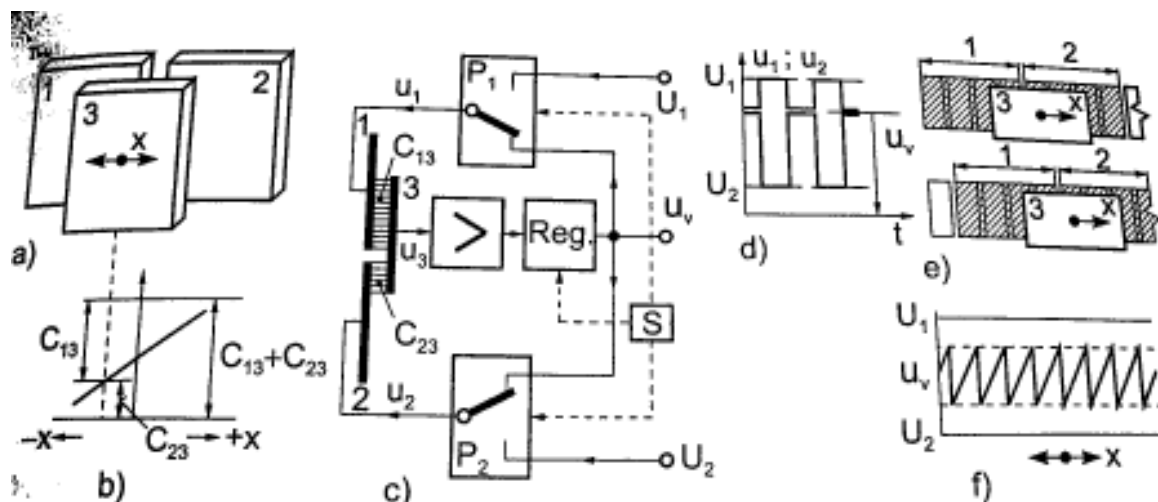
Jsou dva základní typy

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu

- **Mezerové kapacitní senzory** – jsou vhodné pro měření malých posunutí. Změna kapacity způsobená změnou vzdálenosti vzduchové mezery d je dána vztahem

$$\Delta C = \varepsilon S \left(\frac{1}{d + \Delta d} - \frac{1}{d} \right) = Cd \left(\frac{1}{d + \Delta d} - \frac{1}{d} \right) = C \frac{-\frac{\Delta d}{d}}{1 + \frac{\Delta d}{d}}$$

- **Kapacitní senzory s proměnnou plochou překrytí** – při pohybu elektrody 3 na obrázku je změna kapacit vůči elektrodám 1 a 2 přibližně lineární (neuvažujeme okrajové rozptylové pole). Měřicí obvod by měl zajistit, aby změna vzdálenosti mezi pohyblivou elektrodou 3 a elektrodami měřítka 1, 2 a případné změna permitivity neměla vliv na výsledek měření. Stavů rovnováhy může být dosaženo např. zpětnovazební regulací amplitudy u_1 nebo u_2 na základě chybového signálu – proudu do vstupu zesilovače (je-li použit zesilovač s proudovým vstupem) nebo napětí na vstupu (pro operační zesilovač s napěťovým vstupem).



Obr. 2.13 Diferenční kapacitní senzor s proměnnou plochou: a) princip, b) převodní charakteristika, c) měřicí obvod, d) průběhy napětí, e) senzor pro velké posuvy (1, 2 - statorové elektrody), f) výstupní napětí při posuvu elektrody 3

Kapacitní bezkontaktní senzory a spínače

Tyto senzory detekují přiblížení vodivých i nevodivých předmětů. Označují se jako senzory přiblížení nebo polohové spínače. Obvykle obsahují kruhovou elektrodu uvnitř

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu válcového stínícího pouzdra. Přiblížením clonky (měřeného objektu) se mění kapacita vnitřní elektrody vůči krytu. Mohou nastat tyto případy:

- Nevodivá clonka:** kapacita se mění jen změnou permitivity. Spínací vzdálenost je malá
- Vodivá neuzemněná clonka:** paralelně k základní kapacitě přibude sériová kombinace dvou kapacit. Změna kapacity je větší
- Vodivá uzemněná clonka:** paralelně k základní kapacitě přibude další kapacita. Změna kapacity je největší.

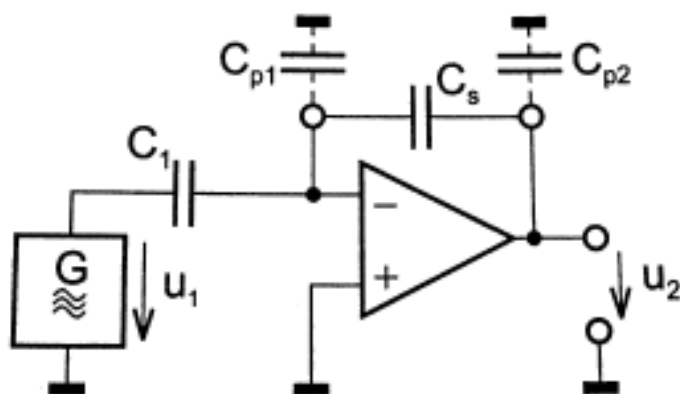
Kompenzace znečištění nebo orosení čelní plochy se dosahuje použitím **aktivního stínění**. Případná stínící (kompenzační) elektroda je umístěna mezi střední elektrodu a pouzdro.

Měřicí obvody pro kapacitní senzory

Základní podmínkou správné činnosti kapacitních senzorů je vyloučení vlivu **parazitních kapacit přívodu** od senzoru k měřicímu obvodu. Jejich škodlivý účinek spočívá jednak ve zmenšení citlivosti a jednak ve vzniku chyby při změnách polohy obvodu přímo v senzoru. Pro neuzemněné kapacitní senzory je většina zapojení odvozena od principu měření **průchozí impedance**: měřený objekt se napájí z ideálního zdroje napětí ($R=0$) a proud objektem se měří ideálním ampérmetrem. Potom jedna parazitní kapacita je na malé impedanci zdroje na nulovém napětí.

Zpětnovazební měřicí obvod na obrázku je vhodný pro senzory s proměnnou vzduchovou mezerou $d(t)$, protože výstupní napětí je přímo úměrné d . V tomto zapojení parazitní kapacity: C_{p1} je na nulovém napětí a C_{p2} je připojen na malý výstupní odpor OZ. Senzor C_s je napájen konstantním proudem u_1/C_1 .

Senzory s proměnným překrytím se zapojí místo C_1 .



Obr. 2.16 Měřicí obvod pro kapacitní senzory

Optické senzory

Odporové senzory polohy

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
Jsou založeny na použití odporových potenciometrů s pohyblivým kontaktem

(jezdcem), mechanicky ovládaným měřenou veličinou. Odporové dráhy precizních potenciometrů jsou někdy vinuté z odporového drátu, nejčastěji se však používá vodivých plastů. Nejčastěji se používá potenciometrů s rotačním pohybem jezdce (měření úhlového posunutí), dále přímočarého posuvu jezdce (měření polohy nebo lineárního posunutí) a pro měření úhlové polohy s velkou rozlišovací schopností také potenciometrů se spirálovým pohybem jezdce.

Odporový senzor polohy se chová jako napěťový dělič s dělicím poměrem určeným měřenou polohou. Toto potenciometrické uspořádání, na rozdíl od reostatového, vyloučí chyby způsobené změnami rezistivity odporové dráhy.

U vinutých potenciometrů je rozlišovací schopnost určena skokovou změnou odporu při pohybu jezdce mezi sousedními závity a jejich převodní charakteristika je stupňovitá.

Linearita závisí na rovnoměrnosti odporového vinutí nebo vrstvy.

Šum potenciometrů vzniká při pohybu jezdce po vinutí a je způsoben různými elektrickými a mechanickými efekty.

Senzory vibrací

Kmitavým pohybem se rozumí časová změna polohy vybraného bodu na objektu vzhledem ke vztažnému bodu. K přímému měření okamžitých hodnot polohy je tedy obecně možné použít senzory polohy. V tomto případě jde o relativní senzory kmitavého pohybu, jelikož je určována poloha relativně k pevnému vztažnému bodu.

Relativní měření kmitavého pohybu nelze realizovat u pohybujících se objektů (vozidel) a také v případě, kdy v okolí kmitajícího objektu nelze najít pevný vztažný bod. To je případ měření kmitání těžkých nebo rozlehlých objektů, jejichž vibrace jsou přenášeny do okolí. Proto se převážně používají absolutní senzory kmitavého pohybu, v němž je vztažný bod vytvořen uvnitř senzoru za jistých dynamických podmínek. Pak se měří poloha vůči tomuto bodu relativním senzorem polohy, umístěným uvnitř absolutního senzoru kmitavého pohybu.

Absolutní senzory kmitavého pohybu

Podstatou senzoru je mechanická kmitavá soustava tvořená hmotností m , pružinou o tuhosti k a tlumením, o němž budeme předpokládat, že je úměrné rychlosti pohybu s konstantou úměrnosti b (viskózní tlumení). Soustava je pak popsána rovnováhou setrvačné, direktivní a tlumicí síly, tj. pohybovou rovnicí. Rovnováha sil je vztažena k myšlenému pevnému bodu A , vůči kterému se měří kmity objektu $y(t)$, takže platí pohybová rovnice

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + kz = 0$$

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu pro časově proměnné složky souřadnic platí

$$z(t) = x(t) + y(t)$$

z toho se pohybová rovnice dá upravit do tvaru

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = m \frac{d^2 y}{dt^2}$$

zanedbáme-li tlumení, rovnice se zjednoduší na

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{d^2 x}{dt^2} - \omega_0^2 x$$

kde $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ je rezonanční kmitočet.

Amplitudová charakteristika je dána vztahem

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Pro měření parametrů kmitavého pohybu je důležitých několik zvláštních případů průběhu amplitudové a fázové frekvenční char.:

A. $\omega \ll \omega_0$

V toho vyplývá, že amplituda x_0 je přímo úměrná amplitudě měřeného zrychlení $a = a_0 \sin \omega t$. Na tomto principu jsou založeny všechny akcelerometry.

B. $\omega \gg \omega_0$

V tomto režimu sensor měří amplitudu (dráhu) pohybu. Hmotnost m je v klidu (označuje se jako seismická) a tvoří hledaný vztažný bod uvnitř senzoru

Elektrodynamický senzor vibrací

Seismickou hmotnost zde představuje hmotnost snímací cívky 1 a vinutí 2, které vytváří viskózní tlumení indukovanými proudy. Pružný element představuje membrána 5 pevně spojená s válcovou částí magnetického obvodu 3. Pohybem snímací cívky v radiálním poli mezery permanentního magnetu se indukuje napětí $u = Blv$ úměrné rychlosti pohybu cívky v mezeře. Resonanční kmitočet elektrodynamického senzoru splňuje podmínku pro měření dráhy pohybu, a proto ve snímací cívce indukované napětí odpovídá rychlosti. Integračním článkem se snadno získá signál úměrný amplitudě pohybu. Obdobně se derivací získá signál úměrný zrychlené měřených vibrací.

Senzory otáček, rychlosti a úhlové rychlosti

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
Rychlost posuvného nebo rotačního pohybu lze určit derivací výstupního signálu senzorů polohy. Přímé měření rychlosti posuvného pohybu je možné určit senzory s pohyblivou cívkou nebo s pohyblivým magnetem

Senzory otáček a úhlové rychlosti

Pro měření otáček a úhlové rychlosti je nejjednodušší užití magnetického pole tvořeného permanentním magnetem, kde se otáčí cívka spojená s kroužky komutátoru. Výstupní napětí, měřené na sběrných kartáčcích, má v důsledku známé činnosti komutátoru stálou polaritu během celé otáčky a je úměrné rychlosti.

Na tomto principu pracují Tachometry, tachoalternátory a impulsní senzory otáček.

Tachoalternátory s permanentními magnety

se skládají z vinutého statoru a rotoru, tvořeného několika pólovými dvojicemi stálých magnetů. Jedno ze statorových vinutí je napájeno ze zdroje střídavého napětí a slouží jako referenční. Ve druhém vinutí se indukují napětí s amplitudou úměrnou rychlosti otáčení a transformačním jevem také referenční napětí.

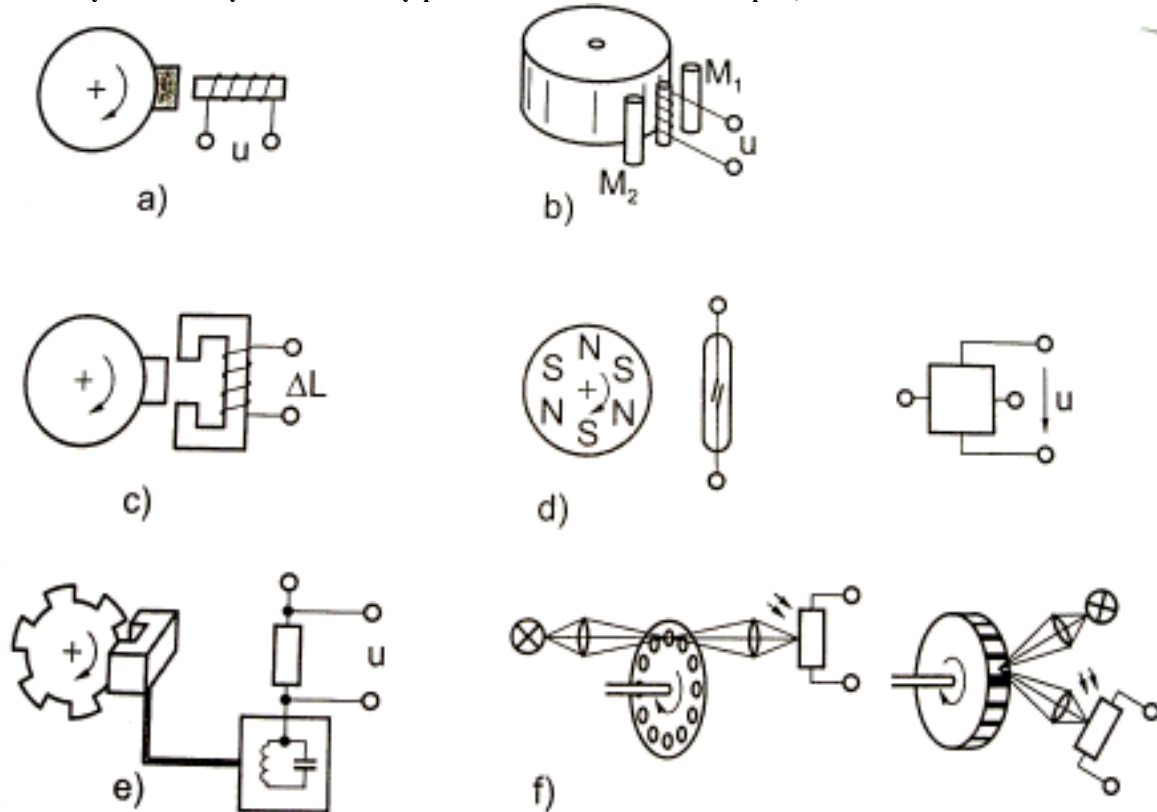
Výhodou tachoalternátorů je delší životnost a vyloučení rušivých vlivů kartáčků a kroužků.

Mezi nevýhodou patří nelinearita vlivem saturace při větších rychlostech, nutnost stabilizovat zdroj referenčního napětí a problém s demodulací při náhlých změnách rychlosti.

Impulsní senzory otáček

Jsou založené na detekci polohy značky na pohybujícím se objektu. Jako detektory polohy lze použít senzory: magnetické, indukční, Wiegandův senzor, optoelektronické (viz OBRÁZEK 2.30)

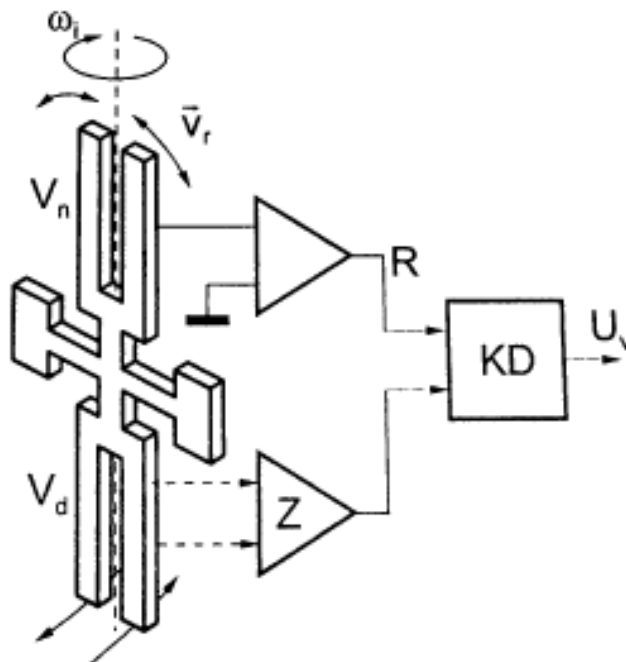
Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu



Obr. 2.30 Detektory polohy

Vibrační senzor úhlové rychlosti

Senzor úhlové rychlosti na principu *Coriolisovy síly* je na ORÁZKU 2.32.



Obr. 2.32 Senzor úhlové rychlosti na principu Coriolisovy síly (dle firmy BEI)

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu

Ramena horní vidlice V_h jsou rozkmitána elektrostaticky v rovině plochy senzoru a radiální rychlosti jejich pohybu má amplitudu v_r . Obě vidlice se otáčejí měřenou úhlovou rychlostí ω kolem hlavní osy. Tím vznikne Coriolisova síla daná vektorovým součinem

$$F = 2m\vec{\omega} \times \vec{v}_r$$

Na ramena vidlice kmitající v protifázi působí dvojice Coriolisových sil, takže na spojnicí obou ramen vzniká kroutící moment M_k , úměrný hodnotě ω .

Periodicky proměnný moment M_k vybudí kmity spodní (snímací) vidlice V_d a jejich amplituda, úměrná ω , je snímána např. kapacitně.

Signál senzoru je zpracován koherentním demodulátorem KD (synchronní detektor) s referenčním signálem odvozeným z generátoru buzení kmitů horní vidlice. Tato koncepce umožňuje dosáhnout extrémních citlivostí.

Senzory mechanického napětí

Přímé měření mechanického napětí se provádí s využitím jeho závislosti na deformaci (Robert Hook).

Odporové tenzometry

Základní vlastnost odporových tenzometrů se dá vysvětlit na příkladu deformace drátu vlivem síly. Namáhání vodiče délky l s plochou průřezu S tahovou silou způsobuje nejen geometrické deformace, ale také mikrostrukturální změny materiálu, ovlivňující rezistivitu ρ .

Odpor vodiče je $R = \frac{l}{S} \rho$ úpravou pro konečné relativní změny odporu dostaneme vztah

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

Při použití odporových tenzometrů je nutné zaručit, aby nenastaly nereverzibilní mikrostrukturální změny, které by vedly k znehodnocení senzoru. Odporové tenzometrické senzory jsou tedy vyráběny z kovových slitin s hodnotou K (součinitel deformační citlivosti) blízkou 2 a vybírají se dále s ohledem na minimální teplotní součinitel odporu. Jsou to materiály: konstantan (Cu,Ni), karma (Ni,Fe+Al), nichrome V (Ni,Cr), platina-wolfram

$K = \frac{\Delta R}{R} \frac{l}{\Delta l}$ a po menších úpravách dostaneme $K = 1 + 2\mu + \pi_e E$, kde π_e je piezoresistenční

činitel a E je Youngův modul pružnosti.

Typy odporových tenzometrických senzorů

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
 Tenzometrické odporové senzory jsou užívány buď při experimentální analýze mechanického napětí strojů a struktur, nebo jako součást senzorů síly, kroutícího momentu, tlaku, rychlosti průtoku aj. Dle materiálu, konstrukčního tvaru a způsobu upevnění lze odporové tenzometry rozdělit



Obr. 3.2 Rozdělení odporových tenzometrů

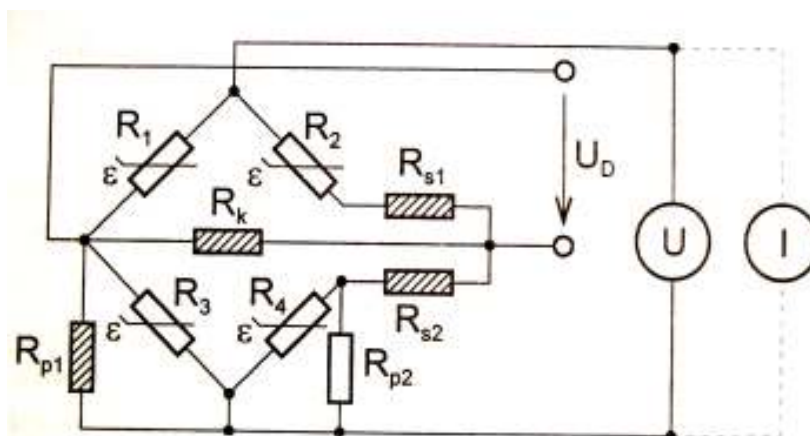
Nejpoužívanějšími kovovými tenzometry jsou v současné době lepené fóliové.

Naprašované kovové vrstvé tenzometry se užívají téměř výlučně pro konstrukci senzorů tlaku.

Z polovodičových jsou nejrozšířenější monokrystalické, difúzní technologií vytvořené na Si substrátu, jenž tvoří pružný člen senzoru tlaku. Pro hromadné aplikace (automobilový průmysl, domácí spotřebiče) se užívají levné tenzometry s polovodičovou polykrystalickou vrstvou.

Měřicí obvody pro odporové tenzometry

Stejnoseměrné můstkové obvody patří mezi nejrozšířenější ve standardních aplikacích, zejména v optimální situaci čtyř aktivních tenzometrů. Praktické zapojení plného můstku, doplněné pomocnými odpory R_k , R_{s1} , R_{s2} , R_{p1} , R_{p2}



Obr. 3.4 Plný tenzometrický můstek (šrafovaně jsou označeny justážní rezistory)

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
 Pro indikátorové napětí naprázdno za předpokladu napět'ového napájení (zdroj U) platí:

$$U_D = UK_U \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) (1 - N) P$$

Zde se předpokládá že můstek byl původně v rovnováze, tj. $\Delta R_i = 0$, $i = 1, 2, 3, 4$,

$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} = a$, člen K_U je můstková konstanta, člen P respektuje vliv odporů přívodů od

můstkového zdroje a člen N nelinearitu.

Výhody *plného můstku*:

1. Stejně odpory R_i tenzometrů, zapojených do můstku tak, aby protilehlé senzory byly podrobeny deformaci stejného a sousedící opačného znaménka, *anulují činitel nelinearity N*.
2. *Citlivost* je čtyřnásobná ve srovnání se čtvrtinovým můstkem, tj. platí

$$U_D = U \frac{1}{4} 4 \frac{\Delta R}{R} P = UK_{\varepsilon,0} \varepsilon P$$

3. *Chyba vlivem teploty je nulová*, pokud jsou všechny tenzometry identické a na stejné teplotě.
4. *Chyby vlivem odporu přívodů* k jednotlivým tenzometrům *jsou zanedbatelné*, je-li možné vytvořit plný můstek přímo na pružném členu, tj. s minimální délkou spojů mezi rameny mostu.

Při výrobě senzorů se nejdříve můstek vyváží stálým paralelním odporem R_{p1} nebo R_{p2} dle znaménka odchylky, nebo sériovými justážními odpory ve formě odškabávací nebo laserem odpalovací fólie. Případné rozdíly účinků teplotní dilatace na jednotlivé tenzometry se mohou vyrovnat několika závitů měděného drátu v pozici R_{s1} nebo R_{s2} , případně opět fóliovými prvky. R_k slouží k nastavení jmenovité hodnoty napětí pro plný rozsah.

5. Vliv odporů přívodů od zdroje k plnému můstku lze vyloučit napájením z proudového zdroje I. Současně se potlačí nelinearita, jak je vidět ze vztahu pro U_D naprázdno:

$$U_D = IK_1 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \quad K_1 = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
 Jelikož se obvykle používají indikátory s velkým vstupním odporem, neuplatní se ani odpory přívodu k indikátoru.

Střídavé můstky

Nestálost nuly stejnosměrných zesilovačů a termoelektrická napětí omezují možnosti stejnosměrných můstků. Oba problémy lze odstranit střídavým napájením, avšak za cenu komplikací vyvolaných účinky parazitních impedancí vedení i vlastních tenzometrů.

Při praktických realizacích plného můstku převládá účinek kapacit přívodů, u neúplných můstků může být situace podstatně složitější, jelikož parazitní impedance přívodů působí paralelně s tenzometrem.

Minimalizaci vlivu impedancí lze dosáhnout využitím necitlivosti synchronních demodulátorů na kvadratickou složku signálu.

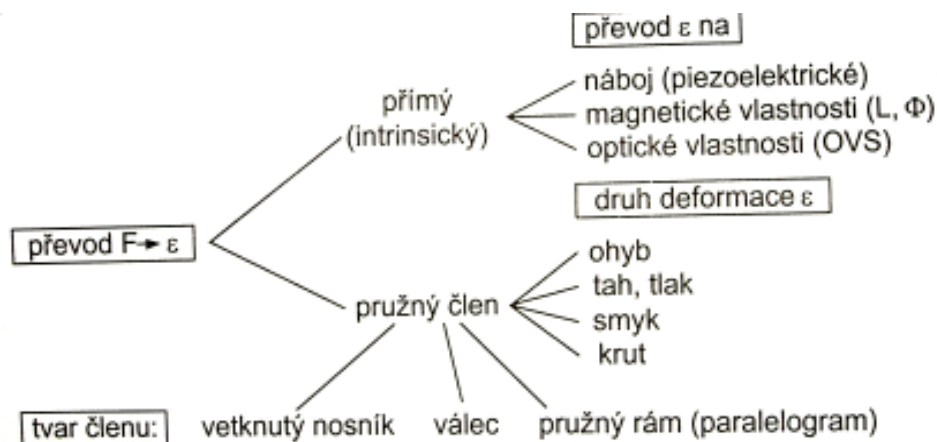
Pro přesné měření se používá plný můstek v tzv. šestivodičovém zapojení, které dovoluje vyloučit vliv impedance kabelů.

Střídavé můstky nejsou vhodné pro měření rychle proměnných mechanických napětí $x(t)$.

Senzory síly a hmotnosti

Pro senzory statických sil včetně vážení se v naprosté většině případů užívá jejich obecných deformačních účinků na objekt vhodného tvaru a složení. Jelikož i senzory dynamických sil používají v některém místě převod měřenosné veličiny na deformaci, lze říci že principem převážné většiny senzorů síly a tíhy je převod síla- deformace- fyzikální účinky deformace.

Senzory síly z hlediska principu dělíme na:



Obr. 3.6 Principy senzorů síly a hmotnosti

Pružné (deformační) členy

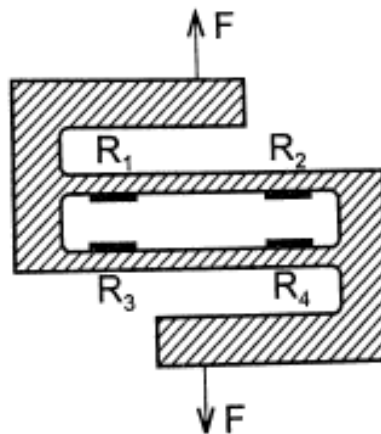
Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
Deformační členy jsou klíčovým elementem senzorů síly a převádějí deformace vyvolané silou na hodnoty snadno měřitelné senzory mechanického napětí- téměř výhradně odporovými tenzometry. Jelikož jde o první elementy (čidla) převodního řetězce síla-elektrická měřenosná veličina, chyby zde vznikající nelze vůbec nebo jen značně těžko korigovat.

Materiály pro pružné členy musí mít minimální teplotní roztažnost, dobrou teplotní vodivost, malou hysterezi, jemnozrnnou homogenní strukturu, malé účinky tečení a odolnost vůči korozi – pružinová antikorozi ocel.

Geometrie pružných členů je podřízena těmto zásadám:

- směrovost** – co největší poměr poddajnosti ve směru měřené síly k poddajnosti ve směru rušivých sil, příp. momentů,
- převod měřené síly** na deformace opačných znamének tak, aby bylo možné použít *čtyř aktivních tenzometrů*,
- transformace měřené deformace** na hodnoty v *rozsahu linearity* použitých tenzometrů a *ochrana proti přetížení*; nejvyšší hodnota deformace nemá přesahovat 10 až 30% meze pružnosti použitého materiálu.

Pružný člen typu S:



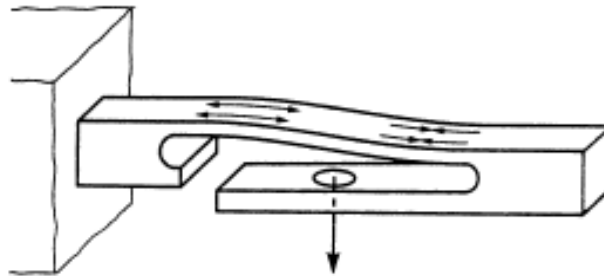
Obr. 3.9 Pružný člen typu S

Umístění tenzometrů *uvnitř otvorů*. Tlaková nebo tahová síla se aplikuje uprostřed vnějších ramen písmene S.

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
Pro měření velkých (do 50 MN) sil jsou vhodné uzavřené pružné členy, naplněné olejem. Výstupní veličinou je tlak oleje.

Pružné členy pro senzory hmotnosti (vážení)

Typickým příkladem je ohybový pružný člen ve tvaru přeloženého nosníku Obr 3.10
Užívá se proto, že při zatížení vznikají deformace opačného znaménka na stejné (vrchní) straně nosníku, takže je snadno možné výrobním automatem nalepit plný můstek fóliových tenzometrů, včetně ve tvaru fólie vytvořených odporů pro teplotní kompenzaci a vyvažování. Výhodou je že, geometrická linearita je nulová při přesně vycentrované zátěži a že je možné posouváním místa působení zátěže měnit hodnotu a znaménko nelinearity. Takto lze kompenzovat i nelinearity jiných členů měřicího řetězce. Použité fóliové tenzometry lze navrhnout jako samokompenzující, pokud jde o teplotní dilataci i tečení materiálu.



Obr. 3.10 Přeložený nosník

Vážení s velkou přesností vyžaduje sensorový systém s elektromechanickou zpětnou vazbou. Přesnost zde záleží na provedení akčního členu, tj. převodníku elektrické veličiny na sílu, vyvažující měronosnou hmotnost.

Senzory síly s převodem deformace na polohu

Senzory síly s přímým převodem deformace

Tyto senzory jsou založeny na převodu velmi malé deformace na jiné fyzikální veličiny.

Nejužívanější jsou tyto principy převodu:

- piezoelektrický
- magnetoelastický
- rezonanční
- fotoelastické principy

Piezoelektrické senzory

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu
Fyzikální podstatou těchto senzorů je *piezoelektrický jev* spočívající v polarizaci některých monokrystalických nebo i polykrystalických dielektrik, jsou-li podrobeny mechanickému napětí (přímý piezoelektrický jev), nebo v deformaci krystalů při působení vnějšího elektrického pole (nepřímý piezoelektrický jev).

Nepřímý piezoelektrický jev se označuje také jako piezostrikce a je využíván v široké míře v ultrazvukových generátorech nebo v měřicí a regulační technice jako akční člen pro mikroposuvy.

V senzorech na tomto principu působí mechanické napětí buď kolmo na elektrody pro sběr náboje (podélný jev), nebo rovnoběžně s jejich rovinou (příčný jev). Třetí možností je smyková deformace. Její výhodou je větší citlivost a menší rušivé účinky teplotních dilatací konstrukčních dílů senzoru.

Typické materiály pro piezoelektrické senzory patří do některé z následujících skupin:

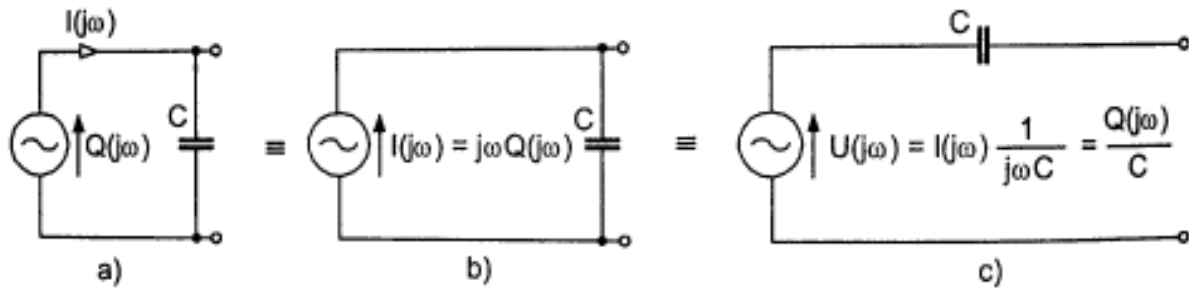
- monokrystaly, např. SiO_2
- polykrystalické keramické materiály jako např. titaničitan barnatý, titaničitan olovnatý
- organické polymery

Zvláštní skupinu tvoří *feroelektrické* materiály, vyznačující se nelineární závislostí polarizace na elektrickém poli ve tvaru hysterezi smyčky. Obdobně jako feromagnetické materiály zůstávají feroelektrika polarizována i bez vnějšího zdroje elektrického pole. Mohou být využity jako zdroje stálého elektrického pole např. v senzorech malých tlakových změn (elektretové miktofony).

Elektrický náhradní obvod piezoelektrického senzoru reprezentuje vznik náboje deformací zdrojem náboje $Q=d \cdot F$ a paralelně zapojeným kapacitorem, který odpovídá kapacitě mezi elektrodami pro sběr náboje. Odvození na obrázku vychází z Nortonova teorému a předpokládá harmonicky proměnnou sílu s kmitočtem ω .

Pro náhradní napět'ový zdroj platí:
$$U_{j\omega} = I_{j\omega} \frac{1}{j\omega C} = \frac{j\omega Q_{j\omega}}{j\omega C} = \frac{Q_{j\omega}}{C}$$

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu



Náhradní obvody piezoelektrického elementu: a) se zdrojem náboje, b) se zdrojem proudu, c) napětí

Měřící obvody pro piezoelektrické senzory

Idealizovaná náhrada senzoru dle orb. 3.14 nerespektuje skutečnou situaci, v níž je nutné uvažovat svodový odpor senzoru R_s , kabelu R_k , vstupní odpor měřicího obvodu R_i stejně jako paralelně připojené kapacity kabelu C_k a vstupu C_i .

Výsledný náhradní obvod je na obr. 3.15.

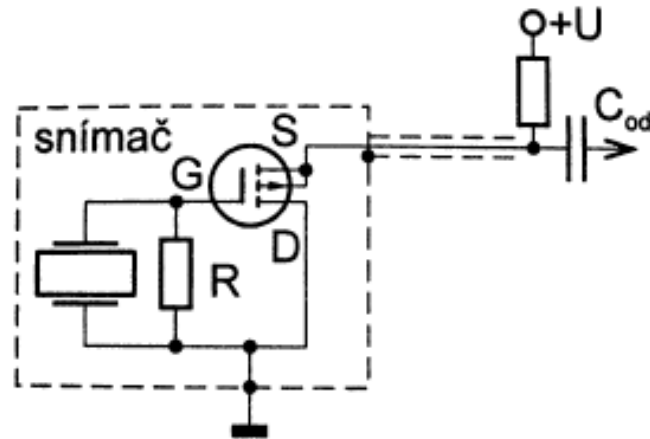
Pro zpracování signálů s nízkými kmitočty mohou být nároky na hodnotu paralelního odporu extrémní a nesplnitelné. Proto piezoelektrické senzory nelze použít pro sledování *statických veličin*, ačkoli obvody s extrémně vysokým odporem a kvalitní izolací mohou pracovat i s kmitočty setiny Hz. Pro zesilování výstupních signálů obsahujících i nízké kmitočty jsou vhodné *tranzistory řízené polem*. Zesilovače mohou být řešeny jako:

- napěťové s velkým vstupním odporem (tzv. elektrometrické)
- nábojové (integrující)

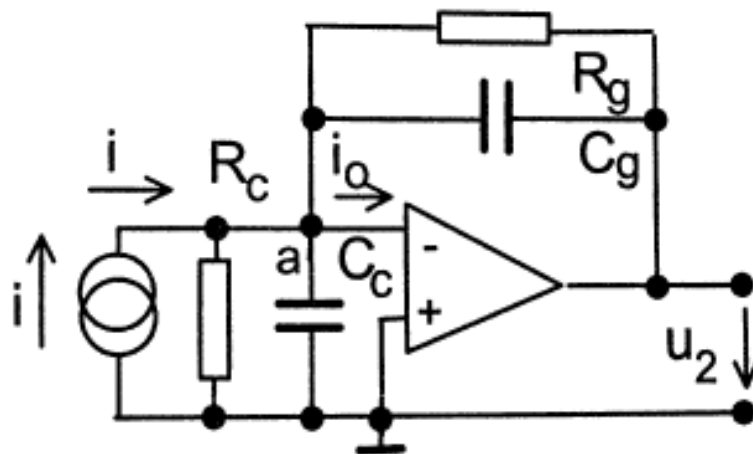
Elektrometrické zesilovače neumožňují využít zvýšené nábojové citlivosti nových piezoelektrických materiálů. Elektrometrické zesilovače jsou používány pro svoji jednoduchost nejčastěji jako napěťové sledovače v situacích, kdy jsou k dispozici značné napěťové úrovně výstupních signálů senzorů.

Nábojové zesilovače k převodu náboje generovaného piezoelektrickými senzory na napětí je dle definice vhodné použít časovou integraci výstupního proudu senzoru na kapacitě tak, jak je tomu u nábojových zesilovačů. Hlavní částí je integrátor, realizovaný operačním zesilovačem s kapacitorem C_g ve zpětné vazbě. **OBRÁZEK 3.17 A 3:18**

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu



Obr. 3.17 Impedanční konvertor v pouzdře senzoru

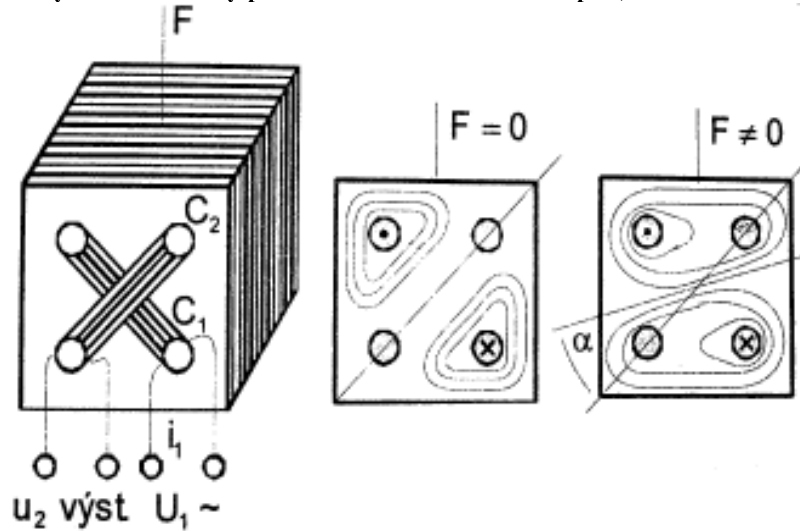


Obr. 3.18 Nábojový zesilovač

Magnetoanizotropní senzory sil

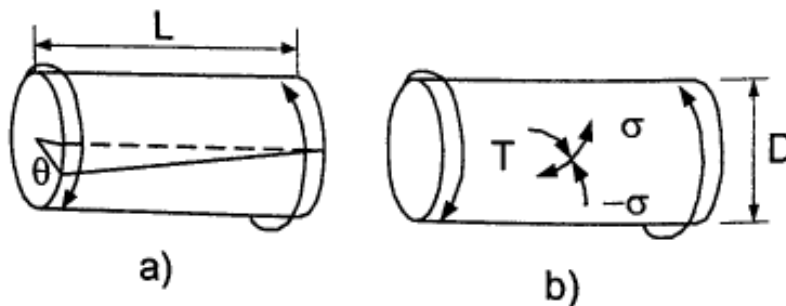
V otvorech feromagnetického obvodu z izotropního materiálu je vloženo primární a sekundární vinutí. Ve stavu bez deformace magnetický tok primáru nezasahuje do sekundární cívky a tedy $u_{2výst}=0$. Působením síly se vytvoří směr zvýšené výsledné permeability (směr magnetování) pod úhlem α od hlavní úhlopříčky.

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu



Obr. 3.21 Magnetoanizotropní senzor síly (ABB)

Senzory kroutícího momentu



Obr. 3.22 Mechanická napětí při torzním namáhání

Na trhu naprosto převládají senzory, založené na deformačních účincích kroutícího momentu

Odporové, magnetické a kapacitní senzory pro měření polohy a vzdálenosti. Optoelektronické a ultrazvukové senzory pro měření geometrických veličin. Senzory a převodníky pro měření vibrací, rychlosti a zrychlení. Senzory pro měření mechanického napětí, sil a kroutícího momentu

Senzory s odporovými tenzometry

Tenzometry určují buď přímo deformaci hřídele mezi motorem a zátěží, nebo je deformaci podroben vložený torzní pružný člen speciálně tvarovaný pro tyto účely.

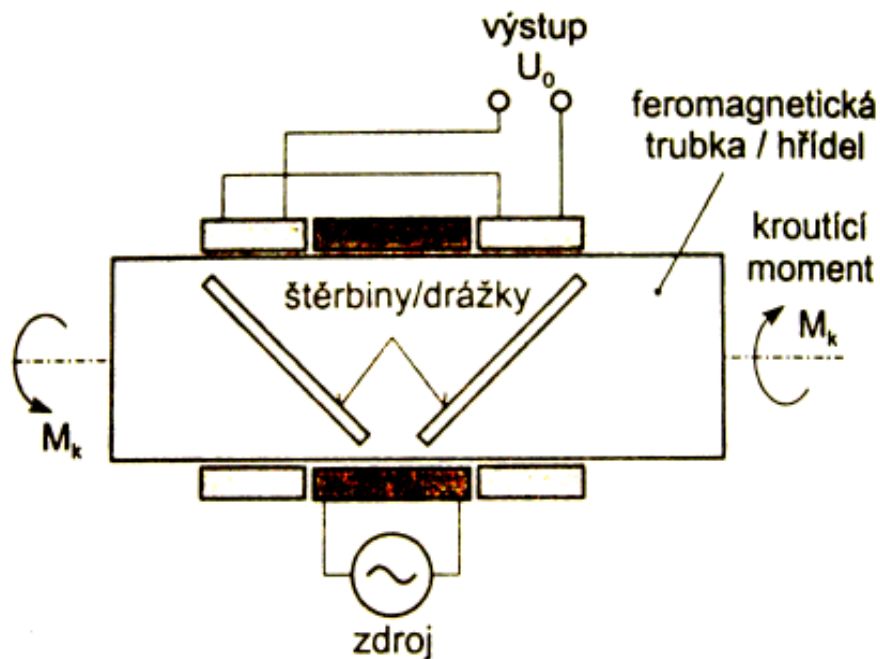
Deformace ve směru hlavních napětí je dána rovnicí

$$\varepsilon = \frac{r}{2GJ} M, \text{ kde } G \text{ je modul pružnosti ve smyku a } J \text{ je moment setrvačnosti.}$$

Největší citlivosti a kompenzace vlivu teplotní dilatace a ohybových deformací se dosáhne nalepením čtyř aktivních tenzometrů pod úhlem 45° , přičemž dva z nich jsou umístěny na opačných stranách pružného členu.

Magnetické senzory momentu

Tyto senzory jsou založeny na **magnetoelastickém jevu**- ve směru mechanického napětí se mění permeabilita. Deformace vyvolaná krutem působí na hřídel z feromagnetického materiálu se dvěma řadami drážek, orientovaných ve směru hlavních napětí OBR 3.25 (na obr je jen jedna drážka z každé strany). Mechanické napětí způsobí změnu axiální permeability: pokud jsou drážky orientovány ve směru snadného magnetování, permeabilita se zvýší.



Obr. 3.25 Magnetický senzor momentu

Sekundární cívky, umístěné nad hřídelí proti vzájemně kolmým drážkám, snímají napětí indukované z primárního vinutí. Rozdílové napětí sekundárů odpovídá rozdílu směrových permeabilit při deformaci. Výhodou senzoru je snadný přenos signálu z rotujícího hřídele.