E11 - Elektrické a fyzikální vlastnosti senzorů a mikroaktuátorů (statické a dynamické). Základní fyzikální jevy, principy činnosti senzorů (piezoodporové, piezoelektrické, ultrazvukové, kapacitní, pn přechod, s Hallovým senzorem, pyroelektrické, magnetoodporové apod.). (Biomedicínské senzory)

SENZOR == elektronická součástka (převodník)

Typy parametrů charakterizujících senzor:

- 1. Statické
- 2. Dynamické
- 3. Prostředí (=> VLIV OKOLÍ na senzor)

1. základní STATICKÉ PARAMETRY

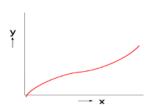
y=f(x)

- Přesnost
- · Rozlišovací schopnost
- · Citlivost
- · Selektivita
- · Práh citlivosti
- · Práh měření
- · Linearita

· Zkreslení

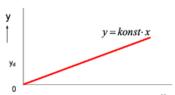
- · Šum
- · Hystereze
- · Reprodukovatelnost
- Výstupní impedance
- · Nestabilita a drift
- · Rozsah měření

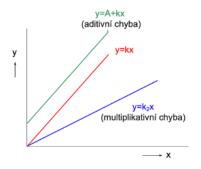
Obecná statická převodní charakteristika



Aditivní a multiplikativní chyby – princip vzniku

<u>Ideální lineární převodní charakteristika</u> y=konst*x

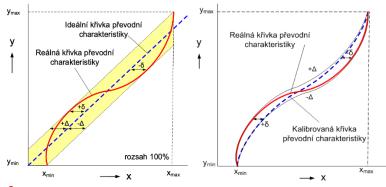




Nelinearita a kalibrace – princip kalibrace nelineárních senzorů

Nelinearita a kalibrace

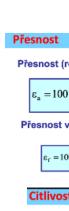
Přesnost vyjádřená graficky (kalibrace (cejchování) = zvýšení přesnosti)



- δ odchylka skutečné od teoretické hodnoty
- ▲ odchylka teoretické od tolerančního pásma

 $\delta = X_m - X_t$

? Nakreslete princip kalibrace nelineárních senzorů



Přesnost (relativní chyba senzoru)

$$\boxed{ \begin{aligned} \varepsilon_{a} = & 100 \cdot \frac{X_{m} - X_{t}}{X_{t}} & \text{(\%)} \end{aligned} } \qquad \begin{aligned} \text{m measurement,} \\ \text{t true} \end{aligned}$$

Přesnost vyjádřená na plný rozsah výstupu

$$\varepsilon_{\rm f} = 100 \cdot \frac{{\rm X_m - X_t}}{{\rm X_{PSO}}}$$
 (%)

FSO ... Full Scale Output

Citlivost, selektivita

Citlivost $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$

platí v daném pracovním bodě Po

Selektivita $S_{\alpha} = \frac{\Delta y}{\Delta x_{\alpha}}$

 \mathbf{x}_{α} je působící fyzikální veličina α \mathbf{S}_{α} je citlivost na veličinu α

Citlivost multisenzorového systému

$$S_{\alpha\beta} = \frac{\Delta y_{\beta}}{\Delta x_{\alpha}}$$

α - působící fyzikální veličina

β - β-itý senzor

? Napište matematické

Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost

$$R_{\text{max}} = 100 \cdot \frac{\Delta X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \qquad (\%)$$

Průměrná rozlišovací schopnost

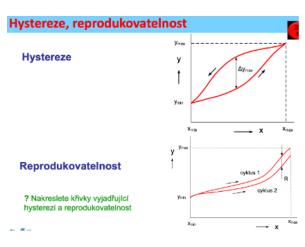
$$R_{av} = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_{i}}{n \cdot (X_{max} - X_{min})_{i}}$$
 (%)

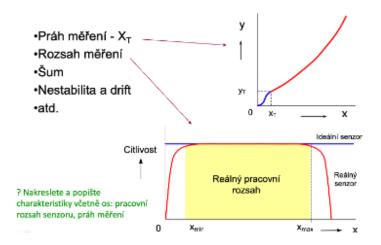
n - počet úseků

Minimální detekovatelný signál (MDS=minimum detecable signal)

$$\boxed{y = \sqrt{u_{\S}^2}}_{u_{\S}}$$

u_š je šumové napětí





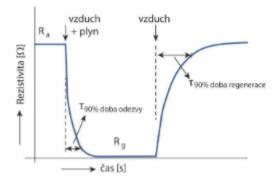
2.DYNAMICKÉ PARAMETRY senzorů

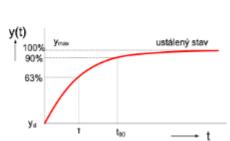
Doba odezvy

čas, při skokové změně veličiny z nuly (hodnota R_a) na hodnotu R_g . Vzhledem k exponenciálnímu charakteru a dlouhé době ustálení odezvy bývá často stanovován při dosažení 90 % z hodnoty odezvy

Doba regenerace

čas návratu signálu po detekci zpět na výchozí hodnotu





1. PIEZOODPOROVÝ JEV - Tenzometry, senzory síly

Deformace tělesa – změna tvaru při mechanickém namáhání.

- Elastická deformace těleso se vrátí do původního stavu po odeznění mechanického namáhání.
- Plastická deformace těleso zůstane deformované
- Objemová, Podélná, Příčná, Změna elektrického odporu
- ->deformační síly tažné, tlakové, smykové, ohybové nebo torzní

Hookeův zákon – popisuje deformaci materiálu působením síly (deformace je úměrná mech. napětí materiálu), platí dobře pro malá mech. napětí

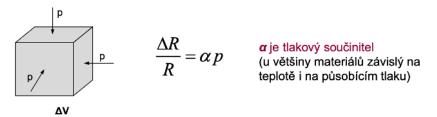
$$\sigma = \mathcal{E} \cdot E$$
 $\varepsilon = \frac{dl}{l}$ ε ... relativní délkové prodloužení E ... Youngův modul pružnosti

PIEZOODPOROVÝ JEV popisuje <u>závislost elektrického odporu R</u> materiálu na mechanickém namáhání, je způsobený pouze změnou geometrických rozměrů vlivem mechanického namáhání.

$$R = f(F) = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l^2}{V}$$
 R odpor vodiče V objem I délka D průměr p měrný odpor

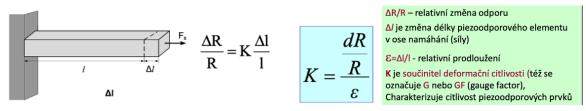
Princip činnosti senzoru s OBJEMOVOU DEFORMACÍ:

Vzorec pro závislost změny odporu na působícím tlaku



Princip činnosti senzoru s PODÉLNOU DEFORMACÍ:

- Vzorec pro závislost změny odporu na jeho relativní změně délky



TENZOMETRY – měří ohmický odpor v závislosti na podélné deformaci

KOVOVÉ TENZOMETRY - Drátkové, Fóliové, Vrstvové

Piezoodporové senzory tlaku – např. elektronický barometr

- Typy: absolutní, diferenciální, manometrické

1.1 PIEZOODPOROVÝ JEV V POLOVODIČÍCH – polovodičové tenzometry

PO jev v polovodičích může být mnohonásobně větší než v PO efekt v kovech.

Materiály: Si, Ge, GaAs, SiC, diamant a další

<u>Princip:</u> Změna měrného odporu polovodiče je způsobena anizotropní změnou pohyblivosti nosičů proudu při působení mechanického napětí v určité krystalografické ose polovodiče.

Koeficient deformační citlivosti – závislost na dotaci a teplotě.

Typy: Lepené, Difúzní, (Pro vysoké teploty)

Umístění: měření torzní deformace, měření ohybu nosníku, měření axiální deformace

ide $R_0 = \Delta T$ $\Delta R = R_0 - \text{je odpor při pokojové teplotě}$ $\Delta R = \text{změna odporu vlivem teploty}$ $\Delta T = \text{rozsah změny teploty}$

(°C-1)

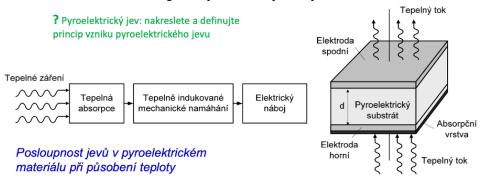
2. PYROELEKTRICKÉ SENZORY

Pyroelektrický jev – materiály, které generují Q jako odezvu na tepelný tok Změny teploty vyvolávají změny polarizačního vektoru, což je doprovázeno posuvnými proudy a změnami napětí.

Tvar pyroelektrického senzoru – tenká destička s elektrodami ke snímání tepelně indukovaného náboje (podobné piezoelektrickému)

Působením teploty vyšší než je Curie teplota - částečky ztrácí dipólový moment (elektrickou orientaci) - mez použití

- Teplo se šíří ve směru osy z mechanismus tepelné vodivosti
- Spodní elektroda je teplejší než substrát senzoru => rozpínání spodní elektrody => v materiálu vzniká mechanické napětí a změna dipólové orientace
- Mechanické namáhání generuje elektrický náboj



3. PIEZOELEKTRICKÝ JEV

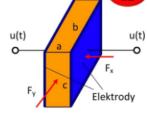
Mechanická deformace krystalu piezoelektrického materiálu způsobí dipólový elektrický momentobjemového elementu, přiložené napětí vyvolá deformaci. Přestane-li mechanické napětí působit, vrací se dielektrikum do původního stavu.

tři osy - deformace

3.1 PIEZ-EL JEV – PODÉLNÝ JEV

Podélný piezoelektrický jev (primární)

působením síly F_x ve směru elektrické osy x. Vektor polarizace P_e je rovnoběžný s osou x a je úměrný působícímu mechanickému tlaku



$$P_e = k_p p_x = k_p \frac{F_x}{S_x}$$

k_p je piezoelektrická konstanta.

Na každé stěně kolmé k elektrické ose vznikne elektrický náboj

$$Q_x = P_e S_x = k_p F_x$$

napětí na elektrodách

$$U_x = \frac{Q_x}{C} = \frac{k_p}{C} F_x = k_u F_x$$

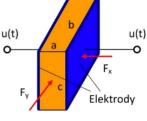
? Podélný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište

kde **k**_u je napěťová citlivost piezoelektrického elementu

3.2 PIEZ-EL JEV – PŘÍČNÝ JEV

Příčný piezoelektrický jev (primární)

vzniká působením síly F, ve směru mechanické osy y. Vektor polarizace působí orovněž rovnoběžně s osou x, ale má opačný směr



 $P_{e} = -k_{p}p_{y} = -k_{p}\frac{F_{y}}{S}$

Pro náboj na elektrodách

$$Q_x = P_e S_x = -k_p \frac{F_y S_x}{S_y} = -k_p \frac{b}{a} F_y$$
 vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište rovnicemi

? Příčný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného popište rovnicemi

napětí na elektrodách

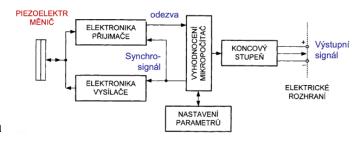
$$U_x = \frac{Q_x}{C} = -\frac{k_p}{C} \frac{b}{a} F_y = k_u \frac{b}{a} F_y$$

kde ku je napěťová citlivost piezoelektrického elementu

4. <u>ULTRAZVUKOVÉ SENZORY</u>

Dolní kmitočtová hranice pro ultrazvuk se udává 20 kHz.

Rychlost šíření zvuku je závislá na teplotě a na tlaku plynu (vzduchu).



Transformace elektrického buzení na mechanickou deformaci materiálu (výchylku).

<u>PRINCIP</u>: Piezokeramický měnič má tu vlastnost, že při přiložení napětí změní své geometrické rozměry mění elektrickou energii na mechanickou

Přiložením napětí změní snímač - piezokotouček svůj průměr, vzniknou příčné síly a dojde k prohnutí celého systému s velkou amplitudou.

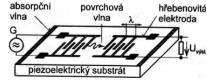
K buzení měniče v senzorech se pak využívá krátkodobě spínaný oscilátor naladěný na rezonanční frekvenci měniče.

-měření vzdálenosti na principu měření času odezvy (echa) od měřeného objektu; vysílač vyšle signál, který se síří určitou rychlostí prostředím, odrazí se od měřeného objektu a je zpětně detekován na přijímači

Aplikace: medicína – ultrazvukové sondy pro echokardiografii; senzor výšky hladiny, plynu a tekutin; parkovací senzory;

4.1 SAW SENZORY – surface acoustic wave

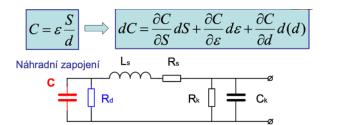
- senzory SAW využívají změn parametrů vlnění šířícího se z hřebenové struktury vysílače do místa přijímače
- SAW akustická vlna se pohybuje podél povrchu materiálu s určitou pružností; amplituda se tlumí exponenciálně s hloubkou substrátu
- Lze měřit:
 - o Frekvence oscilátoru se SAW ve zpětné vazbě
 - Rozdíl amplitud na vstupu a výstupu SAW
 - Rozdíl fází mezi vstupem a výstupem SAW



• Princip:

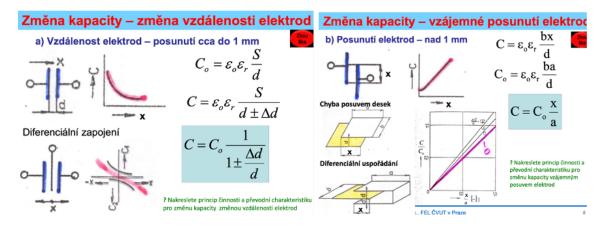
- Závislost mechanické rezonanční frekvence pružného prvku na deformaci vyvolané vnějším působením
- Akusticko-elektrické součástky šíření akustické vlny po povrchu piezoelektrické monokrystalické podložky, na které je interdigitální měnič (IDT – Inter Digital Transducers)
- Využití tzv. Rayleighova vlnění a piezoelektrického efektu
- rychlost šíření po povrchu je ovlivněna vlastnostmi materiálu a působením vnějších neelektrických veličin
- aplikace: měření teploty, vlhkosti, chemických látek, senzor magnetického pole; nahradí katetrizaci – měří tlak v močovém měchýři, intrakraniální měření tlaku, atd...; jiné - monitorování tlaku v pneumatikách;

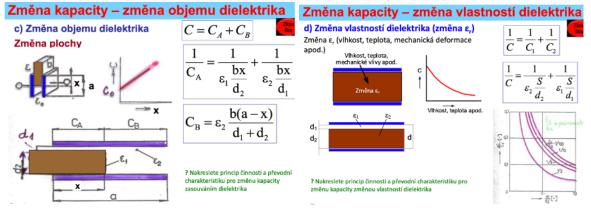
5. KAPACITNÍ SENZORY



Pracovní kmitočet

$$R_s, \omega L_s \leq \leq \frac{1}{\omega C} \leq \leq R_d, R_k, \frac{1}{\omega C_k}$$





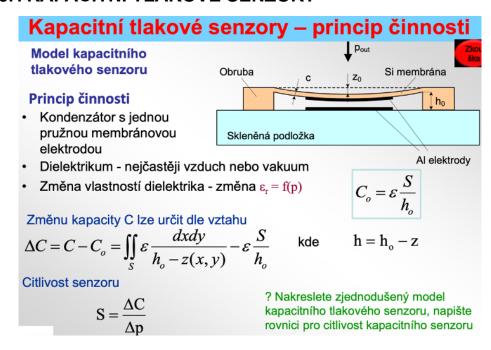
Kondenzátor se skládá ze dvou kovových desek, které jsou navzájem odděleny nevodivým materiálem (dielektrikum).

<u>PRINCIP:</u> Senzoru je založen na principu elektrické kapacity, tzn. schopnosti dielektrika ukládat elektrický náboj. Schopnost kondenzátoru ukládat náboj je určována rovněž vzdáleností mezi deskami. Vstupem objektu do elektrického pole se změní hodnota kapacity. Tato změna se vyhodnocuje pro účely funkce spínání.

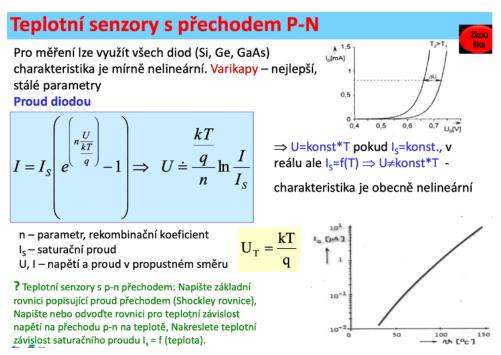
Kapacitní přibližovací senzory se v podstatě skládají ze <u>čtyř základních částí:</u>snímače (dielektrikum), rezonančního obvodu, spínacího obvodu detektoru a výstupního okruhu. Jestliže se k senzoru blíží objekt, změní se dielektrická konstanta kondenzátoru a obvod oscilátoru začne kmitat.

kapacitní senzor pracuje opačně než indukční přibližovací spínač, u kterého jsou vibrace přiblížením cílového objektu tlumeny.

5.1 KAPACITNÍ TLAKOVÉ SENZORY



6. <u>SENZORY S PN PŘECHODEM- teplotní</u> <u>senzory</u>



Zenerova dioda použití jako teplotní senzor:

- Velká citlivost v závěrné části charakteristiky
- Zenerovo napětí je fcí teploty změnou napětí na diodě je možné měnit velikost teplotního koeficientu v širokém rozsahu.

7. S HALLOVÝM SENZOREM

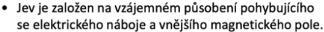
Jedná se o součástku, která se používá pro měření magnetického pole.

Je tvořen úzkou polovodivou destičkou, skrz niž prochází proud. Při vložení destičky (článku) do magnetického pole skrz ni prochází indukční tok a přeskupuje náboje v destičce na jednu stranu. Tak na Hallově článku vzniká napětí.

Hallovo napětí se dá vypočítat pomocí vzorce $[U_h = k^*I^*B]$, kde k je konstanta (zahrnuje typ materiál a tloušťku destičky), I je stejnosměrný proud a B je magnetická indukce způsobená magnetickým polem.

5. Hallův jev

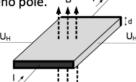




Na elektron působí síla

$$F = qvB$$

q je jednotkový náboj elektronu, v je rychlost pohybu elektronu B je magnetická indukce.



jevu, napište základní rovnici popisující

 elektron je magnetickým polem odchylován na stranu (záporný potenciál) – vznik příčného Hallova napětí U_H.

 Polarita napětí je závislá na směru průtoku proudu a současně směru magnetické indukce. ? Hallův iev: nakreslete princip Hallova

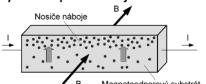
$$U_{H} = \frac{R_{H}}{d}BI$$

R_H je Hallova konstanta B je magnetická indukce

chování Hallova senzoru z hlediska d je tloušťka Hallova elementu výstupního signálu I je proud procházející Hallovým elementem

8. MAGNETOODPOROVÝ SENZOR

- aplikace: měření posunutí
- Vzniká v elektricky vodivých magnetických materiálech
- Působením vnějšího magnetického pole kolmého k proudovým siločarám dochází ke stáčení magnetizačního vektoru v magnetoodporovém elementu a tímto i proudových siločar, což ve výsledku představuje změnu ohmického odporu elementu



? Magnetoodporový jev: vysvětlete princip magnetoodporového jevu, nakreslete princip magnetoodporového senzoru

Ohmický odpor se mění s druhou mocninou magnetické indukce B, při magnetických polích B<0,1 T, změnu lze vyjádřit dle vztahu

$$R = R_o \frac{\rho}{\rho_o} (1 + \mu_n^2 B^2)$$

$$R = fce(B^2)$$
kde μ_n je pohyblivost elektronů.

JEN JEVY

=> => BOLOMETRICKÝ JEV

Dopadající infračervené záření způsobí změnu ohmického odporu bolometrického elementu (polovodiče), objem bolometru je malý

Na výstupu bolometrického elementu napájeného proudem I je změna výstupního napětí

$$\Delta U = I \cdot \Delta R = I \cdot \alpha R \cdot \Delta T$$

(nakreslete) princip bo jevu, napište základní bolometrický jev

 α je teplotní koeficient odporu bolometrického elementu ΔT změna teploty bolometrického elementu vlivem záření

Citlivost bolometru je změna výstupního napětí způsobená změnou dopadající energie infračerveného záření

=> => SEEBECKŮV JEV

Spojení dvou vodičů z elektricky vodivých materiálů do uzavřených obvodů. Různá teplota spojů -> obvodem protéká proud

Pokud se spojí chladný a studený konec <u>stejným materiálem</u>, vyrovná se systém z hlediska rozložení tepelné energie.

- Obě větve smyčky jsou stejné, a proto se kompenzují účinky a obvodem neprotéká žádný proud.
- Různé materiály mají jinou hodnotu absolutního Seebeckova koeficientu, jejich propojením lze vytvořit tzv. diferenciální Seebeckův koeficient

$$lpha_{AB} = lpha_A - lpha_B \,\,_{lpha_A, \,\, lpha_B \,\, jsou \,\, absolutní \,\, Seebeckovy \,\, koeficienty \,\, materiálů}$$

Napěťový rozdíl spojení dvou materiálů

$$dU_{AB} = \alpha_{AB}dT$$

=> => PELTIERŮV JEV

Inverzní jev k Seebeckovu, **protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje obvodem, vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji**.

Teplotní rozdíl je způsobený pohybem volných nosičů náboje mezi rozdílnými Fermiho hladinami materiálů.

Průchodem proudu z vnějšího zdroje stejným směrem, jaký má proud při ohřátí spoje v Seebeckově jevu -> spoj se ochlazuje

Průchodem proudu směrem opačným -> spoj se ohřívá

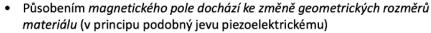
Uvolněné nebo absorbované teplo je funkcí proudu a materiálu

Změna ohřevu nebo ochlazování (absorpce tepla) je funkcí procházejícího proudu /

$$dQ = \pm pIdt$$

- dQ změna tepla
- p koeficient reprezentující termoelektrické vlastnosti materiálu, nezávislý na teplotě, vyjádřen v jednotce elektrického napětí.
- I proud elementem
- čas

=> => => MAGNETOSTRIKČNÍ JEV





$$d = \frac{d\epsilon}{dH} \quad \begin{array}{ll} \epsilon \text{ relativní změna rozměru materiálu} \\ \text{H je intenzita magnetického pole} \end{array}$$

- V magnetickém poli dojde k souhlasnému natočení magnetických domén ve směru pole a tím k expanzi materiálu ve směru pole a ke smrštění ve směru kolmém.
- Přestože je smrštění menší než expanze, používá se právě smrštění jako zdroj pohybu.
- Účinnost piezomagnetických materiálů se blíží účinnosti piezoelektrických (lze však získat mnohem větší sílu).
- Pro dosažení větší síly se používají vícevrstvové systémy
- Typickým materiálem je FeCoAg (využívaný v magnetronu).

Síla vytvořená strukturou



d je koeficient změny geometr. rozměrů w je šířka vrstvy H je intenzita magnetického pole ? Magnetostrikční jev: vysvětlete princip magnetostrikčního jevu, napište rovnici pro vyjádření síly, vysvětlete členy rovnice

=> => => ELEKTROSTRIKČNÍ JEV

- Princip Působením elektrostatických sil generovaných volným nábojem na povrchu materiálu dochází k jeho geometrické deformaci.
- Princip činnosti je podobný elektrostatickému, kde místo vzduchové mezery je umístěn elektrostrikční materiál.
- Výsledné elektrostatické síly stahují a napínají tenkou vrstvu materiálu.
- Pro výslednou sílu struktury platí

$$F = \varepsilon \frac{Lw}{2d^2} U^2$$

ε je permitivita elektrostrikčního materiálu d je tloušťka elektrostrikční vrstvy w je šířka elektrostrikční vrstvy

materiál ? Elektrostrikční jev: nakreslete a definujte princip elektrostrikčního jevu, napište vyjádření síly F, parametry, na kterých závisí

Elektrostrikční

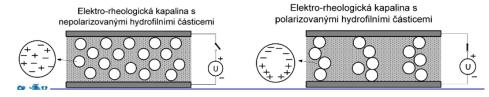
Vlastnosti jevu:

- Elektrostrikční jev není duální.
- Na rozdíl od piezoelektrického jevu se změnou polarity elektrického pole se nemění směr generované síly F.
- Elektrostrikční jev je u všech materiálů, jak krystalických tak i ostatních.

=> => => ELEKTRORHEOLOGICKÝ JEV

Princip

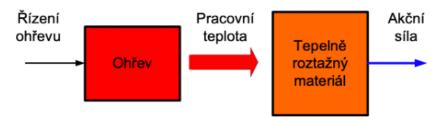
- Kondenzátor s elektrodami mezi kterými protéká tekutina s dielektrickými a polovodičovými částicemi s rozměry v rozmezí 0,04 μm až 50 μm.
- Při U se pevné částice polarizují a uspořádají se v řetězce mezi kladnou a zápornou elektrodou, tj. vytvářejí "můstky" napříč tekutinou mezi elektrodami.
- Vytvořené můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou (zvyšuje se dynamická viskozita). ? Elektrorheologický jev:
- Proces je reversibilní, po odpojení U se můstky rozpadnou. nakreslete a definujte princip
 - elektrorheologického jevu Třecí síly jsou porovnatelné s hydraulickými silami.
- Typická E = 2 kV·mm⁻¹, při E = 4 kV·mm⁻¹ se třecí vlastnosti tekutiny blíží pevným látkám.
- Maximální E je určena dielektrickým průrazem tekutiny.



=> => => TEPELNÁ ROZTAŽNOST

Princip

- Tepelná roztažnost pevných, kapalných nebo plynných látek.
- Ohřev ovládá hlavní akční médium (plyn, kapalina nebo pevná látka).
- Šíření tepla v materiálu vedením, prouděním nebo vyzařováním.



=> => CHEMICKO-MECHANICKÉ JEVY VLIVEM **ELEKTROCHEMICKÉ REAKCE**

Princip

- Síla (tlak) vzniká vlivem elektrochemické reakce (rozpínání nebo smršťování) látek
- Mikroaktuátory s vodivými polymery
- Mikroaktuátory se syntetickými polymery napodobující svaly
- Mikroaktuátory s gely