01 a) Úvod do mikrosystémů a nanosystémů

- 1. Nakreslete a popište 6 základních energetických (signálových) domén obklopujících náš reálný svět.
 - elektrická
 - magnetická
 - mechanická

- tepelná
- biochemická
- záření světelná



- MEMS = mikro-elektro-mechanický systém
 - spojení mechaniky a elektroniky
- MOES = mikro-opto-elektrický systém optika a elektronika

3. Evropská definice mikrosystému – definujte alespoň 3 z 5 základních požadavků na mikrosystém.

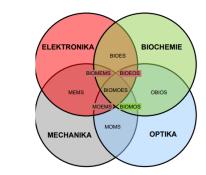
- evropská definice mikrosystémů 5 základních požadavky´ů
 - spojení dvou nebo více signálových domén
 - **funkce** (snímání → zpracování signálu → akční funkce)
 - rozměry (mikrometry až milimetry)
 - vybavený jistým stupněm **inteligence** (softwarová, materiálová)
 - realizace mikrosystémové technologie, integrace na jednom nebo více čipech
 - příklady: kardiostimulátor, mikromotorky na bázi křemíku, zubové čerpadlo, mikropumpy, ventily...

4. Uveďte 3 základní funkce mikrosystému.

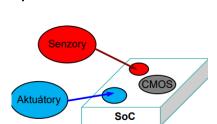
- funkce mikrosystémů
 - senzorová část (snímání) vstup
 - zpracování informace (signálu) DSP/ASP
 - akční činnost (aktuátor) výstup
 - příklad: řízení teploty, tlaku a pH
 - snímání veličin, vyhodnocení, řízení mikroventilů

5. Nakreslete princip vzniku SoC (System-on-Chip) a vysvětlete význam jednotlivých komponent.

- integrovaný obvod zahrnuje všechny součástky elektronického systému na jednom čipu
- technologie integrované na SoC ve standardních CMOS procesech
 - senzory, aktuátory (akční člen), CMOS vše na jednom čipu



ELECTRICKÁ

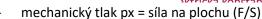


02 Základní fyzikální jevy využívané v mikrosystémech

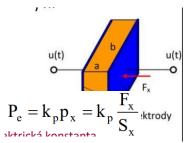
1. Podélný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište rovnicemi.

- piezoelektrický jev = schopnost generovat napětí při deformaci (projevuje se u krystalů)
- podélný piezoelektrický jev deformační síla Fx působí ve směru osy x
 - polarizace Pe je rovnoběžná s osou x a úměrná působícímu tlaku px

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



- **elektrický náboj** je polarizace krát plocha (Q = Pe * Sx = kp * Fx)
- z rovnice Q = C * U vychází →
 - elektrické napětí U = Q/C = ku * Fx
- ku ... napěťová citlivost
- kp ... piezoelektrická konstanta
- napětí na vývodech lze spočítat jako síla krát něj. konstanta ku napěťová citlivost Ux = ku * Fx
- pro náboj Qx platí, že je to konstanta kp (piezoelektrická konstanta) * síla Fx



$$Q_x = P_e S_x = k_p F_x$$

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

2. Příčný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište rovnicemi

 příčný piezoelektrický jev – deformační síla působí kolmo na elektrickou osu; ve směru osy y

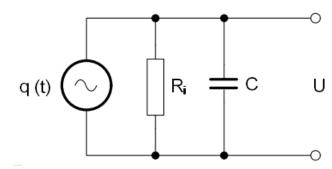
směru osy y ve vztazích hrají roli geometrická rozměry – b/a, protože působíme ve směru osy y a to je jiná osa než v jakém směru jsou elektrody
$$Q_x = P_e S_x$$

$$P_e = -k_p p_y = -k_p \frac{F_y}{S_y}$$

$$Q_x = P_e S_x = -k_p \frac{F_y S_x}{S_y} = -k_p \frac{b}{a} F_y$$

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

- 3. Piezoelektrický jev: nakreslete elektrické náhradní schéma piezoelektrického zdroje náboje (napětí)
 - náhradní elektrický obvod (generátor elektrického náboje)
 - o zdroj elektrického náboje q (t) generování náboje při deformaci
 - o Ri **svodový odpor** elementu (piezoelektrického materiálu)
 - o C kapacita deskového modelu struktury dáno geometrickou kapacitou mezi elektrodami
 - mechanická veličina působí dynamicky s frekvencí menší, než je vlastní mechanická frekvence piezoelektrického elementu
 - piezoelektrické elementy se používají pro realizaci senzorů a aktuátorů do frekvence 105 Hz



4. Piezoodporový jev: nakreslete princip objemové deformace, napište základní rovnici popisující objemovou deformaci z hlediska změny odporu materiálu při deformaci.

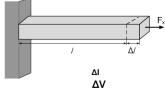
- při působení síly (tažné, tlakové, ohybové, torzní, ...) na těleso vzniká jeho deformace
- **objemová deformace** vzniká působením síly na všechny tři osy současně (těleso je v prostředí s tlal em p) 3D deformace
- změna elektrického odporu piezoodporového elementu delta R/R
 - kde alpha = tlakový součinitel (závislý na teplotě i působím tlaku)
 - p ... tlak



5. Piezoodporový jev: nakreslete princip podélné deformace, napište základní rovnici popisující podélnou deformaci z hlediska změny odporu materiálu při deformaci

- podélná deformace mechanické namáhání v jedné ose
- K = součinitel deformační citlivosti
- delta I = změna délky piezoodporového elementu v ose namáhání (ve směru síly)

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$$



| p

6. Bolometrický jev: vysvětlete (nakreslete) princip bolometrického jevu, napište základní rovnici popisující jev

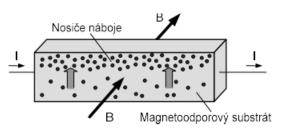
- dopadající IR záření způsobí změnu ohmického odporu bolometrického elementu (polovodič)
- objem bolometru je malý
- bolometr citlivý přístroj pro měření slabého záření
- na výstupu bolometru, který je napájen proudem I je změna výstupního napětí delta U

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

- alpha = teplotní koeficient odporu
- delta T = změna teploty elementu vlivem IR
- citlivost bolometru je změna výstupního napětí způsobená změnou dopadající energie IR

7. Magnetoodporový jev: vysvětlete princip magnetoodporového jevu, nakreslete princip magnetoodporového senzoru

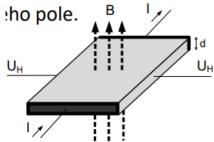
- působením vnějšího magnetického pole (kolmé k proudovým siločárám) dochází ke stáčení magnetizačního vektoru v magnetoodporovém elementu → stačení proudových siločar → ohmická změna odporu elementu
- vzniká v elektricky vodivých magnetických materiálech
- ohmický odpor je funkcí kvadrátu magnetické indukce R se mění s druhou mocninou magnetické indukce B
- lze pozorovat u kovů i u polovodičů





8. Hallův jev: nakreslete princip Hallova jevu, napište základní rovnici popisující chování Hallova senzoru z hlediska výstupního signálu.

- založeno na vzájemném působení pohybujícího se elektrického náboje a vnějšího magnetického pole
- strukturou prochází proud I a jiném (kolmém) směru prochází siločáry magnetického pole
 - o elektrody v jednom směru pouští se proud ze zdroje
 - o ve druhém směru elektrody odebírají napětí
 - ve třetím směru průchod magnetického pole



- Hallovo napětí lze měřit ve třetím směru (kolmém na B i na I)
- na elektron působí síla F = qvB

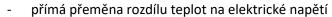
F = qvB

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

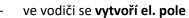
- elektron je magnetickým polem odchylován na stranu (záporný potenciál)
 - → vznik příčného Hallova napětí U_H
- polarita napětí závislá na směru proudu a současně směru magnetické indukce

R_H je Hallova konstanta B je magnetická indukce d je tloušťka Hallova elementu I je proud procházející Hallovým

- rovnice pro popis Hallova senzoru
- 9. Seebeckův jev: nakreslete princip Seebeckova jevu, napište základní rovnici popisující chování Seebeckova jevu, pojmenujte senzor, kde se využívá Seebeckův jev



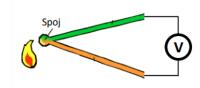
spojení dvou vodičů z různých elektricky vodivých materiálů do uzavřeného obvodu, různá teplota spojů – obvodem protéká proud



- spojení teplý a studený konec
- termoelektrické články konstruovány na tomto principu, teplý a studený konec

$$dU = \alpha \cdot \frac{dT}{dx} dx$$

dT je teplotní přírůstek na délce dx (platí pro malé délky) α je absolutní Seebeckův koeficient materiálu



pro homogenní materiály – Seebeckův koeficient je konst. v celé délce materiálu – lze zjednodušit \rightarrow

$dU = \alpha \cdot dT$

10. Peltierův jev: definujte princip Peltierova jevu, uveďte příklady jeho využití

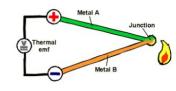
- protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje obvodem, vzniká teplotní rozdíl mezi oběma
- teplotní rozdíl je způsobený pohybem volných nosičů náboje mezi rozdílnými Fermiho hladinami materiálů
- průchodem proudu z vnějšího zdroje stejným směrem, jaký má proud při ohřátí spoje v Seebeckově jevu, potom se spoj ochlazuje
- průchodem proudu směrem opačným, spoj ohřívá
- pouštíme proud ve správném směru konec se ochlazuje
- uvolněné nebo absorbované teplo je funkcí proudu a materiálu
- změna ohřevu nebo ochlazování (absorpce tepla) je funkcí procházejícího proudu I
- protéká proud → spojené konce se ochlazují a opačné konce se zahřívají

$$dQ=\pm pIdt$$
 dQ (změna tepla) je přímo úměrná proudu za čas p ... koeficient termoelektrických vlastností materiálu

- příklady: pro aktivní chladiče, přenosné chladničky do aut
- inverzní jev k Seebeckovu jevu

11. Magnetostrikční jev: vysvětlete princip magnetostrikčního jevu, napište rovnici pro vyjádření síly, vysvětlete členy rovnice

- působením magnetického pole dochází ke změně geometrických rozměrů materiálu (v principu podobný jevu piezoelektrickému)
- koeficient d udává citlivost relativní změny geometrických rozměrů způsobenou změnou intenzity magnetického pole (H)
- $d = \frac{d\epsilon}{d\epsilon} = \frac{\epsilon \text{ relativní změna rozměru materiálu}}{\epsilon}$ v magnetickém poli dojde k souhlasnému natočení magnetických domén ve H je intenzita magnetického pole 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)
- rovnice pro vyjádření síly deformace, která je vytvořená strukturou:



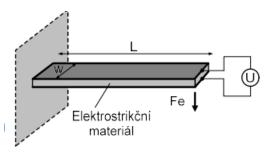
d je koeficient změny geometr. rozměrů w je šířka vrstvy

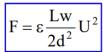
H je intenzita magnetického pole

o síla je přímo úměrná intenzitě magnetického pole

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

- 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
- elektrostikční materiál při přiložení napětí se změní geometrický rozměr materiálu
- pro výslednou sílu struktury platí, že síla je přímo úměrná kvadrátu napětí
 - dále závisí na permitivitě elektrostikčního materiálu (epsilon)
 - o na rozměrech na délce (L), tloušťce (d) a šířce (w) elektrostrikční vrstvy
- vlastnosti elektrostrikčního jevu:
 - není duální (nefunguje to obráceně)
 - se změnou polarity se nemění směr generované síly F jev nezáleží na polaritě napětí
 - existuje u všech materiáů krystalické i jiné

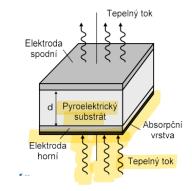


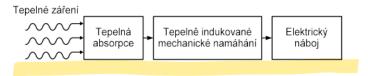


ε je permitivita elektrostrikčního **m**ateriálu d je tloušťka elektrostrikční vrstvy w je šířka elektrostrikční vrstvy

13. Pyroelektrický jev: nakreslete a definujte princip vzniku pyroelektrického jevu

- schopnost generovat elektrický náboj při změně teploty
- generování náboje Q jako odezva na tepelný tok
- změny teploty vyvolávají změny polarizačního vektoru doprovázeno posuvnými proudy a změnami napětí
- tvar pyroelektrického senzoru tenká destička s elektrodami ke snímání tepelně indukovaného náboje
- teplo se šíří ve směru osy z (mechanismus tepelné vodivosti)
- spodní elektroda je teplejší než pyroelektrický substrát → rozpínání spodní elektrody → mechanické napětí v materiálu, změna dipólové orientace
- mechanické namáhání generuje elektrický náboj





Posloupnost jevů v pyroelektrickém materiálu při působení teploty

- využití v teplotních kamerách, senzor na průchod osoby prostorem (zachycení infračerveného záření (tepla),
 které člověk vyzařuje)
- umožňuje realizaci senzorů s nejvyšší citlivostí (až 10⁻⁵ K)
- **pyroelektrický materiál –** při **průchodu tepla** (IR záření) materiálem **vzniká** na jeho povrchu elektrický **náboj**
 - zároveň piezoelektrický
- spodní a horní elektroda + absorpční vrstva (aby se to dobře ohřívalo)

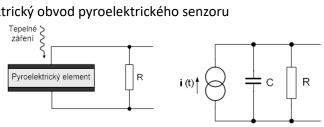
- na pohybující se osoby, ne na stojící (změna toku tepla) vznik gradientu teploty způsobí deformaci piezoelektrického materiálu – objeví se napětí
- citlivost se zvyšuje, protože se přidá náboj z deformace

14. Pyroelektrický jev: význam Curie teploty a jak se projeví

- v podstatě kondenzátor, jedná se o aktivní senzor bez vnějšího napájení
- elektronické obvody pro zpracování náboje (vyhodnocování)
- pyroelektrický materiál generuje náboje v důsledku změny teploty není schopný pracovat ve statickém režimu (při konstantní teplotě)
- pyroelektrický materiál model s velkým množstvím částeček, které mají elektrické dipóly náhodně orientované
- při působení teploty vyšší, než je Curie teplota částečky ztrácí dipólový moment (svou elektrickou orientaci) – mez pro použití pyroelektrických senzorů
 - magnetické materiály ztrácí svoje magnetické napětí
 - pouze do této teploty lze pyroelektrické systémy využít mez použití
- primární jev tepelné roztahování a smršťování jednotlivých dipólů
- sekundární jev důsledek piezoelektrického jevu k němu dochází prodlužováním a smršťováním dipólových částeček – tj. objevuje se zde navíc piezoelektrické napětí
- pyroelektrický element je namáhám tepelným zářením, svodový odpor pyroelektrického materiálu
 - přes kapacitu převod na napětí
 - nábojový zdroj musí být vysoká impedance, nesmíme to zatěžovat...

15. Pyroelektrický jev: nakreslete náhradní elektrické zapojení pyroelektrického elementu (senzoru)

ekvivalentní elektrický obvod pyroelektrického senzoru



- rezistor R zahrnuje vnitřní odporové ztráty v pyroelektrickém materiálu
- procházející elektrický proud rezistorem R a napětí na něm reprezentují tepelně indukovaný náboj

16. Triboeletrický jev: definujte princip triboelektrického jevu

- typ kontaktní elektrifikace určité materiály získávají elektrický náboj poté, co přijdou třením do kontaktu s jiným materiálem
- řada materiálů, podle náboje na výstupu podle ní se generují nanostruktury
- přiblížení a oddálení materiálů sejmutí náboje

17. Elektrorheologický jev: nakreslete a definujte princip elektrorheologického jevu

- kondenzátor s elektrodami mezi kterými protéká tekutina s dielektrickými a polovodičovými částicemi (rozměry v mikrometrech) Elektro-rheologická kapalina s
 - elektro-rheologická kapalina mezi deskami kondenzátoru
 - částice jako příměs v tekutině
- při připojení napětí se pevné částice polarizují a uspořádají se v řetězce mezi kladnou a zápornou elektrodou – vytvoří můstky napříč tekutinou
- můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou zvyšuje se dynamická viskozita
- reversibilní proces po odpojení napětí se můstky zase rozpadnou
- třecí síly jsou porovnatelné s hydraulickými silami
- typická E = 2kV/mm, maximální E je určena dielektrickým průrazem tekutiny



polarizovanými hydrofilními částicemi

03 Parametry akčních členů

- mikroaktuátor = systém (převodník, součástka)
- parametry charakterizující aktuátor:
 - statické, dynamické, prostředí
- vstupní parametr x → do elektronické součástky (aktuátor) → výstup y
- aktivní akční člen nepotřebuje napájení (piezoelektrický materiál typicky)
- **pasivní akční člen** potřebujeme ho napájet (magnetostrikční akční člen)
 - pomocné napájení zahrnuto i v rovnici
- nelinearita mikroaktuátorů odchylka od lineární přímky (odchylka skutečné hodnoty od teoretické)
- kalibrace = přihýbáme teoretickou přímku ke skutečné křivce
- aditivní chyba, multiplikativní chyba
- chybové vlivy na výstupní signál aktuátoru linearita, hystereze, reprodukovatelnost, stabilita, kalibrace, teplotní koeficient
- přesnost aktuátoru (nejistota, relativní chyba), rozlišení aktuátoru, citlivost, selektivita
- minimální akční výstupní signál

1. Napište základní typy parametrů charakterizující aktuátor (3 typy). Vyjmenujte alespoň 5 základních statických parametrů charakterizujících aktuátor

- parametry aktuátoru:
 - statické
 - dynamické
 - prostředí
- statické parametry
 - přesnost, citlivost, rozlišovací schopnost, selektivita, linearita, zkreslení, hystereze, reprodukovatelnost, šum, nestabilita, rozsah měření
- 2. Aktivní a pasivní aktuátor: Definujte aktivní (generátorový) a pasivní (modulátorový) aktuátor. Napište obecné rovnice popisující chování aktivního a pasivního aktuátoru. Uveďte příklady pasivního a aktivního aktuátoru.
 - vstupní parametr x → do elektronické součástky (aktuátor) → výstup y
 - aktuátor systém se vstupem x(t) a výstupem y(t)
 - aktivní akční člen (generátorový aktuátor) nepotřebuje napájení (piezoelektrický materiál typicky)
 - vytváří výstupní energii signálu y(t) pomocí energie vstupního signálu x(t)
 - typicky **piezoelektrické aktuátory**
 - pasivní akční člen (modulátorový)

 potřebujeme ho napájet (magnetostrikční akční člen)
 - potřebuje ke své činnosti další pomocnou energii (elektrické napětí)
 - pomocné napájení zahrnuto i v rovnici
 - například magnetostrikční aktuátor

Obecná rovnice popisující chování aktivního (generátorového) prvku

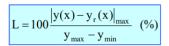
$$y(t) = fce(x(t))$$

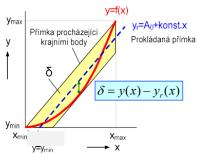
Obecná rovnice chování pasivního (modulačního) prvku

$$y(t) = fce(x(t) + x_d(t))$$

- 3. Nelinearita aktuátoru: Definujte linearitu L (nelinearitu) aktuátoru, nakreslete obrázek vzniku nelinearity L a popište rovnicí
 - linearita L je definována jako **maximální odchylka** (delta) **v intervalu měření**
 - o yr ... referenční přímka
 - o y ... skutečný průběh veličiny

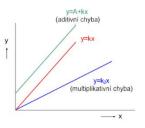
$$L = \delta_{\text{max}} = |y(x) - y_{r}(x)|_{\text{max}}$$



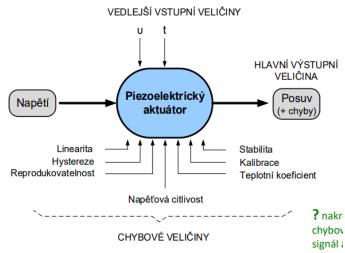


4. Aditivní a multiplikativní chyba aktuátoru: Nakreslete vznik multiplikativní a aditivní chyby aktuátoru

- aditivní chyba posunutí signálu ve směru y (nějaký offset)
- multiplikativní chyba (násobící) změna konstanty k



5. Příčiny vzniku chyb aktuátoru: Nakreslete zjednodušeně chybové vlivy na výstupní signál aktuátoru



6. Napište matematický vztah pro vybranou definici přesnosti aktuátoru

přesnost (relativní chyba)

$$\epsilon_{a} = 100 \frac{y_{m} - y_{t}}{y_{t}} \quad (\%)$$
 y_{m} je výstupní akční hodnota (měřená)
$$y_{t}$$
 je teoretická hodnota výstupní veličiny

přesnost působení aktuátoru vztaženou k plnému rozsahu FSO

$$\epsilon_{\rm f} = 100 \frac{y_{\rm m} - y_{\rm t}}{y_{\rm FSO}} \quad \text{(\%)}$$

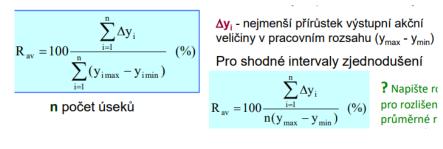
$$\boldsymbol{y}_{FSO} = \boldsymbol{y}_{max} - \boldsymbol{y}_{min}$$

7. Napište rovnice pro rozlišení a průměrné rozlišení aktuátorů

nejmenší možná změna výstupní veličiny způsobená vybuditelnou změnou vstupní veličiny

$$R_{max} = 100 \frac{\Delta y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (\%) \label{eq:max_symin} \begin{array}{l} \Delta y_{min} \text{ je nejmenší možný přírůstek výstupní akční veličiny} \\ (y_{max} - y_{min}) - \text{rozsah výstupní veličiny aktuátoru} \end{array}$$

- průměrné rozlišení R (average) v %
 - průměrná hodnota rozlišení v celém rozsahu výstupní akční veličiny



$$x_{av} = 100 \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta y_i}{n(y_{max} - y_{min})}$$
 (%) Pro rozliščí průměrné

8. Napište rovnice pro citlivost, selektivitu a selektivitu multiaktuátorového systému

- citlivost S = změna výstupní veličiny za změnu vstupní veličiny
 - tečna v daném pracovním bodě
- selektivita (S alpha) = citlivost působení aktuátoru na danou veličinu alpha
- citlivost multiaktuátorového systému
 - pro více aktuátorů (matice)
 - např. matice pro 3 senzory na 3 plyny
 - citilivost působení aktuátoru beta na veličinu alpha v prostřední s více fyzikálními nebo biochemickémi veličinami

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

$$S_{\alpha} = \frac{\Delta y_{\alpha}}{\Delta x} /$$

y_α akční fyzikální veličina α S_{α} je citlivost na akční veličinu α

$$S_{\beta\alpha} = \frac{\Delta y_{\alpha}}{\Delta x} / \frac{\Delta y_{\alpha}}{\Delta x}$$

Δy_α - změna výstupní veličiny aktuátoru β při působení na fyzikální nebo biochemickou veličinu a.

- α veličina na kterou působí aktuátor

9. Napište rovnici popisující definici minimálního akčního výstupního signálu aktuátoru

ySIO = smallest inducible output minimální výstupní akční signál – hodnota výstupní veličiny aktuátoru, která se rovná celkovému vlastnímu šumu aktuátoru

$$y_{\rm SIO} = \sqrt{u_s^2}$$

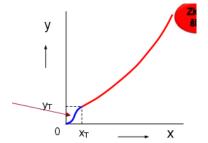
u_s je šumové napětí

10. Nakreslete, jak je definován pracovní rozsah aktuátoru a práh akčního působení aktuátoru

- pracovní rozsah rozsah výstupní veličiny, která je jednoznačně určena vstupní budicí veličinou
 - reálný rozsah měření je tam, kde se křivka citlivosti reálného senzoru nejvíce blíží ideálnímu



- práh akčního působení
 - určený nejmenší hodnotou výstupní akční veličiny yT, která je způsobena vstupní budící veličinou xT
 - prahová hodnota bývá nejčastěji důsledkem nelinearity v okolí nuly
 - oříznutí závislosti x na y (vstup, výstup), nějaké prahové hodnoty xt, yt

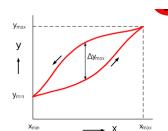


11. Scaling faktor: napište matematický výraz pro "scaling faktor" při zmenšování rozměrů

vyjadřuje změnu vlastností aktuátoru při geometrické změně rozměrů

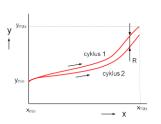
$$S_c = -\frac{d\eta}{dV}$$

η účinnostV geometrický objem aktivních částí aktuátoru



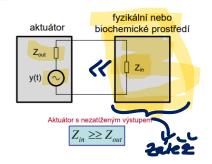
12. Nakreslete princip vzniku hysteréze a reprodukovatelnosti u aktuátoru

- hystereze klasická hysterezní smyčka,
 - různá rostoucí a klesající křivka
- reprodukovatelnost dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobém časovém sledu měření neměnné vstupní veličiny a neměnných rušivých vlivů okolí

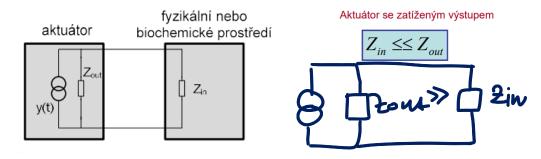


- 13. Nakreslete náhradní elektrický model aktuátoru s ekvivalentním napěťovým výstupem a připojením zátěže, napište podmínky mezi výstupní impedancí aktuátoru a vstupní impedancí zátěžového prostředí
 - výstupní impedance udává, jakým způsobem může být výstup aktuátoru zatěžován následujícími obvody. Jedná se o obecnou impedanci výstupu aktuátoru, respektive impedanci vstupu prostředí (většinou prostředí není elektrické)



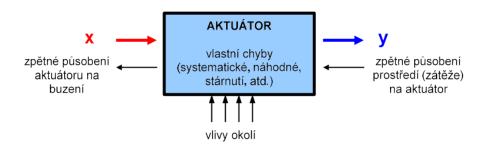


14. Nakreslete náhradní elektrický model aktuátoru s ekvivalentním proudovým výstupem a připojením zátěže, Napište podmínky mezi výstupní impedancí aktuátoru a vstupní impedancí zátěžového prostředí



15. Nakreslete model aktuátoru jako black-box s příkladem vlivů vstupních, výstupních faktorů, vlivů okolí a vlastních chyb aktuátoru

Aktuátor je zatížený chybami

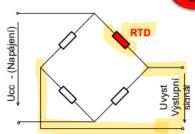


04 Senzory teploty

- 1. Odporové kovové teplotní senzory (RTD): Uveďte alespoň 2 typické materiály pro teplotní senzory, uveďte typický teplotní rozsah, napište základní rovnici pro aproximaci průběhu odporu v malém rozmezí teplot (0-100°C)
 - RTD = Resistance Temperature Device (odpor je funkcí teploty)
 - materiály především čistě kovy Pt, Ni, Cu, W, slitiny Ag, Au
 - nejčastěji platina (rozsah -260 až 630 °C), nikl (rozsah -60 až 120 °C)
 - platina lineární pouze pro malý rozsah teplot, nikl nelineární
 - aproximace polynomem 3. řádu $R = R_0 \left(1 + \alpha \mathcal{S} + \beta \mathcal{S}^2 + \gamma (\mathcal{S} 100) \mathcal{S}^3\right)$ (není lineární
 - pro malé rozsahy teplot rovnice (1–100 °C) normální rovnice přímky, členy 2. a 3. řádu vypadnou
 - tzn.
- $R = R_0 (1 + \alpha \theta)$

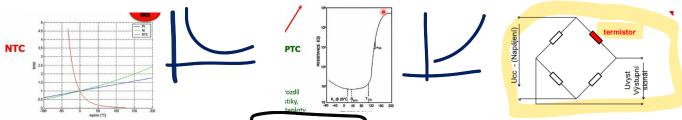
2. Vyhodnocování signálu z odporových kovových teplotních senzorů (RTD): Nakreslete zjednodušeně obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty

- změnou teploty se mění odpor převedení odporu na jinou elektrickou veličinu (napětí)
- můstková zapojení nejčastěji standardní Whetstonův můstek
- měřicí diagonála odebíráme napětí
- můstek je vyvážen při nějaké teplotě, v okolí 0 je můstek nejcitlivější, výstupní signál bude velmi citlivý na změnu teploty v okolí nuly

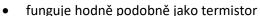


3. Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory: Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.

- NTC = Negativ Temperature Coeficient s rostoucí teplotou klesá odpor (použití k měření)
- PTC = Positive Temperature Coeficient s rostoucí teplotou roste odpor (použití jako vypínač)
- materiál mění svůj odpor s teplotou
- zapojení pro vyhodnocování teploty Wheatstoneův můstek (stejně jako u odporových kovových RTD)
- převodní charakteristiky hyperbola u NTC (červená křivka)



- 4. Odporové polovodičové teplotní senzor monokrystalické: Nakreslete a vysvětlete základní principy činnosti.
 - monokrystalický Si senzor s odporem šíření
 - princip odporu šíření odpor šíření se uplatňuje v místě styku kovového hrotu s polovodičem
 - pohyblivost elektronů závislá na teplotě, kladný teplotní součinitel s rostoucí teplotou, roste odpor

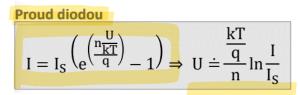


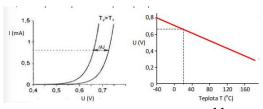
- v objemu křemíku vzniká odpor, oblast, kde je odpor dominantní se tvaruje podle velikosti kontaktu, podle měrného odporu materiálu → prostě vykazuje odpor, který je teplotně závislý
- pohyblivost elektronů v krystalické mřížce Si krystalu je závislá na teplotě výsledný odpor
- s rostoucí teplotou klesá pohyblivost nosičů narůstá rezistivita

5. Teplotní senzory s p-n přechodem: Napište základní rovnici popisující proud přechodem (Shockley rovnice), napište nebo odvoďte rovnici pro teplotní závislost napětí na přechodu p-n na teplotě

- p n přechod popsán Shockleyho rovnicí závislost velikosti proudu na přivedeném napětí
 - proud je v zásadě přímou funkcí napětí a nepřímou funkcí teploty (s rostoucí teplotou se bude I zmenšovat)
 - o q... náboj
 - o k ... Boltzmannova konstanta
 - o n ... nějaký technologický parametr (rekombinační parametr)
 - Is saturační proud (konst.)
 - o U ... napětí mezi anodou a katodou (v propustném směru)
- charakteristika je obecně nelineární
- napětí s rostoucí teplotou klesá

 \Rightarrow U=konst*T pokud I_s=konst., v reálu ale I_s=f(T) \Rightarrow U \neq konst*T charakteristika je obecně nelineární



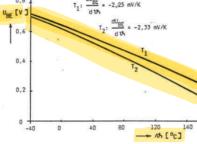


$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

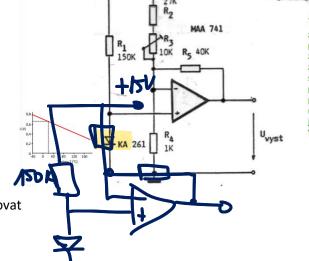
6. Citlivost teplotních senzorů s p-n přechodem: Napište princip odvození citlivosti p-n přechodu, napište typickou číselnou hodnotu citlivosti

- princip odvození citlivosti změna napětí na změna teplotu -> derivace U podle T
 - o beta teplotní citlivost
- typická hodnota beta = -2,1 mV/K

- $\beta = \frac{dU}{dT} = \frac{k}{nq} \ln \frac{I}{I_S}$
- 7. Teplotní senzory s p-n přechodem: Nakreslete t<mark>ypický průběh teplotní závislosti napětí na přechodu p-n</mark>
 U = f(teplota) pro dva různé proudy I přechodem
 - charakteristika není lineární mírně se zakřivuje dolů
 - co diskrétní součástka, to originál
 - pro jeden a pro druhý tranzistor rozdílné křivky teplotní citlivosti změna napětí na změnu teploty



- 8. Vyhodnocování informace z teplotního senzoru s p-n přechodem: Nakreslete zjednodušené základní zapojení teploměru s přechodem p-n, vysvětlete, proč je nutné používat proudový zdroj pro napájení přechodu p-n, jak je tvořen proudový zdroj na Vašem obrázku
 - proudový zdroj je nutné používat, protože pro křemíkovou diodu jako teplotní senzor chci konstantní proud
 - teplotní senzor křemíková dioda napájení z konstantního zdroje proudu
 - v našem obrázku je realizováno velkým napětím a velkým odporem do série s diodou
 - chci zajistit konstantní proud diodou realizace: zdroj vyššího napětí +15 V, velký odpor do série s diodou -> změna proudu bude minimální (považujeme za konstantní zdroj proudu)

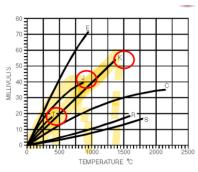


- když se teplota bude zvětšovat napětí na diodě se bude zmenšovat
- snímané napětí připojeno k diferenciálnímu zesilovači
 - na (–) konstantní U (z děliče)
 - na (+) se napětí mění > výstup je rozdíl napětí
- 9. Termoelektrické kovové teplotní senzory: nakreslete a vysvětlete základní princip činnosti termočlánku
 - princip termoelektrických teplotních senzorů Seebeckův jev dva různé kovy spojené svařením, připojení do obvodu, spoje mají různou teplotu, pak protéká obvodem elektrický proud, na svorkách se generuje elektromotorické napětí
- Metal A Junction

 Thermal emf

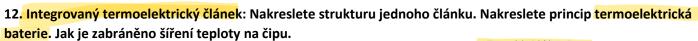
 Metal B

- napětí se mění úměrně ohřevu konců
- 10. Termoelektrické teplotní senzory: Uveďte <mark>3 základní typy kovových termočlánků.</mark> Uveďte <u>typické materiály,</u> Nakreslete 3 typické charakteristiky.
 - typy termoelektrických teplotních senzorů: kovové, integrované, termoelektrické senzory záření
 - typy kovových termočlánků:
 - chromel constantan (E)
 - platinum rhodium (S, R)
 - PE-Ph
 - wolfram rhodium (C)
 - materiály kovových termočlánků: Pt, Rh, W
 - charakteristiky nelineární, mají různou citlivost

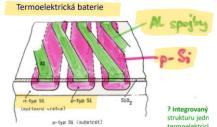


11. Termoelektrické teplotní senzory: Nakreslete zjednodušený princip elektronického zapojení pro vyhodnocování signálu z termočlánků

- vyhodnocování signálů termoelektrických teplotních senzorů voltmetrem měříme výstupní napětí na termočlánku
- příklad zapojení se zesilovačem

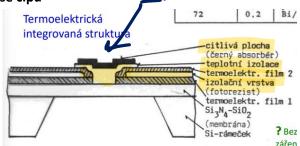


- struktura jednoho termočlánku na čipu (mnohavrstvová technologie)
- zabránění šíření teploty na ploše čipu izolační vrstvou
- Ize použít k měření teplotních rozdílů přímo na křemíkovém čipu
- termoelektrická baterie



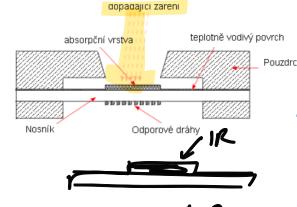
Pezkontaktní senzory infračerveného záření s termoelektrickým článkem: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho termočlánku na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu

- struktura jednoho termočlánku na čipu (mnohavrstvová technologie)
- zabránění šíření teploty na ploše čipu izolační vrstvou



13. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho MEMS bolometru na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu.

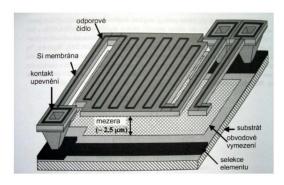
- bolometr = senzory pro bezdotykové měření teploty, na principu pyrometrie – měření celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím IR záření
 - v podobě integrovaných obvodů
 - maticové uspořádání několik desítek až tisíců bolometrů v matici (mikrobolometry)
 - aplikace v termovizi IR snímaní obrazu předmětů s následným měřením jejich teploty
- princip použití bolometru jako proměnného prvku děliče
- provedení jednoduchého bolometru MEMS ->
- struktura jednoho MEMS (micro-elekro-mechanický-systém) bolometru na čipu
- zabránění šíření teploty po ploše čipu ?





14. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu bolometrické matice na čipu

bolometrická matice na čipu – uspořádání plošného detektoru v termovizních kamerách

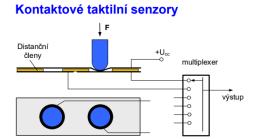


15. Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů, jaké nevýhody mají termočlánkové, do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít

- kryogenní teploty od 50 K níže (-223 °C)
- základní typy teplotních senzorů:
 - termoelektrické články (jednoduché, laciné x ne stabilní a malé napětí)
 - odporové senzory (10 K až 90 K), (2 K až 20 K) (kovové, uhlíkové)
 - kapacitní teplotní senzory (měření v silném magnetickém poli) •
 - indukční princip (extrémně nízké teploty mK až 5 K)
 - šumový teplotní senzor
 - P-N přechod (1 K až 30 K) (citlivost na magnetické pole)
- nevýhody termočlánkových senzorů malé a nestabilní termoelektrické napětí
- nejnižší možná teplota jednotky Kelvinů (2 K)

05 Taktilní senzory a dotykové displeje

- 1. Kontaktové taktilní senzory nakreslete princip činnosti, nakreslete vyhodnocování signálu.
 - 1D taktilní senzory
 - pro zjištění kontaktu, síly, tlaku
 - princip činnosti
 - dvě pružné vrstvy prostorově oddělené distančními členy
 - působením vnější síly dojde k elektrickému propojení horní a dolní vodivé vrstvy
 - výstupní logický signál je ve tvaru logické jedničky (dotyk) nebo logické nuly (dotyk není) (zpracováno v multiplexoru)



vyhodnocování signálu.

2. Taktilní senzor s odporovou tlustou vrstvou (elastomerem) - nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu. princip činnosti, nakreslete princip

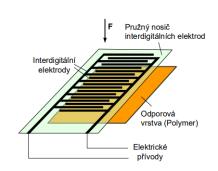
tlustá odporová vrstva – elastomer – materiál, který mění svůj odpor deformací – vyrobené z Si pryže

princip změny kontaktní plochy nebo tloušťky

lze použít takový maximální tlak, při kterém se převodní charakteristika dostává do saturace (citlivost se blíží k nule)

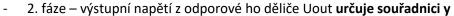
- vyhodnocování informace metodami měření odporu
- nevýhodou je relativně velká tloušťka

- Odpor Převodní charakteristika saturace Elektricky vodivé tlačítko Síla Tlustá odporová vrstva (elastomer) Elektricky vodivá deska
- 3. Taktilní senzor s odporovou tenkou polymerovou vrstvou a prstovou kontaktní strukturou - nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu.
 - polovodičové polymery mění odpor působením tlaku nebo síly
 - senzor ve tvaru membránového spínače, interdigitální struktura jako jedna vrstva, polovodivý polymer jako druhou vrstva
 - vlastnosti
 - velký dynamický rozsah
 - velmi malá přesnost
 - velmi nízká cena
 - typická tloušťka senzoru 250 um

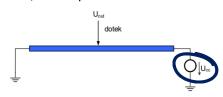


4. Dotykové displeje 2D s odporovým principem - nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu

- princip odporového děliče
 - o pružná membrána s odporovou vrstvou
 - průhyb membrány vytvoří kontakt s další odporovou vrstvou
 - vytvoření odporového děliče
- vyhodnocení výstupního signálu (napětí)
- 1. fáze výstupní napětí z odporového děliče Uout určuje souřadnici x



- upgrade na pětivodičové připojení elektrodový obvod na pevné základní desce, nad ní pružná membrána
- odporové displeje chtějí kalibrovat
- použití u prvních mobilů, mikrovlnek, čtečky atd.
- výhody mohou se zašpinit
- nevýhody lehké poškození ostrým hrotem



Pevná deska

(substrát)

Distanční člen

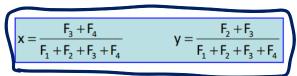
Pružná elektricky

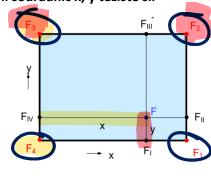
X=0

 $U_{\underline{\it out}}$

5. Princip vektorového rozkladu určení souřadnic x a y těžiště – nakreslete princip určení souřadnic x, y těžiště sil

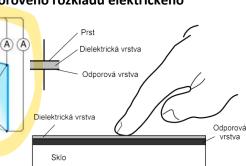
- princip vektorového rozkladu sil
 - o dielektrická a odporová vrstva na skle
 - o střídavý proud z kondenzátoru
 - v závislosti na poloze dotyku různě velké odpory z rohů různě velké proudy
- na destičku působí síla F senzory v rozích měří síly F1 až F4
- určení souřadnice x, y





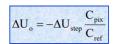
6. Dotykové displeje 2D s elektrickým polem a kapacitou – nakreslete princip vektorového rozkladu elektrického pole pro určení souřadnic x a y dotyku.

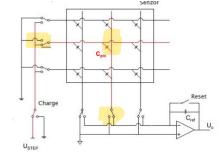
- spodní elektroda odporová vrstva na skle
- horní elektroda prst
- dielektrická vrstva odděluje obě vodivé elektrody (kondenzátor)
- proud protéká kapacitou mezi prstem a dolní elektrodou
- napájení střídavým zdrojem s frekvencí kHz
- proud protéká odporovou vrstvou do 4 rohů dolní elektrody
- proud je v rozích měřený, vektorově lze určit polohu x,y
- měří pouze jeden dotyk

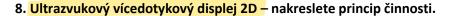


7. Kapacitní vícedotykový displej 2D – nakreslete zjednodušené elektrické zapojení pro určení souřadnic x, y.

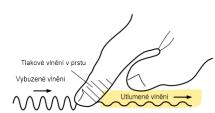
- velikost kapacity v každém místě displeje je zjišťována průběžně při sepnutí
 příslušných spínačů podél obou os a je měřena pomocí známého zapojení pro měření impedance s operačním zesilovačem
- více dotykový princip
- při přiblížení prstu ke zkříženým drátům se změní kapacita
- hledá se změna kapacity → vyhodnocení

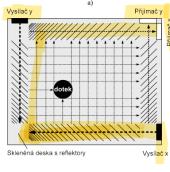






- Možná realizace na zakřiveném povrchu
- dotyk prstů způsobí absorpci částic energie šířícího se vlnění
- pracovní frekvence je 5Mz
- výhoda je velmi jednoduché uspořádání a možná realizace na zakřiveném povrchu
- rychlost šíření ve skle je 3160 m/sec
- na plochu displeje se přivádí akustická vlna, která se po displeji šíří mikro drážkami
- při dotyku je toto šíření přerušeno, kontrolér vyhodnotí souřadnice x, y polohy prstu





9. Infračervený vícedotykový displej 2D – nakreslete princip činnosti.

- princip činnost
 - vytvoření mřížky IR záření
 - zdroj IR záření je LEDka, přijímačem je fototranzistor
 - místě dotyku jsou cesty infračerveného záření přerušeny
 - souřadnice polohy–určení x a y v místě přerušení paprsku



06 Elektrostatický princip – využití v mikro a nano manipulátorech

1. Napište rovnici pro výpočet energie akumulované v kondenzátoru s kapacitou C, napište vztah pro obecný 3D výpočet síly mezi elektrodami kondenzátoru C.

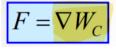
elektrostatická energie Wc (v kondenzátoru C)



$$W_C = \frac{1}{2}CU^2 \qquad Q = CU$$

$$Q = It$$

- obecná síla 3D působící na desky je rovna gradientu energie Wc
 - Coulombovská síla F mezi elektrodami kondenzátoru C, přitahování opačně nabitých těles

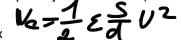


2. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohybem elektrod vůči sobě, vyznačte směr působení síly, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození síly mezi elektrodami kondenzátoru C, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

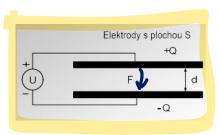
- napětí na kondenzátoru je konstantní, vrchní deska je pohyblivá jen ye směru x (nahoru a dolů na obrázku)

elektrostatická energie aktuátoru

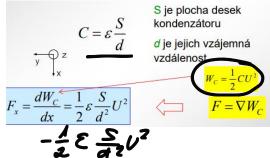
- síla mezi elektrodami F je rovna derivaci energie podle x



 $F_{pru\check{z}} = k(d-x)$

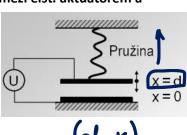






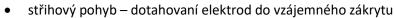
3. Napište rovnic<mark>i pro sílu pružiny F pruz</mark>, napišt<mark>e výchozí rovnici pro odvození rovnováh</mark>y mezi elst. aktuátorem a pružinou jako zátěží. $F_{pruž} = F_{akt}$

- zátěž aktuátoru je modelována pomocí pružiny
- rovnováha mezi aktuátorem a pružinou F_{pruž} = F_{akt}
- síla pružiny působí proti síle aktuátoru, síla pružiny proti elektrodě kondenzátoru
- energie systému: aktuátor pružina se skládá z přitažlivé síly působící na aktuátor a působící na pružinu
- rovnici pro odvození rovnováhy mezi elst. aktuátorem a pružinou jako zátěží → ?



Shorer.

4. Nakreslete model kapacitního aktuátoru se střihovým pohybem elektrod (vzdálenost elektrod se nemění), vyznačte směr působení síly, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození síly působící na elektrody, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi. Elektrody s plochou S

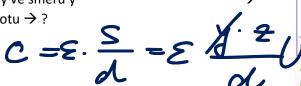


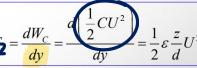
působení síly Fy přes kapacitu kondenzátoru, derivace práce Wc podle y

při zamezení pohybu elektrod v podélném směru, coulombovské síly pohybují deskami kondenzátoru (ve střihu)



rovnice pro elst. energii aktuárotu →?



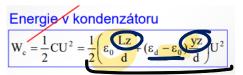


z je rozměr desky ve směru osy z d je jejich vzájemná vzdálenost. y je překrytí desek

5. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohybem dielektrika, vyznačte působení síly v aktuátoru, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození působící síly na dielektrikum, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

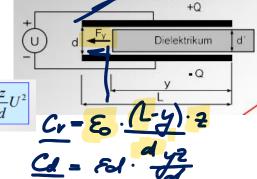
2 pevné elektrody (stator), vtahováno do nich pohyblivé dielektrikum

dielektrikum je v závislosti na intenzitě elektrostatického pole vtahováno mezi elektrody



$$F_{y} = \frac{dW_{C}}{dy} = \frac{1}{2} \underbrace{(\varepsilon_{d} - \varepsilon_{0})}_{d} \frac{z}{d} U^{2} = \frac{1}{2} \varepsilon_{0} (\varepsilon_{r} - 1) \frac{z}{d} U^{2}$$

$$\varepsilon_{d} - \varepsilon_{0}$$



6. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohyblivou vodivou prostřední elektrodou, vyznačte působení aktuátoru, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození působící síly na pohyblivouelektrodu, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

- dielektrikum lze nahradit vodivým materiálem
- vodivý rotor je v Si mikroaktuátorech obvykle ze silně dotovaného poly-Si
- tloušťka rotoru musí být menší, než je vzdálenost elektrod kondenzátoru
- napište rovnici pro elst.

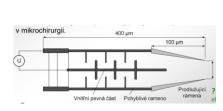
nergii aktuátoru 👈 ?



$$F_{y} = \frac{dW_{C}}{dy} = \frac{1}{2} \varepsilon_{0} \frac{zd'}{d(d-d')} U^{2}$$



- elektricky řízená mikropinzeta
- princip přibližování desek / desky do střihu
- manipulace řádově v mikrometrech
- hřebenové uspořádání





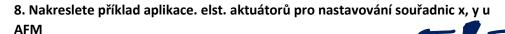




ktricky vodivý materiál

?. Nakresle<mark>te příklady aplikace e</mark>lst. aktuátoru pro nastavování pozice optického vlákna.

- nastavování pozice optického vlákna v jedné ose
- přiložením napětí se nastavuje poloha optického vlákna
- úzký V zářez v něm optické vlákno pokryté vodivou vrstvou, aktuátorové elektrody





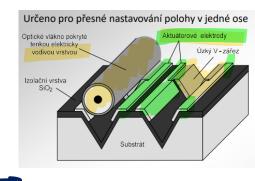
- skenování nějakého povrchu
- na konci hrot táhne se po povrchu hrot se zvedá a snižuje podle struktury – opticky vyhodnocujeme výšku hrotu
- pro nastavování souřadnic (abychom zajistili pohyb po povrchu)
 - hrot se posouvá po řádcích zajištěno
 - v jedné ose jsou systémy, které jdou do střihu –
 hřebenový podélný aktuátor, v druhé ose příčný

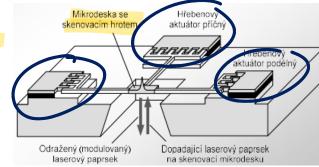
9. Nakreslete příklady uspořádání elektrod MEMS elst. přepínače

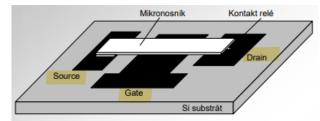
- přepínače (micro switch)
 - využití MEMS technologie ultraminiaturazice
 - výhody: spolehlivost, nízká spotřeba atd., hodně dobré parametry v širokém frekvenčním rozsahu
- princip:
 - jednostranně vetknutý nosník na substrátu
 - uchycený na Source
 - kontakt na Drain
 - v klidu se nosník nedotýká kontaktu na Drain
 - pokud připojíme napětí mezi Source a Gate, jedna elektroda na vetknutém nosníku se přitáhne k Drain elektroděm, dojde ke spojení kontaktů mezi Source a Drain
- využití jako přepínač antén

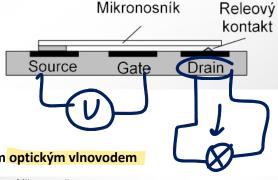
10. Nakreslete princip činnosti MEMS elst. vypínače signálu s integrovaným optickým vlnovodem

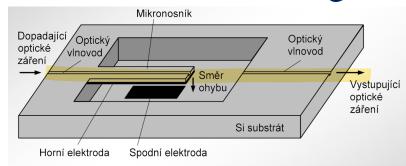
- optický vlnovod umístěný na vetknutém nosníku, který lze elektrostaticky vychylovat nahoru a dolů
- vlnovod je přerušený vzduchovou mezerou
- pokud je nosník v základní poloze, optická cesta není přerušena
- vychýlením nosníku se přeruší optický cesta ze vstupu na výstup





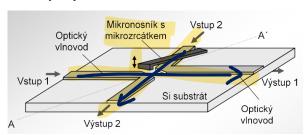






11. Nakreslete princip MEMS elst. přepínače 2x2 optického signálu s vertikálním pohybem odrazového zrcátka

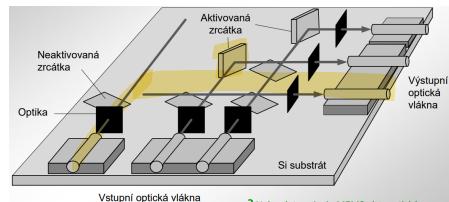
- přepínání optické cesty mezi dvěma nezávislými vstupními a výstupními optickými signály
- přepnutím optického signálu do druhého výstupního kanálu se realizuje vychýlením zrcátka umístěného na konci nosníku směrem dolů
- 2 vlnovody na sebe kolmé, uprostřed přerušené, mikrozrcátko na mikronosníčku
- ze vstupu 1 se to před mikrozrcátko odrazí do výstupu 2 rychlé přepínání paprsků (vstupů a výstupů)
- optické zrcátko je ovládáno hřebenovým elektrostatickým aktuátorem
- v klidové poloze je zasunuté, při přiložení napětí se vysune





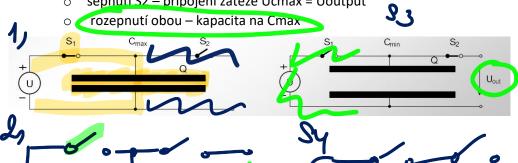
12. Nakreslete princip MEMS elst. optické přepínací matice s odrazovými mikrozrcátky pro různý počet optických vstupů a výstupů optického signálu

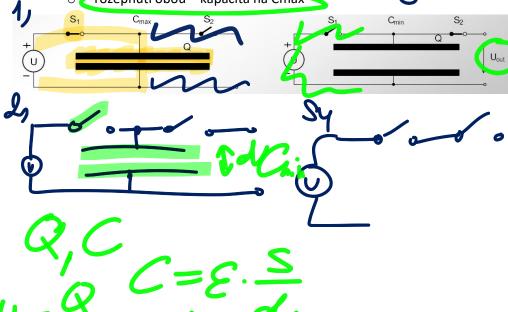
- přepínání signálu mezi vstupy a výstupy
- aktivací zrcátka do pracovní polohy se optický paprsek odráží do úhlu 90°
- pokud není aktivováno paprsek prochází až k dalšímu optickému zrcátku

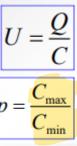


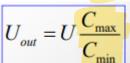
13. Elektrostatický MEMS měnič napětí: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, popište činnost rovnicemi

- elektrostatický měnič napětí
- princip kondenzátor s p<mark>roměnnou vzdáleností desek ve spojení s</mark> elektrostatickým aktuátorem
 - ovládání pomocí spínačů S1 a S2 sepnutý S1 desky blízko maximální kapacita Cmax
 - rozepnutý S1 i S2 desky od sebe, kapacita minimální Cmin, napětí na kondenzátoru na max
 - sepnutí S2 připojení zátěže Ucmax = Uoutput









07 Elektrostatický princip pro využití v mikroakčních členech

1. Rotační elektrostatický mikromotor, tzv. Curie kolo: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

- hliníkový disk (vodivé kolo) elektroda na povrchu má dielelektrikum
- feroelektrický materiál speciální dielektrikum má relativní permitivitu závislou na teplotě
- kondenzátor mezi ploškou na kole a pevnou elektrodou
- ohřejeme kolo světelným z ářením v jednom b odě (lokální ohřev světlem) sníží se permitivita

chceme, aby se to roztočilo – elektrostatická síla kondenzátoru přitáhne část s vyšší permitivitou

pootočí s kolem

podobnost s vtahováním dielektrika mezi desky kondenzátoru

2. Rotační elektrostatický mikromotor s proměnou kapacitou (VCM): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

- VCM = variable capacitance micromotors
- rotor jedna elektroda, stator druhá
- připojíme napětí mezi rotor a stator (druhou elektrodu), která je v ose rotor se pootočí, aby elektrody byly proti sobě
- napětí přeskakuje mezi statorovými elektrodami roztočení motoru



- kruhové uspořádání hřebenových struktur pohonného elektrostatického mechanismu
- napětí přitahuje elektrody, rotorové elektrody (pohyblivé) pootočí rotorem
- motor by osciloval dopředu a dozadu po odpojení napětí (do původní polohy)
 - o při odpojení napětí se elektroda vrátí do původní polohy
- ale je tam západka krokové otáčení
 - o aby se nevracelo do původní polohy (rohatka)

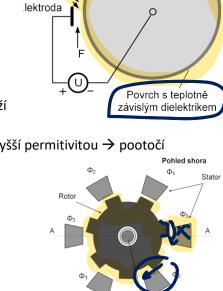
4. Nakreslete princip jednoduchého MEMS elst. membránového ventilu

- mikroventil s elastickou membránou SiO2
- vyleptaný ventilový otvor, membrána na horní části Si substrátu
- při připojení napětí Coulombovské síly prohnou membránu dolů otvor ventilu se zavře



5. Nakreslete princip jednoduché MEMS elst. mikropumpy

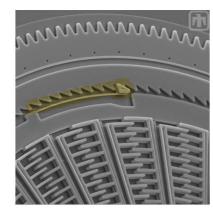
- čerpací komora z jedné části uzavřena pružnou membránou (velmi tenká, měřítko neodpovídá)
- nad ní pevné elektroda + oddělovací vrstva
- při připojení napětí se Si membrána prohne nahoru
 vytvoří se podtlak nasaje se kapalina, aby se tlaky vyrovnaly



Al kolo

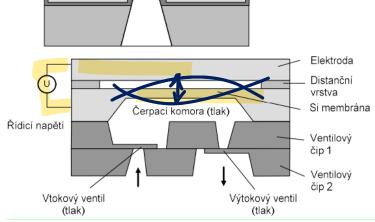
Světelné

záření



Řez A-A

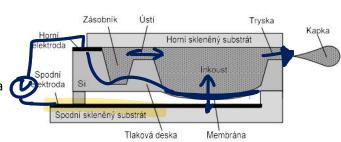
Hřídel



- při odpojení se membrána vrátí do původní polohy vznikne přetlak tekutina vyteče výtokovým ventilek
- dobré pro velmi malá a přesná čerpání

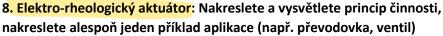
6. Generátor kapek pro ink-jet tiskárny s elektrostatickým řízením: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti.

- při přiložení napětí na spodní a vrchní elektrodu spojené s tlakovou membránou se membrána přitáhne ke spodní elektrodě → podtlak → naplní se komora inkoustem ze zásobníku
- při odpojení napětí se membrána vrátí do původní polohy a tím vytlačí inkousty do trysky – přetlak vytlačí kapičku
- pružná membrána tvoří druhou elektrodu



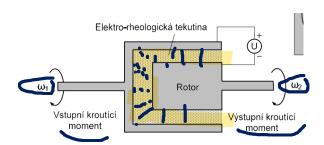
7. Elektro-hydrodynamický aktuátor (např. pumpa): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, která síla se uplatňuje nejvýznamněji?

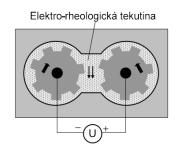
- nutnost látky s indukovaným gradientem permitivity nebo obsahující volné (indukované) náboje
 - o náboje jsou do kapaliny injektovány pomocí elektrod
- síla působící v tekutém dielektriku nejvýznamněji se uplatňuje Coulombovská síla a Korteweg-Helmholzova síla
- vytáhne se kapalina mezi elektrody
- např. pro čerpání lihu

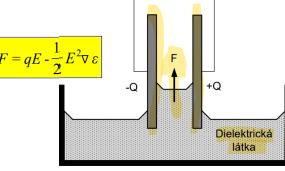




- o **elektro-rheologická kapalina** mezi deskami kondenzátoru
- částice jako příměs v tekutině
- při připojení napětí se pevné částice polarizují a uspořádají se v řetězce mezi kladnou a zápornou elektrodou – vytvoří můstky napříč tekutinou
- můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou zvyšuje se dynamická viskozita
- reversibilní proces po odpojení napětí se můstky zase rozpadnou
- třecí síly jsou porovnatelné s hydraulickými silami
- typická E = 2kV/mm, maximální E je určena dielektrickým průrazem tekutiny
- při připojení napětí se částice "pólují" vytvoří se "řetízky" můstky mezi elektrodami napříč tekutinou
- můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou
- aplikace: hydraulické spojky, mikropřevodovky



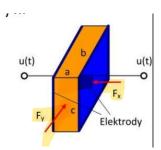




Elektro-rheologická kapalina s polarizovanými hydrofilními částicemi

08 Piezoelektrické mikroakční členy

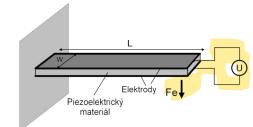
- 1. Piezoelektrický jev pro mikroakční členy: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti podélného a příčného piezoelektrického jevu. Napište nebo odvo<mark>ďte základní rovnice popisující podélný a příčný jev</mark>
 - působením síly se na elektrodách objeví napětí
 - rovnice pro napětí úměrné síle
 - podélný piezoelektrický jev
 - o piezoelektrický jev schopnost generovat napětí při deformaci (u krystalů)
 - o podélný piezoelektrický jev deformační síla působí ve směru osy x; polarizace Pe je rovnoběžná s osou x a úměrná působícímu tlaku
 - podélná deformace, elektrická osa je současně osou deformace
 - mechanickou deformací se na povrchu objeví elektrický náboj, snímaný elektrodami
 - náboj Q = Pe * Sx = kp * Fx (polarizace * plocha)
 - o napětí U = Q/C = ku * Fx
 - o ku ... napěťová citlivost
 - o kp ... piezoelektrická konstanta
 - napětí na vývodech lze spočítat jako síla krát něj. konstanta ku napěťová citlivost Ux = ku * Fx
 - pro náboj Qx platí, že je to konstanta kp (piezoelektrická konstanta) * síla Fx



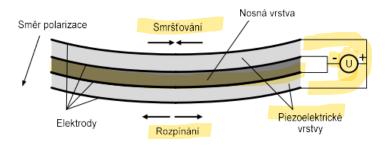
- příčný jev
 - příčný piezoelektrický jev deformační síla působí kolmo na elektrickou osu; ve směru osy y
 - ve vztazích hrají roli geometrická rozměry b/a, protože působíme ve směru osy y a to je jiná osa než v jakém směru jsou elektrody
 - náboj Qx = -kp * Fy/Sy * Sx = -kp * Fy * (b/a)
 - napětí Ux = ku * Fy * (b/a)
- jevy příčný x podélný se liší pouze konstantami
- při přivedení stejnosměrného napětí se kondenzátor nabije deformuje (je reciproční)
- pracuje pouze se střídavými signály střídavé napětí bude měnit rozměry (motorky...)
- PZT piezoelektrická keramika
- malý proud, velké napětí příkony minimální

2. Piezoelektrický vetknutý ohybový nosník: Nakreslete princip činnosti nosníku

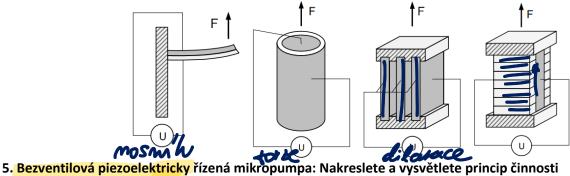
- při připojení napětí se nosník začne ohýbat nosník vyvolá sílu
- pak můžeme něco posouvat atd.
- síla daná modulem pružnosti a další konstanty, síla přímo úměrná napětí
- motorický koeficient d udává změnu rozměru / působící napětí



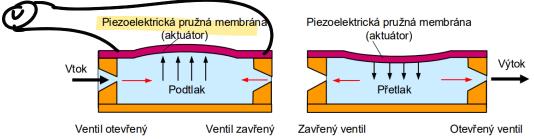
- 3. Mikroaktuátor s pružnou membránou a piezoelektrickou vrstvou: Nakreslete princip činnosti aktuátoru
 - základy pro různé pumpy a ventily
 - na membráně umístěn piezoelektrický materiál
 - princip koordinováni smršťování / rozpínání piezo vrstvy → nosná vrstva se podle toho prohýbá



4. Základní struktury mikroaktuátorů: Nakreslete základní struktury a uspořádání piezoelektrických aktuátorů

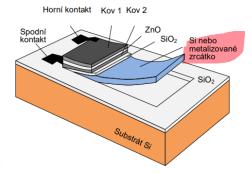


- - v pracovní komoře podtlak díky zvednuté membráně nasátí fluidika
 - naopak při změně napětí membrána se prohne dolů přetlak ten vypudí fluidikum ven
 - je vyřešeno fyzikálně tak, aby kapalina nemohla vytékat vstupem (např. velikostí částic atd.)



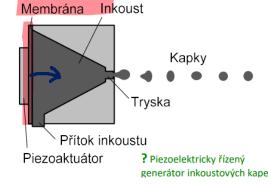
6. Piezoelektricky řízený skener čárového kódu: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

- identifikace čárových kódu, v optických komunikacích, laserových systémech
- prohýbání zrcátka



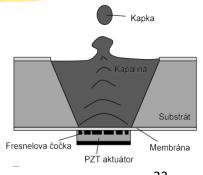
7. Piezoelektricky řízený generátor inkoustových kapek pro ink-jet: Nakreslete a vysvětlete principčinnosti

- akční mechanismus membrána řízení piezoelektrickým akčním členem
- vytvořená akustická vlna prochází inkoustovým zásobníkem



8. Akusticky řízený generátor inkoustových kapek pro ink-jet: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

- vytvoření kapek interferencí mezi kapalinou a akustickou vlnou
- aktuátor s pomocí jednočipové Fresnelovy čočky vytváří směrovanou akustickou vlnu, která vytváří na rozhraní kapaliny se vzduchem kapky
- piezoaktuátor vytvář<mark>í akustické vlny</mark> nepotřebuje trysku (výhoda)



09 Tepelné mikroakční členy

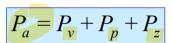
1. Celkový tepelný příkon mikroaktuátoru: Napište rovnici a vysvětlete význam jejich členů

celkový tepelný příkon

- \rightarrow
- $P_{in} = P_F + P_t + P_a$
- P_{in} ... tepelný příkon dodaný do struktury ze zdroje tepla
- P_F ... akční síla tepelný výkon přeměněný v mechanickou práci
- P_t ... ztrátový tepelný výkon (zvyšování teploty s časem)
- Pa ... tepelný výkon přenesený do okolí

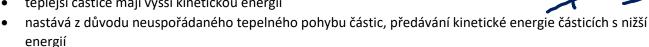
2. Mechanismy přenosu tepla do okolí: Napište rovnici a vysvětlete význam jejich členů

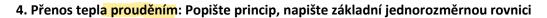
- P_a ... výkon přenesený do okolí
- P_v ... výkon přenesený tepelným vedením
- P_p ... prouděním
- P_z ... vyzařováním



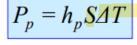
3. Přenos tepla vedením (tepelná difúze): Popište princip, napište základní jednorozměrnou rovnici

- T ... teplota
- k ... koeficient tepelné vodivosti
- S ... plocha
- výkon vedení je úměrný derivaci teploty
- teplejší částice mají vyšší kinetickou energii





driftový proces – okolní plyn / kapalina se pohybuje a přenáší tak tepelnou



- přirozené x vynucené tepelné proudění
- přirozené pohyb v důsledku teplotního gradientu
- vynucené externí vynucení pohybu, způsobeno energií z okolí
- hp ... koeficient se mění podle druhu proudění (přirozené / vynucené)
- záleží na rozdílu teplot, taky na průřezu
- příkladem je chladič

P_n - tepelný přenos prouděním

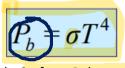
S - plocha kolmá ke směru proudění

△T - rozdíl teplot mezi povrchem a kapalinou

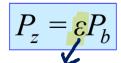
h_a –koeficient závislý na vlastnostech povrchu materiálu, geometrickém tvaru, na vlastnostech kapaliny a na rozdílu teplot ΔT .

5. Přenos tepla zářením: Popište princip, napište základní rovnici pro těleso s absolutně černým povrchem, napište rovnici pro těleso s obecným povrchem

- ohřáté těleso vyzařuje IR záření, vyzařování do okolí
- celková energie vyzářená černým tělesem podle Stefan-Boltzmanova vyzařovacího zákona



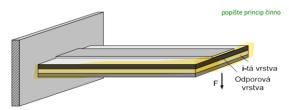
- zářivost sigma (vysoká u těles bližícím se absolutně černým tělesům) Stefan Boltzmanova konst
- proto jsou chladiče černé, aby dobře vyzařovali teplotu
- těleso s libovolným povrchem



- ε zářivost tělesa (ε <1)</p>
- P_z energie vyzářená daným tělesem P_b energie vyzářená černým tělesem

6. Vícevrstvová nosníková struktura: Nakreslete a popište princip činnosti

- vrstvené materiály s různými koeficienty teplotní roztažnosti
- geometrické rozměry se mohou lišit
- odporová vrstva průchodem proudu ohřívá aktuátor

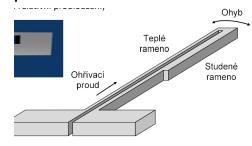


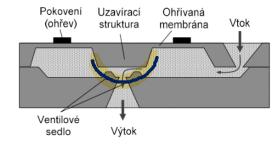
7. Homogenní nosníková struktura s různým průřezem: Nakreslete a popište princip činnosti

- homogenní struktura s různým průřezem
- spojení ohybového a ohřívacího elementu do jednoho dílu
- rozdílný průřez materiálu v různých částech smyčky
- části s menším průřezem mají větší elektrický odpor
- tam, kde je velký odpor se bude ohřívat více to je princip ohřevu (větší teplota, větší relativní prodloužení)
- př. tepelně ovládané relé, spínače
 - mikropinzety (mikrodržáky)

8. Tepelně řízený mikroventil: Nakreslete a popište princip činnosti

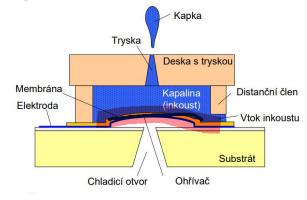
- pružná membrána a pevná základna s ventilovým otvorem
- průhyb membrány při ohřevu uzavře ventilový otvor
- ventilové sedlo, kde jedna část na něj dosedá
- prohnutím membrány dosedá uzavírací struktura na ventilové sedlo





9. Ink-jet hlava s tepelnou deformací membrány: Nakreslete a popište princip činnosti

- ohříváme přímo kruhovou membránu z SiO2 a Ni
- membrána se prohne směrem nahoru a vytlačí kapalinu, pokud je mechanické napětí materiálu membrány větší než kritické



10. Tepelné aktuátory s roztažností plynů: Nakreslete a popište princip silového aktuátoru

- ohřev plynu IR zářením nebo proudem → expanze plynu → prohnutí membrány
- tepelná roztažnost plynu způsobuje průhyb membrány

