

Česká zemědělská universita v Praze

Technická fakulta

**Piezoelektrický jev a jeho praktická aplikace v senzorech pro
měření dynamických sil**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Pecen, CSc.

Autor práce: Jan Chyba

PRAHA 2008

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: technická
Katedra: fyziky	Akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Chyba**

Studijní obor: Zem. technika

Studijní zaměření:

Název práce: Piezoelektrický jev a jeho praktická aplikace v senzorech pro měření dynamických sil.

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Cílem práce je mimo důkladného vysvětlení piezoelektrického jevu a jeho vlastností, získání přehledu jeho využití v oblasti záznamu dynamických sil, a to především ve formě senzorů pro detekci těchto sil.

Osnova práce: 1. Úvod, Vysvětlení základních pojmů.
2. Důkladný rozbor piezoelektrického jevu.
3. Možnosti využití tohoto jevu v konstrukci senzorů pro detekci dynamických sil.
4. Přehled těchto senzorů a jejich vlastností od různých výrobců.
5. Konkrétní příklad aplikace těchto senzorů.

Metodika práce: Základní princip piezoelektrického jevu a jeho vlastnosti vyhledat v učebnicích fyziky. Přehled aplikací a senzorů vyhledat na Internetu. Pro konkrétní aplikaci použít senzory firmy KISTLER.

Rozsah práce: 25 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

Příručky a knihy pojednávající o piezoelektřině.

Zdroje informací na Internetu.

Firemní literatura fy. KISTLER, NBC Elektronik, YOKOGAVA.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing, Josef Pecen, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2006

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2008




Prof. RNDr. Ing. Jiří Blahovec, DrSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jiří Klíma, CSc.
děkan

V Praze dne: 30. 11. 2006

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Pecena, CSc. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Podpis:.....

Děkuji doc. Ing. Josefu Pecinovi CSc. za trpělivost a odborné vedení mé bakalářské práce a panu Havránkovi z firmy Sensor Modular System (SMS) za odbornou pomoc a poskytnutí materiálů.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je vysvětlení pojmu piezoelektrického jevu a jeho praktické aplikace v senzorech pro měření dynamických sil. Pro vysvětlení piezoelektrického jevu jsou nejdříve uvedeny základní veličiny, které se používají pro měření piezoelektrickými senzory. Dále je probrán piezoelektrický jev, jeho matematické formulace a konstanty, po tomto vysvětlení následují senzory a jejich konstrukce a aplikace, kde tato práce pojednává o jednotlivých vybraných senzorech a jejich aplikaci. Pro přiblížení rozsahu a pracovních možnostech piezoelektrických senzorů je v této práci malý přehled těchto senzorů od několika firem, které se zabývají výrobou a distribucí piezoelektrických senzorů. Závěrem této práce je uvedení jednoho piezoelektrického senzoru, který je porovnán se senzorem vyráběným jinou technologií.

Klíčová slova: piezoelektrický jev, senzor, síla

Piezoelectric effect and its practical application in sensors for measurement of dynamics forces

Summary: The objection of this bachelor work is an explanation of the idea of the piezoelectric effect and its practical application in sensors for measurement of dynamics forces. At first are introduced basic values, which are used for measurement by the piezoelectrics sensors. After is interpreted the piezoelectric effect, its mathematics formulations and constants, followed by description of the real sensors, their constructions and applications, where this work deal with particular selected sensors and their praxis application. For aproximation of the range and possibilities of the piezoelectrics sensors is there a small view of the sensors maded by different firms, which are put mind to manufacturing and distribution of the piezoelectrics sensors. At the end of this work a piezoelectric sensor is introduceand compare with a sensor made using a different technology.

Key words: piezoelectric effect, sensor, force

1 Úvod	1
2 Základní pojmy	2
2.1 Mechanické veličiny	2
2.1.1 Síla	2
2.1.2 Tlak	3
2.1.3 Deformace	3
2.1.4 Smyk	4
2.2 Elektrické veličiny	6
2.2.1 Elektrický náboj	6
2.2.2 Intenzita elektrického pole	7
2.2.3 Elektrický potenciál	8
2.2.4. Elektrické napětí	8
3 Rozbor piezoelektrického jevu	9
3.1 Podstata piezoelektřiny	9
3.2 Matematická formulace piezoelektrického jevu	12
3.3 Piezoelektrické materiálové konstanty	13
3.4 Piezoelektrické dielektrické konstanty	14
4 Možnosti využití piezoelektrického jevu v konstrukci senzorů	15
4.1 Dynamické senzory síly	15
4.2 Senzory pro měření točivého (kroutícího) momentu	17
4.3 Senzory pro měření vibrací	18
5 Přehled senzorů	19
5.1 Dynamické senzory síly	19
5.1.1 Senzory firmy PCB PIEZOTRONICS	19
5.1.2. Senzory firmy KISTLER	22
5.2 Senzory kroutícího (točivého) momentu	23
5.2.1 Senzory firmy PCB PIEZOTRONIC	23
5.2.2 Senzory firmy KISTLER	24
5.3 Senzory pro měření vibrací	24
5.3.1 Senzory firmy SMS (Sensor Modular Systems)	24
6 Konkrétní příklad aplikace piezoelektrického senzoru	25

1 Úvod

Piezoelektrina ¹ je slovo, které pochází z řeckého jazyka, a znamená „elektřina vznikající působením tlaku“ (piezo, znamená tlak). Tento úkaz byl objeven bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými v roce 1880 (Pierre Curie, Nobelova cena za fyziku, 1903), kteří se zabývali krystalografií a v roce 1881 byl tento úkaz nazván W.G. Hankelem piezoelektrickým jevem. Bratři Curieové zjistili pozorováním, že pozitivní a negativní náboj vzniká na některých plochách krystalu, když je vystaven tlaku v různých směrech, tedy při mechanickém namáhání, tj. například tlak, tah, ohyb, krut, smyk a další. Mechanickým namáháním piezoelektrického krystalu nebo jiného vhodného piezoelektrického materiálu se na stlačených plochách objeví elektrické napětí od nekompenzovaného náboje. Jedná se o polarizaci látky tlakem, kde napětí bývá v řádech 10^{-7} V/Pa.

Piezoelektrický jev se projevuje pouze v krystalech, kde jejich elementární buňky nemají elektrický střed symetrie, to je struktura, ve které se neshodují centra elektrického náboje a z tohoto vyplývá vznik dipólu.

2 Základní pojmy

2.1 Mechanické veličiny

2.1.1 Síla

Síla, nebo-li zákon síly, který je druhým Newtonovým pohybovým zákonem², vychází z poznatku, že síla působící na těleso vyvolá změnu rychlosti tělesa, změnu jeho hybnosti. Newton formuloval druhý zákon takto : časová změna hybnosti tělesa je přímo úměrná výslednici všech vnějších sil působících na těleso a má s ní totožný směr. Tato věta lze vyjádřit následující rovnicí:

$$kF = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1)$$

kde F je výsledná síla působící na těleso (hmotný bod). Konstanta k závisí na jednotkách, v nichž měříme veličiny m , což je hmotnost hmotného bodu a v , jež je vektor rychlosti hmotného bodu. V soustavě SI volíme konstantu $k = 1$.

Z Einsteinovy teore relativity vyplývá, že hmotnost tělesa roste s rostoucí rychlostí jeho pohybu. U těles, pohybujících se rychlostí mnohem menší než je rychlost světla ve vakuu (pouze takovou rychlost budeme uvažovat), se však vzrůst jejich hmotnosti s rychlostí prakticky neprojevuje, a proto jí budeme považovat za konstantní. Potom druhý pohybový zákon bude mít tvar:

$$F = ma = \frac{d^2r}{dt^2}m = \frac{dv}{dt}m \quad (2)$$

Jednotkou síly je newton : $[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{N}$, je to síla která tělesu o hmotnosti 1kg uděluje zrychlení 1ms^{-2} .

2.1.2 Tlak

Tlak je fyzikální veličina³, obvykle se označuje symbolem p (z anglického *pressure*). Tlak je vyjádřen poměrem velikosti síly F , působící kolmo na rovinnou plochu rovnoměrně a spojitě. Tato plocha je označována symbolem S . Vyjádření tlaku je následující :

$$p = \frac{F}{S} \quad (3)$$

pokud není síla² F rozložena rovnoměrně (tlak není prostý), pak veličinu p nazýváme jako střední tlak. Tento tlak, působící v jistém bodě plochy S , vyjádříme diferenciálním podílem:

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (4)$$

Jednotka tlaku je pascal : $[p] = [F]/[S] = N \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = 1Pa$. Ve stlačitelných látkách způsobuje tlak deformaci. Při působení tlakové síly na pevné těleso se rozlišuje tah a tlak. Tahová síla způsobuje roztahování tělesa, tlaková naopak jeho stlačování. Tahové a tlakové účinky se liší pouze směrem působení, přičemž se předpokládá, že způsobené deformace jsou obdobné, avšak s opačnými znaménky.

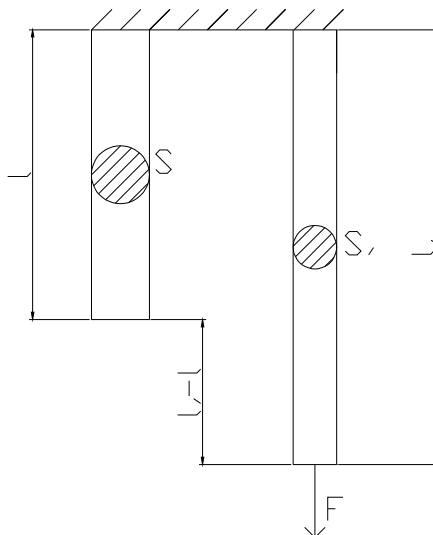
2.1.3 Deformace

Deformace² je veličina, která charakterizuje změnu vzdálenosti částic tělesa. Nastává vlivem napětí, kterým na těleso působíme. Uvažujeme-li jednorozměrný případ, tyč původní délky l je prodloužena na délku l' , pak platí výraz pro relativní prodloužení :

$$\varepsilon = \frac{l' - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

Jednorozměrné problémy deformace řešil Hooke, který ve svých pokusech používal homogenní tyč (Obr. 1) o délce l a konstantního příčného průřezu S , na jednom konci upevňovaná, na druhém konci zatěžovaná silou F . Síla F se ruší s reakcí upevnění a proto je deformovaná tyč v klidu. Každá část zatížené tyče je namáhána stejně velkou silou F , která

způsobila prodloužení tyče o $\Delta l = l' - l$ jenž souvisí s rovnicí (5). Relativní (poměrné) prodloužení tyče ε , udává číselné prodloužení tyče jednotkové délky. Podíl působící síly F a plošného obsahu S průřezu nezatížené tyče kolmého k působící síle je normálové napětí σ . Výraz pro normálové napětí je :



Obr. 1 Prodloužení tyče

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (6)$$

Souvislost mezi napětím a deformací materiálu až do meze úměrnosti vyjadřuje Hookův zákon pro tlak (tah):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

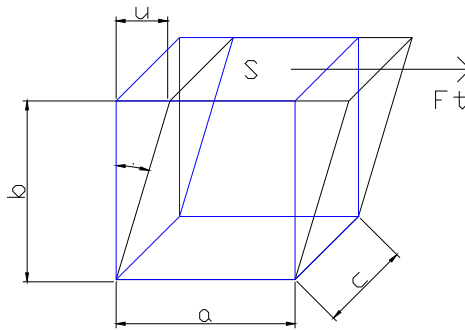
kde konstanta úměrnosti E je modul pružnosti v tahu, tedy Yangův modul. Modul pružnosti E stejně jako napětí σ mají stejnou jednotku ($\text{Nm}^{-2} = \text{pascal}$), protože ε je jednotkou bezrozměrnou.

2.1.4 Smyk

Smyk² je namáhání tuhého tělesa prostým smykem, nebo stříhem. Při tomto namáhání se rovnoběžné vrstvy namáhaného materiálu navzájem posouvají, avšak kolmá vzdálenost se nemění. Na Obr. 2 je malý, původně kolmý hranolek, namáhán na smyk. Jeho výška b nechť

je dosti kolmá aby nenastal ohyb. Při namáhání hranolku smykem se nezměnila vzdálenost mezi hmotnými částicemi v jednotlivých vrstvách, rovněž se nezměnila vzdálenost mezi vrstvami.

Tečné napětí (napětí ve smyku) τ je podíl tečné síly F_t , působící v rovině S horní stěny hranolku, tj. v tečném směru k ploše S a velikosti této plochy :



Obr. 2 Těleso namáhané smykem

$$\tau = \frac{F_t}{S} = \frac{F_t}{a \cdot c} \quad (8)$$

Předpokládáme, že síla F_t je rovnoměrně rozložena po ploše S . Působením síly se horní stěna hranolku posune o malou vzdálenost u (předpokládáme, že dolní stěna hranolku je pevná) takže původně pravý úhel, který svíraly hrany a a b se změní o úhel γ , potom pro něj platí vztah při malých deformacích :

$$\gamma \approx \frac{u}{b} \quad (9)$$

Tento podíl u/b se nazývá zkos. Mezi tečným napětím τ a zkosem γ platí Hookův zákon pro smyk :

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (10)$$

kde G je modulem pružnosti ve smyku (modul torze), je to konstanta daného materiálu a jeho jednotkou je stejně jako pro napětí, pascal.

2.2 Elektrické veličiny

2.2.1 Elektrický náboj

Elektrický náboj² je fyzikální veličina, která je mírou stavu elektricky nabitých těles. Elektrický náboj je značen písmenem Q a jeho jednotkou je coulomb, značeno C . Bylo experimentálně zjištěno, že každý náboj, kladný i záporný, je vždy celistvím násobkem náboje elementárního, který je nejmenším nábojem, který v přírodě existuje a je dále nedělitelný. Elementární náboj je značen e a jeho hodnota je $1,602 \cdot 10^{-19} C$.

Zákony o elektrických nábojích se odvodily zkušenostmi, zmíníme se pouze o Coulombově zákoně jehož definice zní takto: pokud bodový náboj Q působí na jiný bodový náboj Q' silou F , jejíž velikost je přímo úměrná sočinu velikostí obou nábojů a nepřímo úměrná čtverci jejich vzdáleností r , můžeme napsat:

$$F = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0 \quad (11)$$

kde $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} kg^{-1}m^{-3}s^4A^2 = 8,8542 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ je elektrická konstanta (permitivita), r^0 je jednotkový vektor příslušný vektoru r , jenž je vedený od náboje Q k náboji Q' . Další možnost zápisu Coulombova zákona⁴ je :

$$F = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 r^3} r \quad (12)$$

kde $r^0 = \frac{r}{[r]} = \frac{r}{r}$. Pokud chceme charakterizovat prostředí ve kterém na sebe náboje působí, použijeme relativní permitivitu ϵ_r , která vyjadřuje kolikrát je permitivita daného prostředí větší, než permitivita vakua, potom platí:

$$F = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^3} r \quad (13)$$

2.2.2 Intenzita elektrického pole

Kolem každého elektricky nabitého náboje (nabitého tělesa) se tvoří elektrické pole. Intenzita elektrického pole² je vektor, jehož směr je shodný se směrem síly, která působí na kladný bodový náboj Q' a nezávisí na velikosti Q' . Představíme-li si sondu, nabitou kladným nábojem Q' , kterou postupně vkládáme do různých míst elektrického pole, potom můžeme v každém místě zjistit sílu (směr i velikost). Pole sondy ve vyšetřovaném místě působí na malý bodový náboj Q' . Na základě této představy se zavádí veličina intenzita elektrického pole E , v daném bodě pole jako podíl síly F , kterou působí pole v tomto bodě na libovolný bodový náboj Q' :

$$E = \frac{F}{Q'} \quad (14)$$

Jednotkou elektrického pole je: $[E] = [F]/[Q] = N \cdot C^{-1} = V \cdot m^{-1} = kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$.

Pokud sloučíme rovnice (11) a (14), získáme:

$$E = \frac{F}{Q'} = \frac{1}{Q'} \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0 \quad (15)$$

zde r^0 je jednotkový vektor, směřující od bodového zdroje pole Q k vyšetřovanému bodu v elektrickém poli.

2.2.3 Elektrický potenciál

Elektrický potenciál² φ definujeme jako podíl elektrické potenciální energie W_p a náboje o velikosti Q v daném místě elektrického pole. Definice lze vyjádřit vztahem :

$$\varphi = \frac{W_p}{Q} \quad (16)$$

Jednotkou potenciálu je 1 volt = 1V. Potenciál 1 V je v tom místě pole, kde potenciální energie kladného jednotkového náboje je rovna 1 J, tedy :

$$[\varphi] = V = \frac{J}{C} = \frac{Ws}{As} = \frac{W}{A} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}.$$

2.2.4. Elektrické napětí

Napětí jenž vyjadřuje velikost napětí mezi dvěma body A a B , vyjádříme za pomoci elektrického potenciálu².

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (17)$$

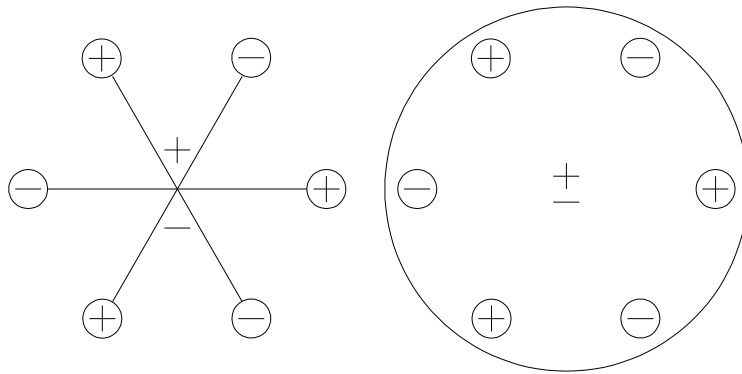
Jednotkou napětí je, stejně jako u elektrického potenciálu, volt. Pro případ, že $\varphi_B = 0$ bude $U_{AB} = \varphi_A$, a $A = \varphi_A \cdot Q$. Tuto definici potenciálu lze také vyjádřit: potenciál φ je roven podílu práce A , kterou vykonají síly pole při přemístění náboje Q z daného místa pole do místa, kde je potenciál nulový.

$$\varphi = \frac{A}{Q} = \frac{W}{Q} \quad (18)$$

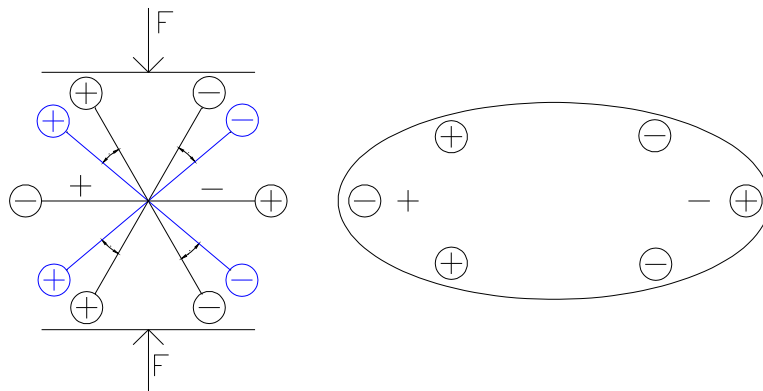
3 Rozbor piezoelektrického jevu

3.1 Podstata piezoelektriny

Piezoelektrický efekt¹ je založen na elastické deformaci a orientaci elektrických dipólů v krystalové struktuře. Přiložením vnější mechanické síly na křemíkový krystal se deformují dipóly a na povrchu tohoto krystalu, tak vzniká náboj, nebo-li přímý piezoelektrický efekt. Oproti tomu přiložením elektrického pole na povrch krystalu způsobí deformaci dipólů, tím vzniká konstantní intenzita mechanického napětí, které je známé pod názvem inverzní piezoelektrický efekt.

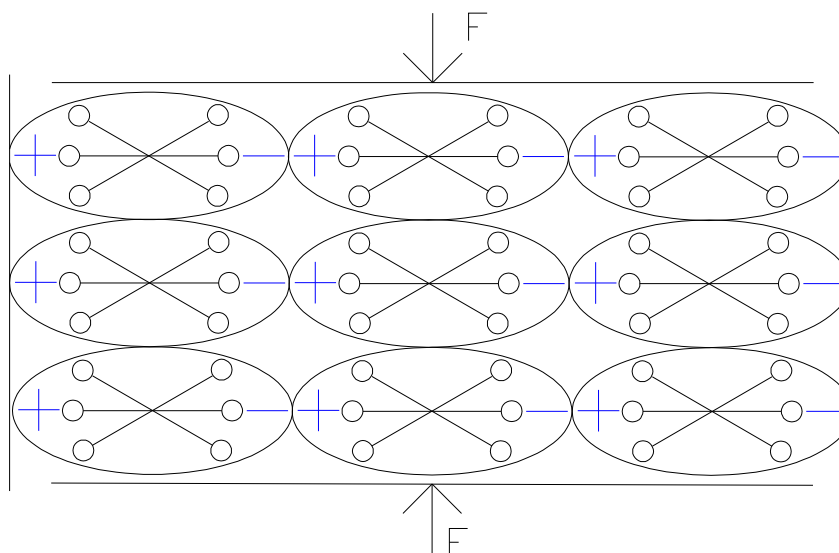


Obr. 3 Molekulární model bez působení vnější síly



Obr. 4 molekulární model na nějž působí vnější síla

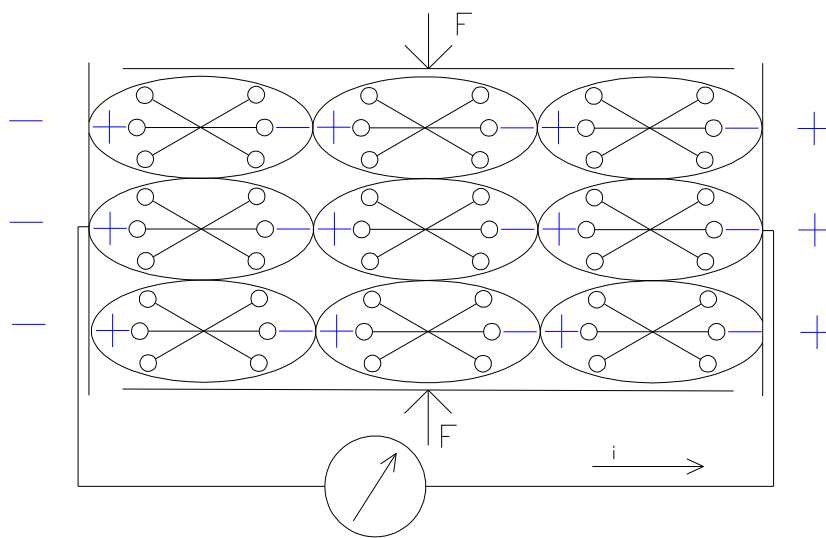
Obr. 3 ukazuje jednoduchý molekulární model křemíkového krystalu, na který nepůsobí vnější síla, což vysvětluje generování elektrického náboje. V případě, že zde nepůsobí vnější síla, jsou negativní a pozitivní molekuly krystalu vzájemně v klidu, to znamená, že molekulární model v tomto stavu nevytváří náboj (elektricky neutrální náboj). Pokud působíme vnější silou na tento model (Obr. 4), jeho vnitřní struktura se změní, je deformovaná, a způsobuje separaci kladných a záporných molekul (posuv molekul) a tím vzniká malý dipól. Pokud směr pólů v materiálu je vzájemně anulován a rozdělení zřetězených nábojů se objevuje na povrchu materiálu (Obr. 5), potom můžeme o materiálu říci, že je polarizován. Tato polarizace je generována elektrickým polem a může být použita, jako přeměna mechanické energie použité na deformaci materiálu za pomoci vnější síly, v elektrickou energii.



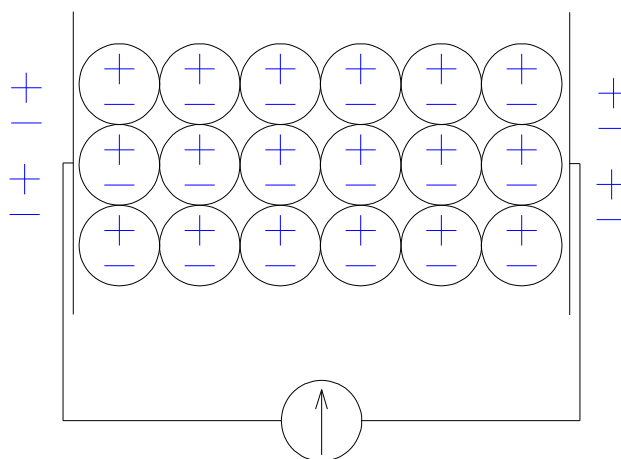
Obr. 5 polarizovaný efekt na povrch materiálu

Obr. 6 představuje piezoelektrický materiál, na který je aplikovaná vnější síla. Dvě kovové desky jsou použity jako elektrody umístěné na povrchu materiálu, kde se objevuje zřetězený náboj opačného znaménka. Předpokládejme, že tyto elektrody jsou spojeny přes galvanometr tenkým krátkým drátkem. Když vynaložíme tlak (sílu) na piezoelektrický materiál v podobě krystalu, potom se hustota zřetězeného náboje objeví na povrchu krystalu v místě kontaktu s elektrodami. Tato polarizace generuje elektrické pole, které způsobuje tok volných nábojů ve vodiči. V závislosti na znaménku se volné náboje pohybují směrem, kde je zřetězený náboj vytvářený krystalovou polarizací a má opačné znaménko. Tento tok volných nábojů zůstává do chvíle, kdy volné náboje neutralizují polarizační efekt při působení vnější

síly (Obr. 6). V okamžiku, kdy přestane na krystal působit síla, polarizace zmizí, a tok volných nábojů se otočí, volné náboje se vracejí zpět do výchozího ustáleného stavu (Obr. 7). Tento proces může být zobrazen galvanometrem, který bude zobrazovat dvě různá znaménka aktuálního průběhu. Pokud je do okruhu připojen odpor a na krystal působíme měnícím se tlakem (pulzující silou), odporem bude protékat proud. Potom dochází k přeměně mechanické energie v elektrickou.



Obr. 6 Piezoelektrický jev s krátkým okruhem při působení vnější síly



Obr. 7 Piezoelektrický jev s krátkým okruhem bez působení vnější síly (ustálený stav)

Jak již bylo výše zmíněno, bratři Curiové ověřili existenci inverzního procesu. Tedy kromě přímého piezoelektrického efektu, který generuje elektrický náboj a také elektrické pole pro některé materiály a při jistých zákonitostech vlivem namáhání, může existovat

opačný piezoelektrický efekt. Opačný piezoelektrický efekt vzniká za obdobných okolností jako přímý piezoelektrický efekt s tím rozdílem, že aplikujeme na krystal elektrické pole. Budeme tedy polarizovat volné nosiče nábojů a tím by měla vzniknout deformace v tomto materiálu.

Opačný piezoelektrický efekt se většinou vztahuje na konstrukci akčních prvků. Avšak stejně, jako přímý piezoelektrický efekt, tak i efekt opačný se v praxi využívá z důvodů závislosti síly působící na krystal a výsledného náboje, kde je tato závislost přímo úměrná, protože tlak působící na materiál s piezoelektrickými vlastnostmi generuje náboj úměrný tlaku. Pro senzory, popřípadě čidla, musíme signál z krystalu upravit vhodným převodníkem, protože vyprodukovaný náboj není vhodná veličina, tak se obvykle používají převodníky jejichž výstup je ve voltech, tím tedy převádíme náboj na napětí.

Kromě přírodních piezoelektrických prvků, jakým je například křemen, existuje uměle vytvořený materiál, který se nazývá piezokeramika. Piezokeramika⁵ je materiál vytvořený spečením zrn nějaké piezoelektrické látky (nejdůležitější má označení PZT a je tvořen tuhým roztokem PbZrO_3 a PbTiO_3). Vzhledem k zrnitému charakteru materiál po spečení piezoelektrický jev nevykazuje, protože jsou jednotlivá zrna orientovaná náhodně a jejich účinek se vzájemně ruší. Proto se po výrobě provádí tzv. orientace, při které se materiál zahřeje na zvýšenou teplotu a vnoří se do elektrického pole vhodného směru. Tato orientace není bohužel trvalá, ale dochází k jejímu poklesu s časem (depolarizaci), zvláště je-li materiál vystaven vyšším teplotám. Na zabránění depolarizace je nejvhodnější pravidelné využívání piezokeramiky, protože pod pracovním napětím se materiál cyklicky orientuje.

3.2 Matematická formulace piezoelektrického jevu

Při experimentech bratři Curierové demonstrovali, že povrchová hustota zřetězeného náboje je úměrná vynaložené síle (tlaku), a stejně tak vymizí. Toto může být formulováno, tak že piezoelektrický polarizační vektor¹ P_p , jehož velikost je úměrná povrchové hustotě zřetězeného náboje přes požadovaný povrch, kde d je piezoelektrický koeficient deformace a T je síla (tlak) které je piezoelektrický materiál vystaven.

$$P_p = d \cdot T \quad (19)$$

Bratři Curieové bratři ověřovali také reverzní piezoelektrický efekt a dokázali, že poměr mezi vytvořenou deformací a velikostí působení elektrického pole v reversibilním směru, je tedy roven vztahu vyrobené polarizace a velikosti aplikované deformace. Reverzní piezoelektrický efekt se vyjadřuje tak, že deformace S_p působící na materiál je rovna součinu piezoelektrického koeficientu d a velikosti aplikovaného elektrického pole E .

$$S_p = d \cdot E \quad (20)$$

Přímý a reversní piezoelektrický efekt se dá také formulovat vzhledem k elastickým vlastnostem materiálu takto:

$$P_p = d \cdot T = d \cdot c \cdot S = e \cdot S \quad (21)$$

$$T_p = c \cdot S_p = c \cdot d \cdot E = e \cdot E \quad (22)$$

kde c je materiálová konstanta, která souvisí s napětím vytvořenou deformací ($T = c \cdot S$), s je koeficient, který závisí na deformaci vytvořené napětím ($S = s \cdot T$), e je piezoelektrická konstanta. Síly a deformace způsobené piezoelektrickým efektem jsou označeny indexem p .

3.3 Piezoelektrické materiálové konstanty

Piezoelektrický jev způsobuje a zvyšuje tuhost materiálu. Pro pochopení tohoto efektu předpokládáme, že piezoelektrický materiál je závislý na deformaci S . Tato deformace bude mít dva účinky. Na jedné straně bude vytvářet elastické napětí T_e úměrné mechanické deformaci $T_e = c \cdot S$ a na druhé straně vytváří piezoelektrickou polarizaci dle $P_p = e \cdot S$. Tato polarizace vytváří vnitřní elektrické pole v materiálu E_p :

$$E_p = \frac{P_p}{\varepsilon} = \frac{e \cdot S}{\varepsilon} \quad (23)$$

kde ε je permitivita materiálu.

Toto elektrické pole vytváří sílu proti deformaci elektrické materiálové struktury a vytváří sílu $T_p = e \cdot E_p$, která působí proti materiálové deformaci.

$$T = T_e + T_p = c \cdot S + \frac{e^2}{\varepsilon} \cdot S = \left(c + \frac{e^2}{\varepsilon} \right) \cdot S = \bar{c} \cdot S \quad (24)$$

kde \bar{c} je piezoelektrická konstanta¹ tuhosti, která zahrnuje vzrůst hodnoty materiálové konstanty náležící piezoelektrickému efektu.

3.4 Piezoelektrické dielektrické konstanty

Pokud vnější elektrické pole E je aplikováno mezi dvě elektrody, kde permitivita materiálu ε existuje, elektrický posuv je vytvořen mezi těmito elektrodami a vytváří povrchový náboj o hustotě $\sigma = \sigma_o + \sigma_p$, jehož velikost je $D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot E + \chi \cdot E = \sigma_o + \sigma_p$, kde ε_0 je permitivita vakua a χ dielektrická konstanta materiálu. Pokud je materiál piezoelektrický, elektrické pole o intenzitě E vytváří napětí dané rovnicí: $S_p = d \cdot E$. Toto napětí piezoelektrického původu zvětšuje hustotu povrchového náboje díky polarizaci náboje, která je dána rovnicí: $P_p = e \cdot S_p = e \cdot d \cdot E$. Protože elektrické pole je udržováno konstantní, piezoelektrická polarizace zvyšuje elektrický posuv volných nábojů směrem k elektrodě o stejné velikosti ($\sigma_p = P_p$), proto celkový elektrický posun je :

$$D = \varepsilon \cdot E + P_p = \varepsilon \cdot E + e \cdot d \cdot E = \bar{\varepsilon} \cdot E \quad (25)$$

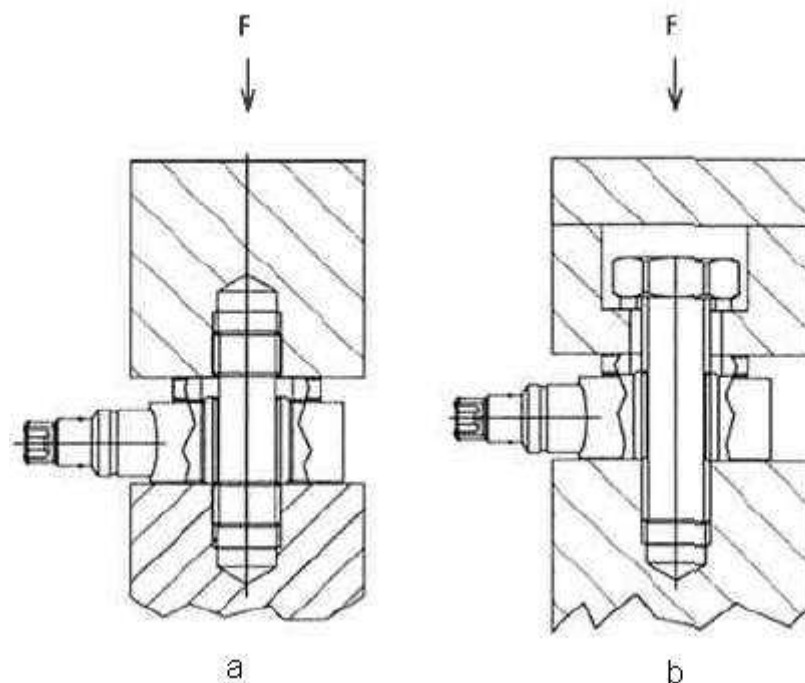
kde $\bar{\varepsilon}$ je užitečná permitivita, která zahrnuje piezoelektrický příspěvek¹.

4 Možnosti využití piezoelektrického jevu v konstrukci senzorů

4.1 Dynamické senzory síly

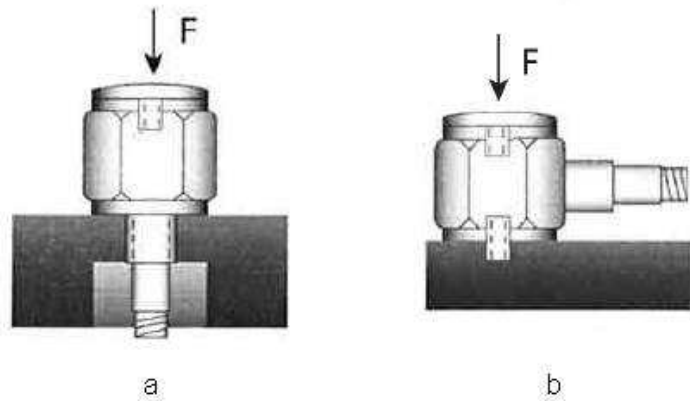
Piezoelektrického jevu se využívá především pro jeho konstrukční jednoduchost, a tedy má vyšší spolehlivost v praxi, například pro měření řezné síly u strojů, které stříhají kovové materiály. Další využití mají piezoelektrické senzory v testování produktů a materiálů, dynamické vážení jedoucích vozidel atd..

Typická aplikace prstencových dynamických senzorů⁶ síly je ukázána viz. Obr. 8. Aplikace prstencových dynamických senzorů, z něhož je vidět, že takto provedený senzor je možné umístit za pomoci kolíku (Obr. 8a) vhodného průměru kde v závislosti na použití kolíku je celková působící síla částečně ztracena (maximálně do 5% při použití berylium-měděného kolíku a do 50% při použití ocelového kolíku). Další možnost umístění je za pomoci šroubu (Obr. 8b), v tomto případě zde ke ztrátám silových účinků nedochází. Toto provedení se používá především ke kalibraci senzorů se třemi osami.



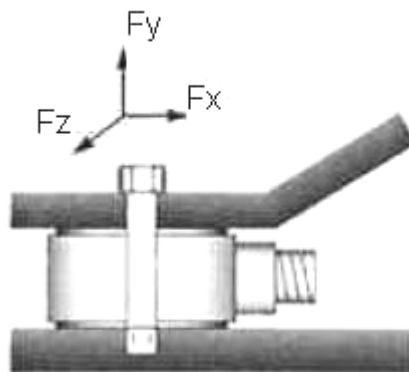
Obr. 8 Aplikace prstencových dynamických senzorů

Volně umístěné senzory jsou vyráběny ve dvou provedeních⁷, a to s axiálním konektorem (Obr. 9 a) a v klasickém provedení s klínem a bočně vyvedeným konektorem (Obr. 9 b).



Obr. 9 Volně umístěné dynamické senzory

Tří osá čidla jsou schopná měřit síly ve třech ortogonálních rovinách (X, Y a Z). Tyto senzory jsou složeny ze třech křemenných plátů, které jsou umístěny ve vhodném uspořádání. Pro každou rovinu je jeden křemenný plát který měří sílu v daném směru. Příklad instalace čidla je znázorněná na Obr. 10.



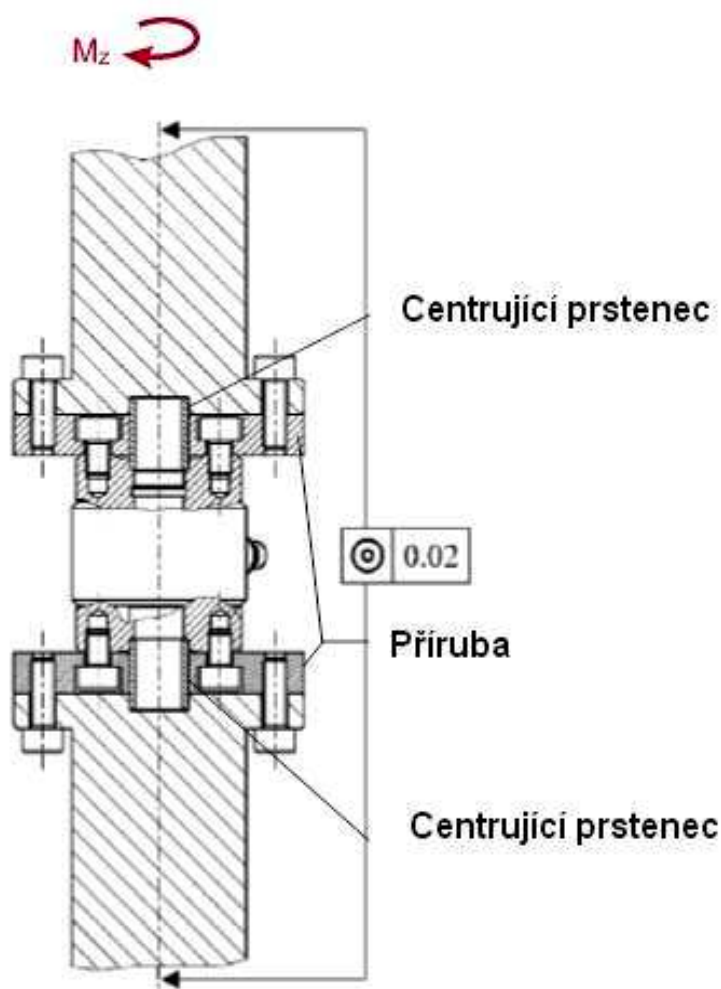
Obr. 10 Umístění 3-osých šenzorů

4.2 Senzory pro měření točivého (kroucího) momentu

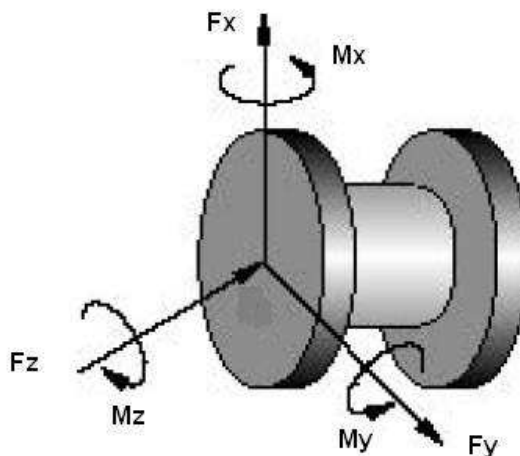
Tyto senzory mají své uplatnění v automobilovém průmyslu, pomáhají především ve vývoji automobilů. U automobilů se tyto senzory používají pro zvýšení bezpečnosti, tedy pro testování a vývoj následujících komponentů automobilů⁷: brzdící systémy, pneumatiky, cash testy, jízdní komfort a výkon motoru.

Tyto senzory jsou konstruovány na krut a jejich instalace je dle obrázku Obr. 11, kde je znázorněno, že tyto senzory se musí instalovat s určitou přesností na soustřednost.

Další typy těchto senzorů jsou senzory, které měří moment ve více osách. Využívají se při složitějších měřeních, například nosníků konstrukcí atd.. Náčrt tohoto typu senzoru je na Obr. 12, ze kterého je zřejmé, že můžeme měřit zároveň sílu a kroucí momenty ve třech rovinách (X, Y, Z).



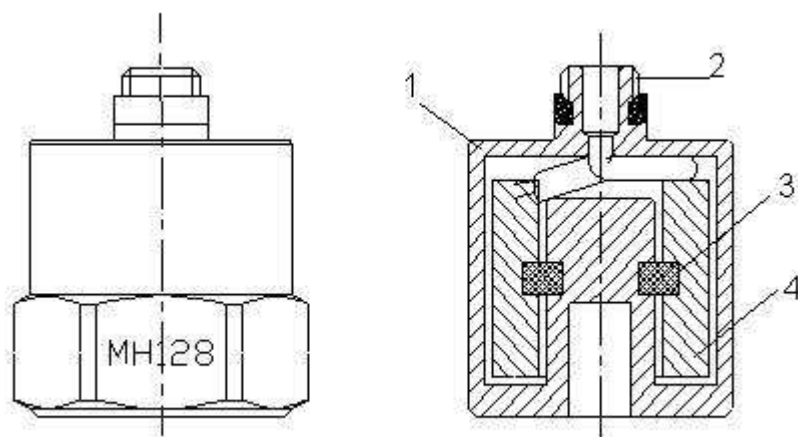
Obr. 11 Instalace senzoru pro kroucí moment



Obr. 12 Senzor kroučícího momentu (čtyři osy)

4.3 Senzory pro měření vibrací

Seizmická čidla⁸ jsou předurčena pro obecné použití pro vibrační měřicí techniku a monitorování. Aplikují se především na stacionární zařízení, kde se monitorují vibrace, které tyto stacionární zařízení produkují. Pro jejich malou citlivost na teplotu a magnetické pole se také používají pro měření tzv. klepání motoru, naopak mají vysokou citlivost na rezonanční frekvence a jsou značně stabilní. Pro klepání motoru⁹ působí seizmická hmota senzoru svou setrvačností a tlačnými (smykovými) silami na piezoelektrický prvek, působením hmoty dochází k mechanickému namáhání piezoelektrického prvku a tím vzniká náboj mezi jeho hranami. Konstrukce seizmických čidel je velmi jednoduchá a je viditelná na Obr. 13, těleso senzoru {1} je z antikorozi ocele, zdířka je tvořena koaxiálním konektorem {2}. Aktivním prvkem senzoru je smykově namáhaný piezoelektrický kroužek {3} v mezikruží modelu. Vyrovnání elektřiny, jenž vytváří teplo, je zajištěno speciálním systémem elektrod a jejich vzájemně vhodného spojení. Seizmické těleso {4} a rozměry piezoelektrického elementu je umístěno a vhodně navrženo, pro dobrou citlivost, vysokou rezonanční frekvenci a vhodnou ochranu před úderem.



Obr. 13 Konstrukční řešení seizmického čidla firmy SMS (Sensor Modular Systems)

5 Přehled senzorů

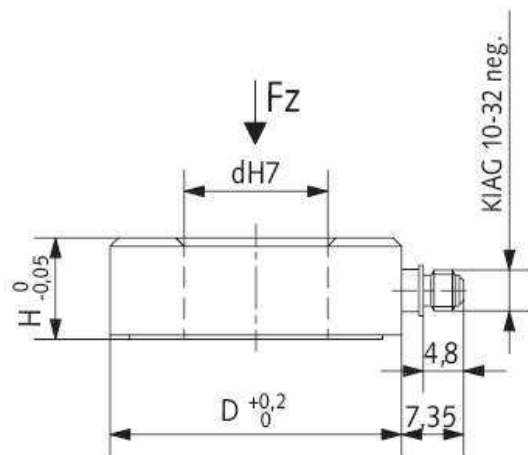
5.1 Dynamické senzory síly

5.1.1 Senzory firmy PCB PIEZOTRONICS

Pro prstencové senzory¹⁰ byly vybrány dva modely firmy PCB PIEZOTRONIC: 201B01 a 201A76. Základní parametry těchto senzorů jsou uvedeny viz. Tab. 1. Rozměrové umístění uvedeno na Obr. 14.

Tab. 1 Prstencové senzory firmy PCB PIEZORTONIC

Prstencové senzory		Model	201B01	201A76
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%)		mV/kN	112405	224,8
Měřicí pásmo (stlačení)		kN	0,04448	22,24
Přetížení (stlačení)		kN	0,267	22,24
Teplotní rozsah		°C	od -54 do 121	od -54 do 121
Váha		g	10	7
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	0,054	0,054
Rozměry	Vnitřní průměr [d]	mm	6	6
	Vnější průměr [D]	mm	16,5	19,05
	Výška [H]	mm	7,9	5,08

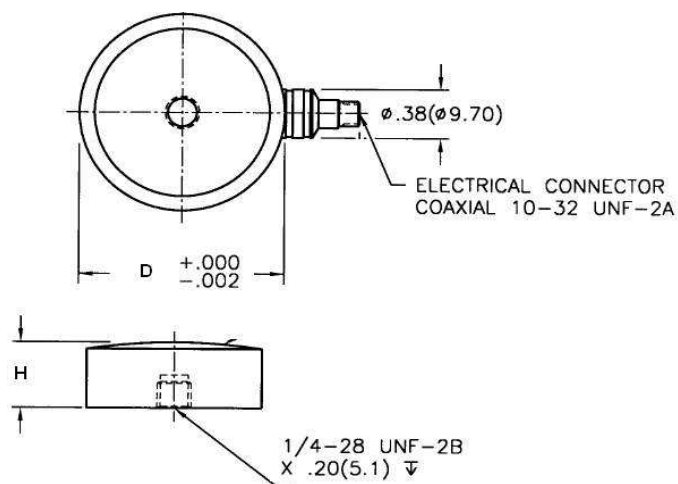


Obr. 14 Rozměry pro prstencové senzory

Přehled volně uložených senzorů viz. Tab. 2, jejich rozměry viz. Obr. 15.

Tab. 2 Volně umístěné senzory firmy PCB PIEZOTRONIC

Volně umístěné senzory	Model	200B01	200B02	200B03	200C20	200C50	
Parametry	SI						
Citlivost (+-15%)	mV/kN	112,41	11,241	2248,2	56,2	22,48	
Měřicí pásmo (stlačení)	kN	0,04448	0,4448	2,224	88,96	222,4	
Přetížení (stlačení)	kN	0,6672	2,669	13,345	133,44	333,6	
Teplotní rozsah	°C	od -54 do 121	od -54 do 121	od -54 do 121	od -54 do 121	od -54 do 121	
Váha	g	14	14	14	88	280	
Teplotní koeficient citlivosti	%/°C	0,054	0,054	0,054	0,144	0,27	
Rozměry	Průměr	mm	16,51	16,51	16,51	38,1	53,9
	Výška	mm	9,14	9,14	9,14	12,7	19

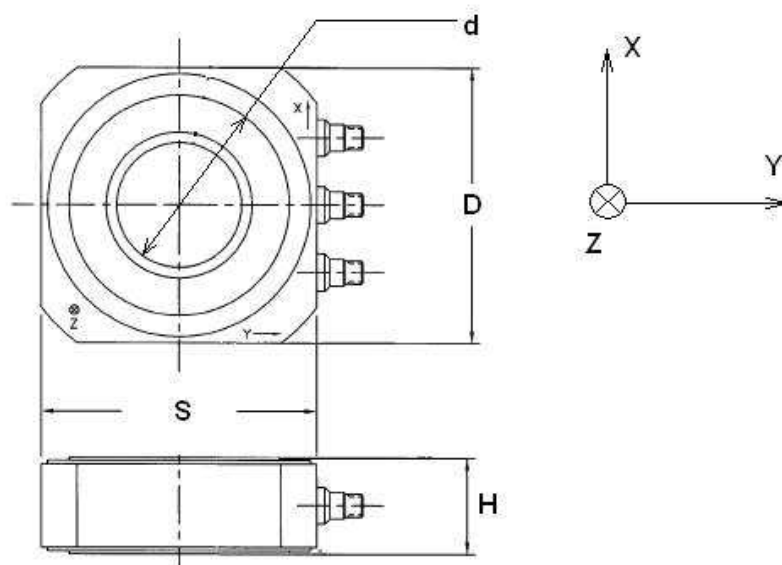


Obr. 15 Rozměry pro volně uložené senzory

Senzory se třemi osami a jejich přehled viz. Tab. 3. Jejich rozměrové rozmístění Obr.16.

Tab. 3 3-osé senzory firmy PCB PIEZOTRONIC

3-osé senzory		Model	260A11	260A13
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%) pro osy	Z	pC/N	3,37	3,37
	X a Y	pC/N	7,19	7,19
Měřicí pásmo (stlačení) pro osy	Z	kN	4,45	44,48
	X a Y	kN	2,22	17,7
Přetížení (stlačení) pro osy	Z	kN	5,87	48,93
	X a Y	kN	2,94	19,57
Teplotní rozsah		°C	od -73 do 177	od -73 do 177
Váha		g	24,59	280
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	-	-
Rozměry	Vnitřní průměr [d]	mm	8	25
	Délka [D]	mm	24,1	57,1
	Šířka [S]	mm	24,1	57,1
	Výška [H]	mm	9,9	20,07



Obr. 16 Rozměrové umístění pro 3-osé senzory

5.1.2. Senzory firmy KISTLER

Přehled vybraných prstencových senzorů¹¹ firmy KISTLER viz. Tab.4, rozměrové umístění, jako v případě senzorů firmy PCB PIEZOTRONIC (Obr. 14).

Tab. 4 Prstencové senzory firmy KISTLER

Prstencové senzory		Model	9011A	9021A
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%)		pC/N	4,3	4,3
Měřicí pásmo (stlačení)		kN	15	35
Přetížení (stlačení)		kN	18	42
Teplotní rozsah		°C	od - 196 do 200	od - 196 do 200
Váha		g	7	20
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	0,02	0,02
Rozměry	Vnitřní průměr [d]	mm	6,5	10,5
	Vnější průměr [D]	mm	14,5	22,5
	Výška [H]	mm	8	10

Přehled senzorů pro měření ve třech osách firmy KISTLER je uveden viz. Tab. 5, jejich rozměrové umístění je na Obr. 16.

Tab. 5 3-osé senzory firmy KISTLER

3-osé senzory		Model	9251A	9067
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%) pro osy	Z	pC/N	4	3,8
	X a Y	pC/N	8	8
Měřicí pásmo (stlačení) pro osy	Z	kN	5	40
	X a Y	kN	2,5	20
Přetížení (stlačení) pro osy	Z	kN	6	44
	X a Y	kN	3	22
Teplotní rozsah		°C	od -60 do 150	od -50 do 150
Váha		g	32	270
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	0,02	0,02
Rozměry	Vnitřní průměr [d]	mm	8,1	26,5
	Délka [D]	mm	24	56
	Šířka [S]	mm	24	56
	Výška [H]	mm	10	20

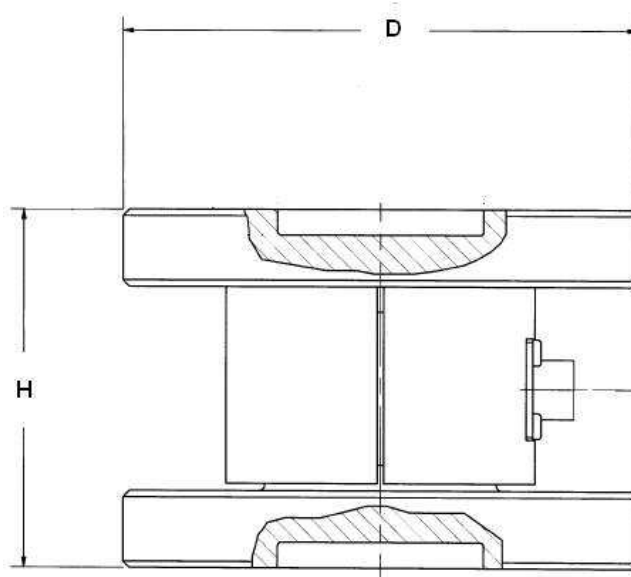
5.2 Senzory kroučícího (točivého) momentu

5.2.1 Senzory firmy PCB PIEZOTRONIC

Vybrané senzory firmy PCB PIEZOTRONIC¹⁰ viz. Tab.6 (jejich rozměrové umístění je na Obr. 17).

Tab. 6 Senzory kroučícího momentu firmy PCB PIEZOTRONIC

Senzory kroučícího momentu		Model	2301-01A	2302-01A
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%)		pC/Nm	2000	2000
Měřicí pásmo (stlačení)		Nm	225	1130
Přetížení (stlačení)		Nm	340	1700
Teplotní rozsah		°C	od -54 do 93	od -54 do 93
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	0,0036	0,0036
Rozměry	Průměr [D]	mm	101,6	127
	Délka [L]	mm	76,2	88,9



Obr. 17 Rozměry senzorů kroučícího momentu

5.2.2 Senzory firmy KISTLER

Senzory¹¹ jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7), a umístění jejich rozměrů viz. Obr. 17.

Tab. 7 Senzory kroutícího momentu firmy KISTLER

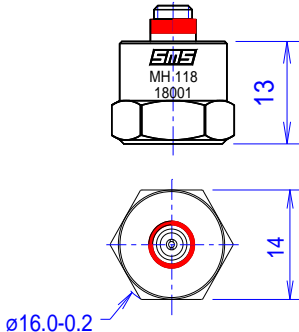
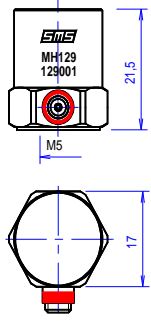
Senzory kroutícího momentu		Model	9369A	9389A
Parametry		SI		
Citlivost (+-15%)		pC/Nm	130	100
Měřicí pásmo (stlačení)		Nm	200	1000
Přetížení (stlačení)		Nm	240	1200
Teplotní rozsah		°C	od -40 do 120	od -40 do 120
Teplotní koeficient citlivosti		%/°C	0,02	0,02
Rozměry	Průměr [D]	mm	54	100
	Délka [L]	mm	60	130

5.3 Senzory pro měření vibrací

5.3.1 Senzory firmy SMS (Sensor Modular Systems)

Přehled vybraných senzorů firmy SMS⁸ (Sensor Modular Systems) a jejich rozměry jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Seizmické senzory firmy SMS (Sensor Modular Systems)

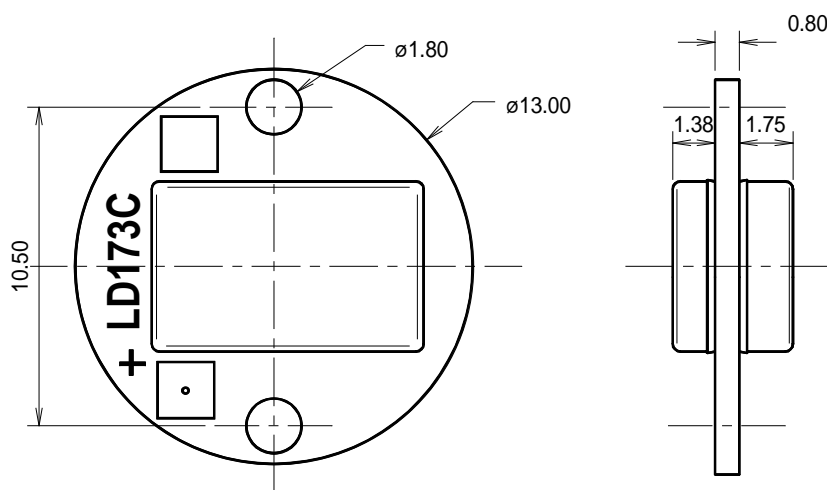
Seizmické senzory	Model	MH118	MH129
Parametry	SI		
Citlivost	mC/ms^2	1	3,16
Rezonanční frekvence	kHz	32	25
Max. otřesové zrychlení	kms^2	40	20
Teplotní rozsah	°C	od -40 do 250	od -40 do 250
Váha	g	12	25
Seizmická váha	g	3,3	10
Rozměry	mm		

6 Konkrétní příklad aplikace piezoelektrického senzoru

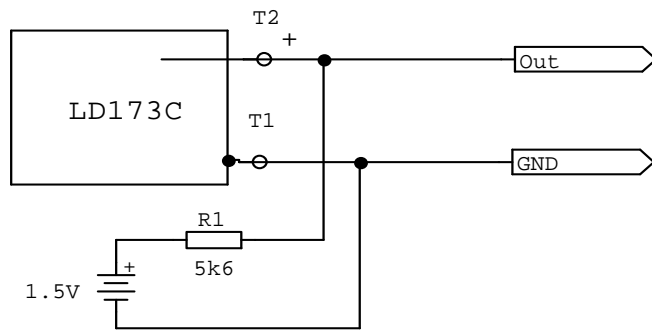
Piezoelektrické senzory se kromě jiného také používají ke komunikaci, tj. využití senzoru jako mikrofon. Například firma SMS (Sensor Modular Systems) používá piezoelektrický akcelerometr, s označením LD173C. Jde o senzor navržený pro měření vibrací¹² v jedné ose, kde měřená hodnota je zrychlení v dané ose. Základem pro tento senzor je měření akusticky vyvolaných vibrací v komunikačním rozsahu slyšitelného spektra. Tvar senzoru je přizpůsobený pro osteo-komunikační systémy.

Jak již bylo zmíněno dříve, jde o senzor, který měří vibrace a používá se především tak, že je umístěno na vrchní části hlavy a snímá vibrace lebky. Při komunikaci (mluvení) vznikají vibrace, které se šíří lebeční kostí až do přijímače a zvuk tak není v podstatě ničím rušen.

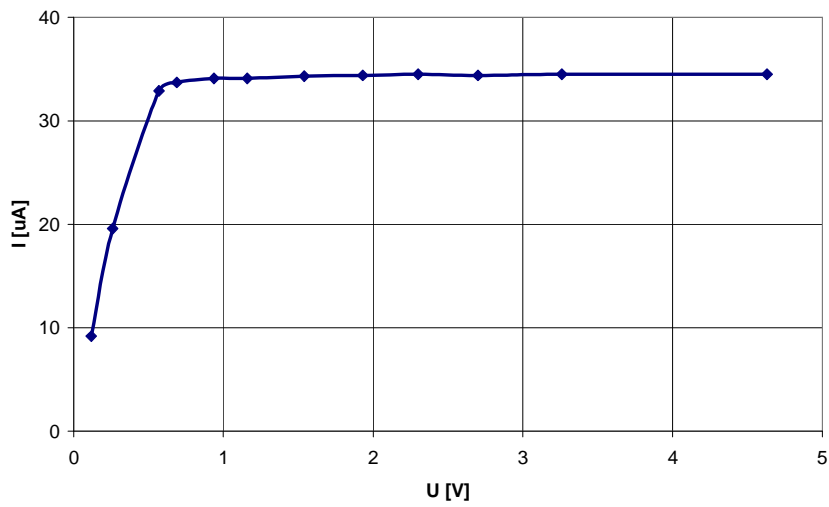
Vzhledem k velikosti (Obr. 18), tento snímač využívají zásahové jednotky, hasiči atd.. Je z pravidla umístěn v přilbě na jakémkoli místě kde výplň přilby přitlačuje senzor na lebku uživatele. Další výhodou je to, že nebrání uživateli ve výhledu a tím odpadají starosti s umístěním mikrofonu (pro různé uživatele). Nevýhoda senzoru je jeho použití v helmách motocyklistů, protože některé motocykly mají natolik silné vibrace, které jezdcovo tělo není schopno vstřebat, že se v nepřípustné míře indikují do snímače.



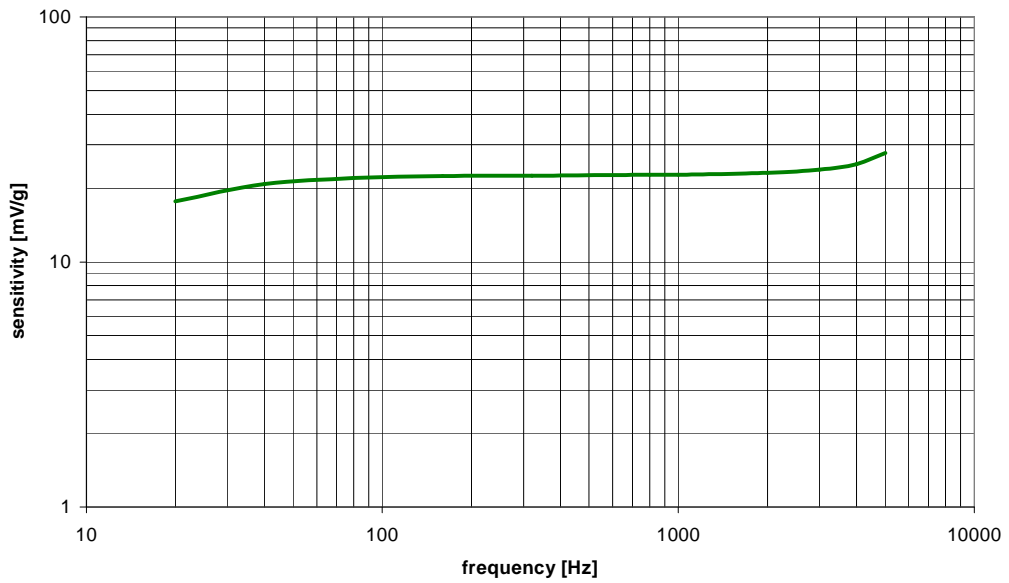
Obr. 18 Rozměry senzoru LD173C v mm



Obr. 19 Doporučené zapojení senzoru LD173C



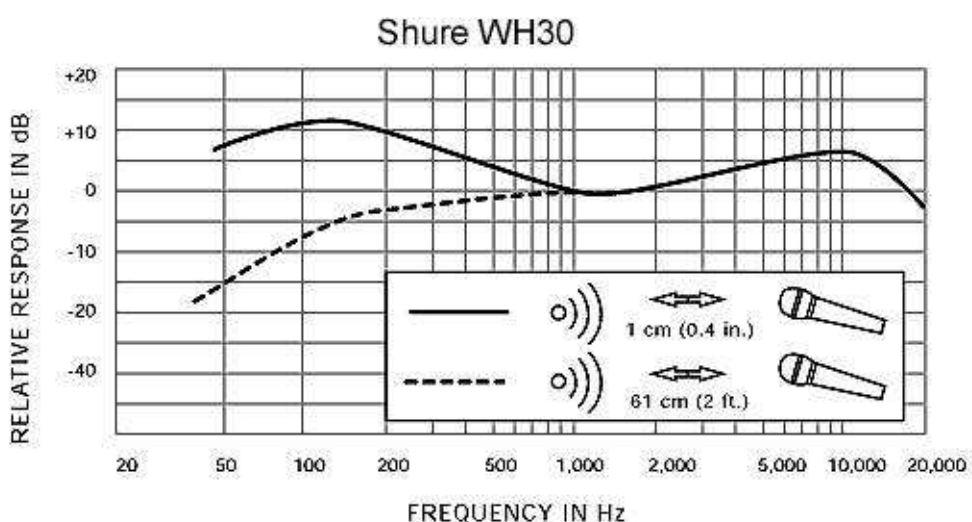
Obr. 20 Výstupní stejnosměrná charakteristika senzoru LD173C



Obr. 21 Frekvenční charakteristika senzoru LD173C

Doporučené zapojení tohoto senzoru je na Obr. 19, ze kterého je vidět připojení zdroje (1,5 V). Ve většině případů těchto čidel je potřeba výstup senzoru připojit na zesilovač, který zesílí signál na požadovanou velikost. Výstupní stejnosměrná charakteristika senzoru LD173C je znázorněna na Obr. 20, frekvenční charakteristika je na Obr. 21 (pro lidské ucho je nejcitlivější oblast v rozsahu 250-5000Hz).

Pro porovnání uvedu mikrofon s obdobným využitím firmy SHURE¹³, typ WH30XLR. Mikrofon je umístěn na hlavě přes uši, takto je zabezpečena stabilita mikrofonu, který je na pružném drátě vyveden před ústa. Frekvenční charakteristiku WH30XLR lze vidět na Obr. 22, kde jsou dvě křivky, každá křivka je pro jinou vzdálenost mikrofonu od zdroje.



Obr. 22 Frekvenční charakteristika mikrofonu WH30XLR



Obr. 23 Části mikrofonu WH30XLR

Z Obr. 23, jsou jednotlivé části mikrofonu WH30XLR. Mikrofon (1), je oddělen od pružné části (2) izolací (3), která chrání ústa před případným šokem. Pohyblivý kloub (4) umožňuje odstavení mikrofonu, tato část je napojena na hlavový nástavec (6) s drátěnou výztuží (7), z tohoto setu je vyveden kabel (5) do případného zesilovače.

Z předchozího vyplývá, že senzor LD173C je menší a tedy praktičtější pro práce, kde je potřebná příslušná pokrývka hlavy, protože zde není vyveden žádný prvek před ústa uživatele a přitom je frekvenční přenos pro komunikaci dostatečně zajištěn. Přestože z Tab. 9 nemůžeme vyčíst kolik senzor LD173C váží, můžeme z jeho rozměrů předpokládat, že bude mnohonásobně lehčí než mikrofon firmy SHURE (další data pro porovnání jsou uvedena viz. Tab. 9).

Tab. 9 Porovnání LD173C a WH30XLR

Parametr	Jednotky	SMS LD173C	SHURE WH30XLR
Frekvenční rozsah	Hz	20-5000	40-20000
Váha	g	-	65
Napájení	V	1,3-1,5	5
Výstupní impedance	Ω	4900	2400

-
- ¹ A. Arnau (Ed.). *Piezoelectric transducers and applications*. 1. vyd. Berlín: Springer-Verlag, 2004. 319 s. ISBN 3-540-20998-0.
- ² F. černý, L. Samek, B. Sopko, S. Vacková. *Fyzika I*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 123 s. ISBN 80-01-02481-4
- ³ Sborník příspěvků. Tlak. 11.3.2008 [online]. Wikipedie, dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlak>>.
- ⁴ J. Pecen. *Fyzika*. 5. vyd. Havlíčkův Brod: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2003. 543 s. ISBN 80-213-0523-1
- ⁵ V. Skácel, J. Fiedlerová, K. Nejezchleb. *Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice*. Dostupné na WWW: <<http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>>
- ⁶ PCB Group. *Product catalog: sensors for force, load, strain, and torque*. PCB Group, dostupné na WWW: <http://www.pcb.com/Linked_Documents/Force-Torque/Catalog/FTQ200G_0107.pdf>
- ⁷ PCB Group. *Product catalog: Force / torque division, model201B01*. PCB Group, dostupné na WWW: <http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/ForceTorque/products/Manuals/201B01.pdf>
- ⁸ SMS (Sensor Modular Systems). *Product catalog: Accelerometer MH/ME*. SMS
- ⁹ J. Hlaváček. *Bakalářská práce: Senzory pro automobily I*. Plzeň, 2006. Západočeská univerzita v Plzni, dostupné na WWW: <<http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/+sac/automobily1.pdf>>
- ¹⁰ PCB Group. *Internet product catalog*. PCB Group, dostupné na WWW: <<http://www.pcb.com/products/>>
- ¹¹ KISTLER . *Product catalog: force sensors*. KISTLER, dostupné na WWW: <<http://www.kistler.com/mediaaccess/en/900-350e-06.05.pdf?sid=c0a86c272329c1ab7085d1374381be44e3a3a7bed0c0&location=http://www.kistler.com/do.searchResult.gb.en-gb?content=searchResult¶m=catalog>>
- ¹² SMS (Sensor Modular Systems). *Product catalog: Accelerometer LD173C*. SMS
- ¹³ SHURE. *User guide: WH30XLR*. SHURE, dostupné na WWW: <http://www.shure.com/ProAudio/Products/WiredMicrophones/us_pro_wh30_en_ug>