

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití piezoelektrického jevu v praxi

vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.

2013

autor: Bc. Václav Koukolík

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav KOUKOLÍK**
Osobní číslo: **E11N0021K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Využití piezoelektrického jevu v praxi**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište historii a princip piezoelektrického jevu.
2. Zpracujte přehled piezoelektrických materiálů.
3. Uveďte možnosti využití piezoelektrického jevu v praxi.
4. Zhodnoťte využití a perspektivu piezoelektrik v elektrotechnických aplikacích.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Rous, B.: Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku, Praha, SNTL, 1991
2. Sodomka, L., Fiala, J.: Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi
3. Waanders, J., W.: Piezoelectric Ceramics, PhilipsComponents, 1991
4. Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na řešení piezoelektrických aplikací v praxi. Práce se zabývá historií, principem, používanými materiály a využitím piezoelektrik v jednotlivých aplikacích. Dále jsou zde popsány výhody a nevýhody použití piezoelektrických materiálů v praxi a ve stádiu výzkumu a testování.

Klíčová slova

Piezoelektrické materiály, piezoelektrický jev, piezokeramika, piezoelektrika, senzory, generátory, ultrazvuk.

Abstract

My dissertation work is focused on solution of piezoelectric application in practice. This work deals with history, principles, used materials and systems used in individual applications. In addition there are described advantages and disadvantages of individual piezoelectric materials in industry as well as in the stage of research and testing.

Key words

Piezoelectric materials, piezoelectric effect, piezoceramics, piezoelectric sensors, generators, ultrasound.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý na zpracování této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.5.2013

Václav Koukolík

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Evě Kučerové CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 HISTORIE A PRINCIP PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	11
1.1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	11
1.2 HISTORIE PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	11
1.3 PRINCIP PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	13
1.3.1 Přímý piezoelektrický jev	15
1.3.2 Nepřímý piezoelektrický jev	17
1.4 VELIČINY A KONSTANTY	18
1.4.1 Piezoelektrická nábojová konstanta	18
1.4.2 Piezoelektrická napěťová konstanta	19
1.4.3 Permittivita	19
1.4.4 Youngův modul pružnosti	20
1.4.5 Elastická poddajnost	20
1.4.6 Elektromechanický coupling faktor	21
1.4.7 Činitel jakosti	21
1.5 REZONAČNÍ A ANTIREZONANČNÍ FREKVENCE	22
1.6 CURIEHO TEPLOTA	22
1.7 PIEZOELEMENT JAKO DVOJBRAN	22
1.8 PIEZOELEMENT JAKO JEDNOBRAN	23
2 PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	23
2.1 KRYSTALICKÉ PIEZOELEKTRICKÉ LÁTKY	24
2.2 POLYKRYSTALICKÉ PIEZOELEKTRICKÉ LÁTKY	27
2.2.1 Starnutí piezokeramiky	28
2.2.2 PZT	28
2.3 KOMPOZITY	32
2.4 ORGANICKÉ POLYMERY	33
2.5 TYPY PIEZOELEKTRICKÝCH PRVKŮ	34
3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU V PRAXI	35
3.1 PIEZOELEKTRICKÉ GENERÁTORY	36
3.2 PIEZOELEKTRICKÉ SENZORY	39
3.2.1 Saw senzory	43
3.3 PIEZOELEKTRICKÉ MOTORY A AKTUÁTORY	44
3.3.1 Piezoelektrické aktuátory	45
3.3.2 Piezoelektrické motory	48
3.4 TLUMENÍ HLUKU POMOCÍ PIEZOELEKTRICKÝCH KOMPONENTŮ	53
3.5 DETEKCE PLYNŮ	54
3.6 ULTRAZVUKOVÁ ZAŘÍZENÍ	54
3.6.1 Rozprašování kapalin ultrazvukem	56
3.6.2 Ultrazvukové homogenizátory	56
3.6.3 Kontrola tloušťky materiálů pomocí ultrazvukových přístrojů	57
3.6.4 Aplikace ultrazvukových senzorů	58
3.7 ADAPTIVNÍ MATERIÁLY A SYSTÉMY	60
3.7.1 Aplikace ve větrných elektrárnách	62
3.7.2 Aplikace v letectví	62
3.8 ULTRAZVUKOVÉ ČIŠTĚNÍ	63
4 VYUŽITÍ A PERSPEKTIVA PIEZOELEKTRIK V ELTECH. APLIKACÍCH	64
4.1 ZVUKOVÁ A ULTRAZVUKOVÁ ZAŘÍZENÍ	64
4.2 KONTROLA FREKVENCE A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	65
4.3 PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY	68
4.4 PIEZOELEKTRICKÁ TLAČÍTKA, SPÍNAČE, KLÁVESNICE	70
4.5 GYROSKOPICKÉ SENZORY	72
5 ZHODNOCENÍ PERSPEKTIVNÍCH VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ	73
6 ZÁVĚR	74
POUŽITÉ ZDROJE	75

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na téma využití piezoelektrického jevu v praxi. Práce je rozdělena do čtyř kapitol a zaměřuje se na historii, princip, jednotlivé aplikace a perspektivu piezoelektrického jevu.

Trendem posledních desetiletí je miniaturizace elektrických i mechanických systémů, jsou kladeny vysoké nároky na rychlost a přesnost polohovacích zařízení, dále je pak požadavek na bezbateriový provoz snímacích zařízení a ovládacích prvků. Většinu těchto požadavků jsou schopny splnit piezoelektrické materiály, které se v současné době používají v mnoha aplikacích.

Seznam symbolů:

C_e	pružnost piezoelementu
C_o	elektrická kapacita
c_p	rychlost šíření akustické vlny
D	indukce elektrického pole
d_{ab}	piezoelektrická nábojová konstanta
E	Youngův model pružnosti
E_i	intenzita elektrického pole
f_a	antirezonanční frekvence
f_r	rezonanční frekvence
F_x	síla působící ve směru elektrické osy
F_y	síla působící ve směru mechanické osy
g_{ab}	piezoelektrická napěťová konstanta
K	dielektrická konstanta
k_{ab}	elektromechanický coupling faktor
K_b	převodní konstanta
K_p	piezoelektrická konstanta
l	délka desky
L_m	indukčnost
Q	náboj
Q_m	činitel jakosti
S	mechanická deformace
S_{ab}	elastická poddajnost
T	mechanické napětí
T_c	Curierova teplota
W_E	elektrická energie
W_M	mechanická energie
X	elektrická osa krystalu
Y	mechanická osa krystalu
Z	osa optická
ϵ	příslušná permitivita materiálu
ρ	hustota materiálu

1 Historie a princip piezoelektrického jevu

1.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrické látky jsou zvláštní skupinou dielektrik, ve kterých existuje piezoelektrický jev jako určitý druh jejich elektrické deformace. Je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování, nebo také jev opačný, kdy je na krystal přiloženo napětí a on se tvarově deformuje. Tento jev se vyskytuje pouze u krystalů bez středu symetrie.

1.2 Historie piezoelektrického jevu

V polovině 18. století zkoumali Carl Linnaeus a Franz Aepinus pyroelektrický jev. Zjistili, že při změně teploty testovaného materiálu, tento materiál generuje elektrický náboj. O tento výzkum se následně opírali René Just Haüy a Antonie César Becquerel, kteří předpokládali jistý vztah mezi deformací materiálu a následně vzniklým elektrickým nábojem. Jejich pokusy byly však neprůkazné.



obr. 1: Pierre Curie (1859 – 1906, vlevo) a Paul-Jacques Curie (1856 -1941) [1]

Teprve bratři Pierre Curie a Jacques Curie v roce 1880 dokázali provést první úspěšnou demonstraci piezoelektrického jevu, kdy vycházeli z pochopení krystalové struktury a znalostí pyroelektriny. Při opakovaných pokusech s krystaly turmalínu zjistili, že pokud se tyto krystaly (hlinitoborokřemičitanu železa) stlačovaly v určitých směrech, objevoval se na jejich povrchu elektrický náboj. Tento jev byl v roce 1881 panem Hankelem nazván piezoelektrina. Slovo vzniklo z řeckého „piezó“ „což znamená tlačit a

electron v překladu jantar (ve starověku zdroj elektrického náboje). Bratři Currierovi však nepředpokládali inverzní piezoelektrický jev. Ten byl matematicky odvozen Gabrielem Lippmannem v roce 1881. Následně Currierovi potvrdili existenci tohoto inverzního piezoelektrického jevu a pokračovali v získávání důkazů o kompletní reverzibilitě elektro-elasto-mechanických deformací v určitých krystalech. Bratři také popsali základní zákony, kterými se jev řídí: - elektrický náboj je přímo úměrný působícímu tlaku, náboj nezávisí na délce krystalu, ale jen na velikosti ploch - jev existuje díky anizotropii krystalu (existence polárních os), amorfnní látky tuto vlastnost nemají [1].

Pierre Currie také zkoumal paramagnetické, diamagnetické a feromagnetické látky u kterých se zabýval studií krystalů. V roce 1895 se oženil s Marií Sklodowskou, spolu pak začali hledat prvky produkující radioaktivní záření. V roce 1898 izolovali polonium a poté radium.



obr. 2: Marie Sklodowska – Curie a vpravo Woldemar Voigt [1]

Piezoelektrický jev byl považován za velký objev, ale zastínil jej elektromagnetický jev, který se v té době již dostával z teorie do praxe. Během několika dalších desetiletí byla piezoelektrina laboratorní záležitostí. Výzkum směřoval k definici krystalových struktur, které vykazují piezoelektrické chování. Obecnou a první teorii piezoelektrického jevu navrhl Woldemar Voigt, kdy pro popis anizotropního prostředí vyvinul tenzorový počet. Prvně byla použita piezoelektrina u elektrometru, který kompenzačně dokázal měřit velmi malé náboje a byl použit Marií Curie při studiu radioaktivního rozpadu látek. Praktické využití nachází piezoelektrina až během 1. světové války, kdy Paul Langevin vynalezl první ultrazvukový sonar, v podstatě vrstva křemenných krystalů mezi dvěma ocelovými plechy, který měl rezonanční frekvenci

kolem 50 kHz. Dále bylo využito devíti křemenných rezonátorů pro stabilizaci kmitočtu rezonančního obvodu panem W.G.Cady, což byla první standartní frekvence. Studium piezoelektřiny pokračovalo na dalších látkách a v roce 1921 byla Josephem Valaskem objevena feroelektřina na piezoelektrickém krystalu Seignetteovy soli. Při zkoumání chování tohoto krystalu v elektrickém poli pozoroval hysterezní smyčku.

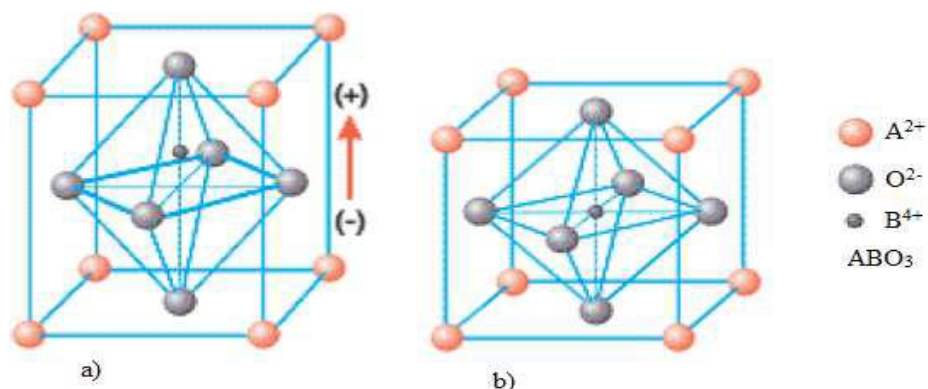
Mezi válkami bránil dalšímu rozvoji a aplikacím piezo-látek nedostatek kvalitních materiálů s dobrými piezoelektrickými vlastnostmi. Vše se změnilo během 2. světové války, kdy při hledání nových vhodnějších dielektrik do kondenzátorů, byly vytvořeny umělé keramické materiály s velice dobrými piezoelektrickými vlastnostmi. Poté se již piezoelektrický jev využívá například pro: frekvenční filtry, krystalové rezonátory, mikrofony, gramofonové přenosky, piezoreproduktory, senzory neelektrických veličin (tlak, zrychlení, síla), hlásiče požáru, piezotransformátory a další aplikace. Poslední dobou se vývoj zaměřuje na piezoelektrické motory a různé typy aktuátorů, které nacházejí uplatnění například v robotice, lékařství nebo v automatizaci.

U nás byla piezoelektřina studována po první světové válce ve Fyzikálním ústavu na Karlově univerzitě v Praze pod vedením prof. Petržílky, ale také na Českém vysokém učení technickém v Praze a později, koncem šedesátých let 19. Století, i na Vysokém učení technickém v Brně. Po druhé světové válce se začaly na různých výzkumných pracovištích vyrábět piezoelektrické výbrusy a rezonátory, největším výrobcem býval n. p. Tesla Hradec Králové. V současné době se výzkumem piezoelektrického jevu zabývá Technická univerzita v Liberci, kde byl výzkum obnoven po roce 1995 příchodem erudovaných výzkumníků a pedagogů prof. J. Fouska i prof. V. Janovce a také díky získání potřebných grantů. Pracoviště TUL je svým zaměřením v ČR ojedinělé.

1.3 Princip piezoelektrického jevu

Princip piezoelektrického jevu spočívá v mikrostruktuře materiálu. Krystal je složen z iontů, které jsou vázány na určitých místech v pravidelně uspořádaném a opakujícím se vzoru, toto uspořádání tvoří krystalovou mřížku. Nejmenší periodicky se opakující část mřížky je elementární buňka. A právě symetrické vlastnosti této buňky rozhodují, zda může mít krystal piezoelektrické vlastnosti. Piezoelektrický jev můžeme pozorovat jen u krystalů, které nemají střed symetrie. Ionty v buňkách bez středu

symetrie se vlivem mechanického namáhání přesouvají a vytváří tak elektrický dipól. Ionty v buňkách se středem symetrie (na obr. 3) takový dipól vytvořit nemohou.



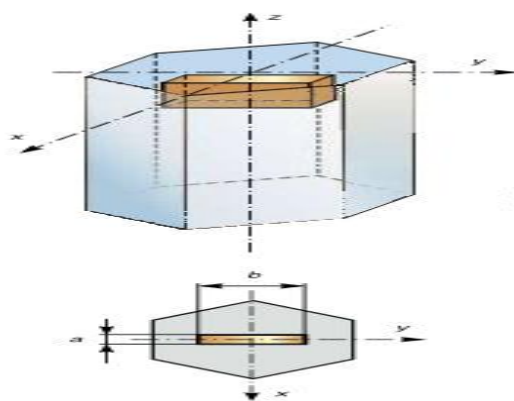
obr. 3: a) buňka bez středu symetrie, b) buňka se středem symetrie [14]

V podstatě je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Napětí bývá řádově 10^{-7} V/Pa. Tento jev může fungovat i reverzně, kdy na krystal přivedeme napětí a tím se deformuje. V zásadě dělíme tento jev na **přímý piezoelektrický jev** a **nepřímý piezoelektrický jev**. Podstata tohoto jevu je, že v klidovém stavu jsou polohy kladných a záporných nábojů po vystředění přes objem buňky shodné a materiál nevykazuje žádné elektrické projevy. Začne-li na něj působit mechanická síla, jako je stlačení, tah, ohyb nebo stříh, posunou se polohy nábojů tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů (nábojů), která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí a na určitých plochách krystalu se objeví náboj. Je možná i kombinace směrů mechanického namáhání. Při obráceném piezoelektrickém jevu, při takzvané elektrostrikci, způsobí vnější elektrické pole posunutí iontů a to se projeví deformací krystalu. S deformací krystalické mřížky působením vnější síly souvisí i změna měrného elektrického odporu. Tento jev je označován jako **piezorezistivní jev**. Důležitým rysem obou jevů je závislost efektu na vzájemné poloze krystalografických os látky a směru přiloženého pole (elektrického či mechanického). Krystal má tři osy: X – osa elektrická, Y – osa mechanická a Z – osa optická. Působí-li síla kolmo na osu optickou, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na osu elektrickou se objeví elektrický náboj. Působí-li rovnoměrně rozložená síla F_x ve směru elektrické osy X, jedná se o „podélný piezoelektrický jev“ a velikost náboje Q, který vzniká na kolmých stěnách k ose elektrické, je vyjádřen rovnicí (1).

$$Q = K_p F_x \quad (1)$$

Zde je K_p piezoelektrická konstanta (piezoelektrický modul). Při takto působící síle na krystal je z rovnice (1) vidět, že velikost náboje nezávisí na rozměrech krystalového výbrusu. V případě působící síly F_y ve směru mechanické osy Y, vznikají náboje opět na plochách kolmých na elektrickou osu, ale směr polarizačního vektoru je záporný a v tomto případě je velikost náboje závislá na rozměrech krystalu. Zde se jedná o „příčný piezoelektrický“ jev. Velikost náboje Q je dána vztahem, který vyjadřuje rovnice (2), kde a, b jsou rozměry krystalu.

$$Q = K_p \frac{b}{a} F_y \quad (2)$$



obr. 4: Piezoelektrický krystal [21]

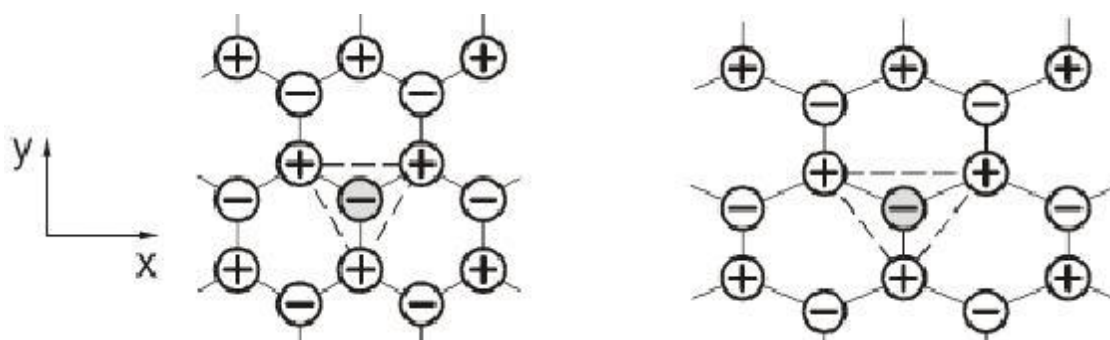
Dipólové momenty existují v látce pouze během mechanického působení na ni, bez účinku mechanické síly je látka elektricky neutrální. Podobně je na tom i jev opačný, kdy se po přiložení elektrického pole krystal deformuje a po odstranění tohoto pole se krystal vrátí zpět do své původní podoby. Je třeba konstatovat, že u mnohých krystalických látek byl sice piezoelektrický jev prokázán, ale v praxi je technicky nepoužitelný.

Nebezpečím pro piezoelektrika je vysoká teplota (závisí na složení materiálu), při níž dochází u jakéhokoli materiálu ke ztrátě piezoelektrických vlastností, protože je narušeno uspořádání iontů. K této změně dochází skokově a přechodová teplota, charakteristická pro daný materiál, se nazývá Curierova teplota [2].

1.3.1 Příčný piezoelektrický jev

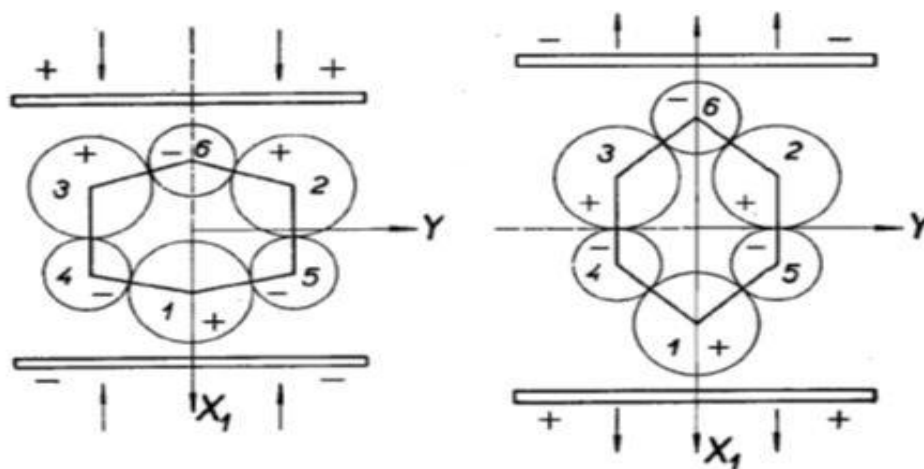
Piezomateriál se vyznačuje tím, že jsou v něm přítomny ionty různých prvků a molekul. Uspořádání v krystalové mřížce je takové, že si kladné a záporné ionty

navzájem prostorově odpovídají a materiál tak činí elektricky neutrálním. Budeme-li tento materiál mechanicky namáhat – stlačovat, dojde k deformaci krystalu a ionty se vychýlí ze svých původních pozic v krystalové mřížce. Dojde ke vzdálení „elektrických těžišť“ záporných a kladných iontů, což způsobí, že se na některých plochách krystalu objeví elektrický náboj. Výsledný náboj na elektrodách materiálu bude mít opačnou polaritu, než je orientace elektrických dipólů v materiálu. Vygenerovaný elektrický náboj je tomuto tlaku přímo úměrný.



obr. 5: Znáznornění posunu elektrických těžišť iontů SiO_2 z klidového do deformovaného stavu [25].

Piezomateriál nemusíme jen stlačovat, můžeme na něj působit i tahovou silou, obr.6. V tomto případě opět dojde k vychýlení iontů v krystalu, ale opačně než v případě stlačování. To znamená, že generovaný elektrický náboj má opačný charakter než při stlačování.

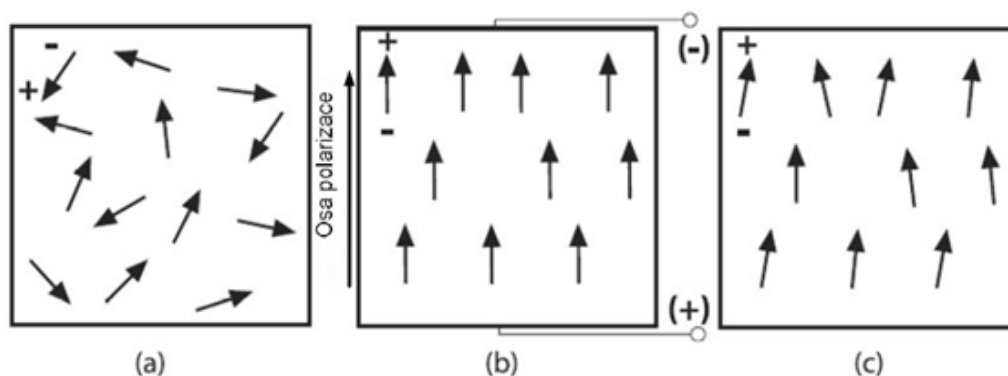


obr. 6: Vznik nábojů, vlevo při stlačení a vpravo při roztažení krystalu [4]

Přímý piezoelektrický jev nachází uplatnění například v mikrofonech, v zapalovačích, ve snímačích mechanických veličin jako je tlak, zrychlení atd.

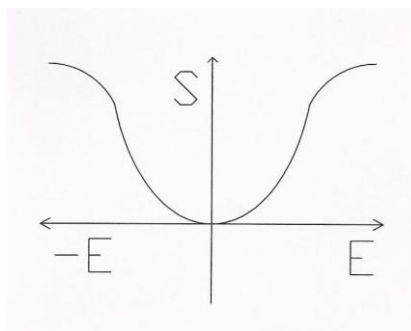
1.3.2 Nepřímý piezoelektrický jev (elektrostriktce)

Je to jev opačný, kdy se krystal při přiložení elektrického napětí deformuje. Čím větší je elektrické pole, tím větší je i deformace. Tato závislost je kvadratická oproti lineární závislosti při přímém piezoelektrickém jevu. Vnější elektrické pole způsobí posunutí iontů, což vede k deformaci krystalu. Je-li pole časově periodicky proměnné s kmitočtem, který odpovídá kmitočtu vlastních elastických kmitů krystalu, vzniká mechanická rezonance. Periodické změny tloušťky krystalu jsou doprovázeny zvukem. V elektrickém obvodu se stejnosměrným zdrojem se piezoelektrika chovají jako kondenzátory. Když na piezoelektrický materiál přivedeme napětí, změní své rozměry, ale po odpojení napětí se nevrátí úplně do původní podoby. To je dáno kapacitním charakterem piezoelektrika, kdy si po odpojení napětí udrží jistý náboj. Zkratováním vývodů, by se piezo mělo vrátit do původní podoby. Během experimentů se zjistilo, že piezomateriál má něco jako paměť a pamatuje si tedy, k jaké polaritě napětí byl naposledy připojen. To se projeví při vrácení do takzvané nulové polohy a to tím, že se vrátí vždy do polohy jiné. Existují tak vlastně dvě nulové polohy [3].



obr. 7: a) orientace dipólů před polarizací elektrickým polem, b) polarizace dipólů elektrickým polem, c) remanentní polarizace po odpojení elektrického pole [3]

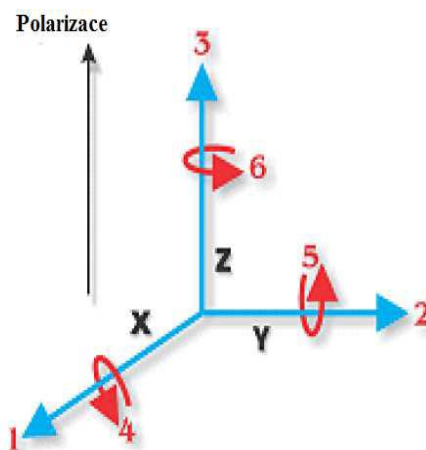
Elektrostriktce je jev, při kterém polarizací jakéhokoliv dielektrika vzniká určitá jeho deformace. Tato deformace se nazývá elektrostriktce a je obecnou vlastností látek, není tedy podmíněna žádnou zvláštní atomovou strukturou dielektrika. Deformace dielektrika při elektrostriktci souvisí s energií elektrického pole (znázorňuje obr.8), ale není závislá na orientaci pole. Velikostně je deformace přibližně rovna čtverci intenzity E . Elektrostriktce nemá k sobě obrácený jev [4].



obr. 8: Obecný průběh deformace na intenzitě elektrického pole při elektrostrikcii

1.4 Veličiny a konstanty

Piezoelektrická keramika je anizotropní materiál a tudíž konstanty, které se vztahují k jejím vlastnostem, se zapisují ve tvaru x_{ab} . Na pozici x je určitá konstanta a na pozici písmen ab se zapisují čísla, která popisují konstantu vzhledem k souřadnému systému, viz. obr. 9 níže.



obr. 9: Souřadný systém [14]

Lineární vztahy platí pro malé signály, při velkých intenzitách buzení a velkých deformacích piezoelektrik jde o nelineární procesy.

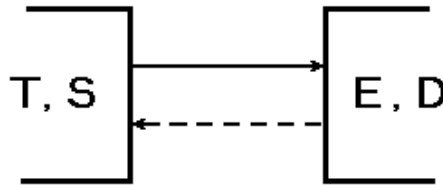
1.4.1 Piezoelektrická nábojová konstanta d_{ab}

Piezoelektrická nábojová konstanta vyjadřuje hodnotu generovaného náboje na jednotku působícího mechanického napětí, nebo mechanické přetvoření na jednotku elektrické intenzity pole. První index popisuje směr polarizace generované materiálem, nebo směr polarizace vnějšího elektrického pole. Druhý popisuje osu působícího mechanického napětí, nebo způsobeného přetvoření.

$$d = k\sqrt{\varepsilon^T S^E} [mV^{-1}] \quad (3)$$

Například: d_{15} – udává velikost generovaného náboje polarizovaného ve směru 1 působením smykového napětí v ose Y, nebo velikost přetvoření okolo osy Y působením vnějšího elektrického pole ve směru 1.

d_{31} – je velikost generovaného náboje polarizovaného ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 1, nebo velikost přetvoření v ose X působením vnějšího elektrického pole ve směru 3. Piezoelektrickou nábojovou konstantu popisuje rovnice (3), kde jednotlivé veličiny představují: T – mechanické napětí, E – intenzita elektrického pole, S – deformace, D – elektrostatická indukce, ε – příslušná permitivita materiálu při konstantním zatížení.



obr. 10: Symbolické znázornění přímého a opačného piezoelektrického jevu

1.4.2 Piezoelektrická napěťová konstanta g_{ab}

Tato konstanta je velikost intenzity elektrického pole na jednotku působícího mechanického napětí, nebo mechanické přetvoření na jednotku elektrické indukce, vyjádřeno rovnicí (4). Jednotlivé indexy mají stejný význam jako u nábojové konstanty.

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} [VmN^{-1}] \quad (4)$$

g_{31} – je velikost intenzity generovaného elektrického pole ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 1, nebo velikost přetvoření v ose X působením vnějšího elektrického pole ve směru 3 na obr. 9.

1.4.3 Permitivita ε_{ab}

Permitivita nebo také dielektrická konstanta, udává velikost magnetické indukce při jednotkové elektrické intenzitě. První index popisuje směr elektrické indukce, druhý

směr elektrické intenzity. Při popisu piezokeramických materiálů se používá permitivita při konstantním mechanickém napětí ϵ^T a při konstantním přetvoření ϵ^S . Někdy se používá také relativní permitivita \mathbf{K} , která je vypočítána rovnicí (5).

$$K^T = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} [-] \quad (5)$$

K^T = permitivita materiálu při konstantním mechanickém napětí / absolutní permitivita

1.4.4 Youngův modul pružnosti

Youngův modul popisuje pružnost materiálu, je to poměr mechanického napětí působícího na materiál ku vzniklému mechanickému přetvoření dle rovnice (6).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} [Pa] \quad (6)$$

Působíme-li na materiál mechanickou silou, generuje elektrické pole a tento proces brání mechanickému přetvoření materiálu. Z tohoto důvodu se pro popis materiálových vlastností piezomateriálu používá „elastická poddajnost“, označení s .

1.4.5 Elastická poddajnost s_{ab}

Elastická poddajnost je míra přetvoření materiálu na jednotku mechanického napětí a také převrácená hodnota Youngova modulu pružnosti E , popisuje rovnice (7). První index je směr přetvoření, druhý směr mechanického napětí.

$$s = \frac{1}{E} [m^2 N^{-1}] \quad (7)$$

$$s_{33}^D = \frac{1}{4 \cdot \rho \cdot f_a^2 \cdot l^2} \quad (8)$$

Další možností jak vypočítat elastickou poddajnost je rovnice (8), kde ρ je hustota materiálu, f_a antirezonanční frekvence a l délka obdélníkové desky piezokeramiky.

1.4.6 Elektromechanický coupling factor k_{ab}

Elektromechanický coupling faktor vyjadřuje efektivitu přeměny elektrické energie na mechanickou a naopak. První index představuje osu, ve které jsou připojeny elektrody. Druhý je osa, ve které působí mechanické napětí nebo dochází k přetvoření. V případě přeměny mechanické energie na elektrickou (generátory, senzory) platí rovnice (9).

$$k = \sqrt{\frac{W_E}{W_M}} [-] \quad (9)$$

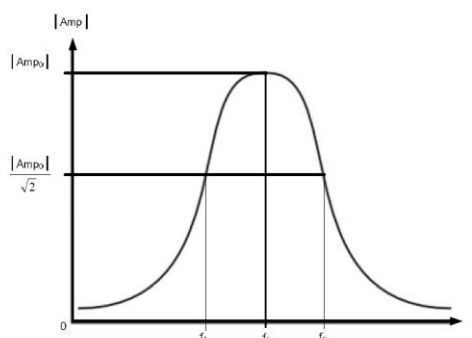
V opačném případě, tedy při přeměně elektrické energie na mechanickou změnu (aktuátory, rezonátory) platí rovnice (10).

$$k = \sqrt{\frac{W_M}{W_E}} [-] \quad (10)$$

1.4.7 Činitel jakosti

Činitel jakosti se obvykle značí Q_m . Veličina se používá v náhradním sériovém zapojení elektrického obvodu a popisuje vlastnosti piezokeramiky. Je to poměr reaktance a rezistivity [5], [6].

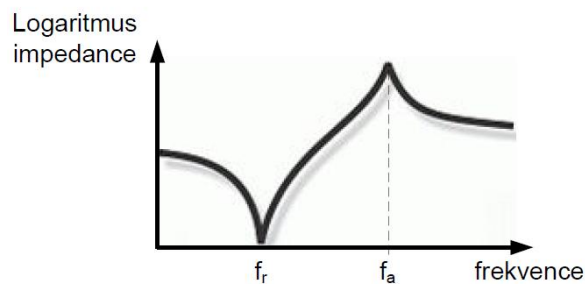
$$Q_m = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (11)$$



obr. 11: Rezonance znázorněná v amplitudově – frekvenční charakteristice [

1.5 Rezonanční a antirezonanční frekvence

Na hodnotě budící frekvence závisí účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou a naopak. Rezonanční frekvence f_r je stav, kdy je mechanické kmitání prvku nejbližší kmitání elektrickému. Při f_r má prvek nejnižší impedanci, řádově kiloohmy, závislost impedance na frekvenci ukazuje obrázek 12. Naopak nejvyšší impedanci má prvek při tzv. antirezonanční frekvenci f_a , jedná se řádově o stovky kiloohmů až megaohmy. Hodnoty f_r a f_a se používají při výpočtu Coupling faktoru.

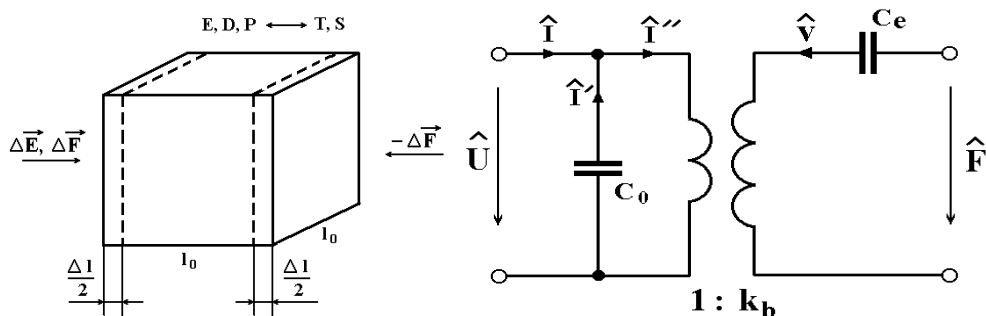


obr. 12: Průběh impedance v závislosti na frekvenci [33]

1.6 Curieho teplota T_c

T_c určuje teplotu, při které dochází ke změně v uspořádání elementární buňky krystalové mřížky tak, že nová elementární buňka získá střed symetrie a tím ztratí piezoelektrické vlastnosti. Je to velmi důležitá konstanta, mnohdy určující hranici použitelnosti daného piezoelektrika v určitých aplikacích [6].

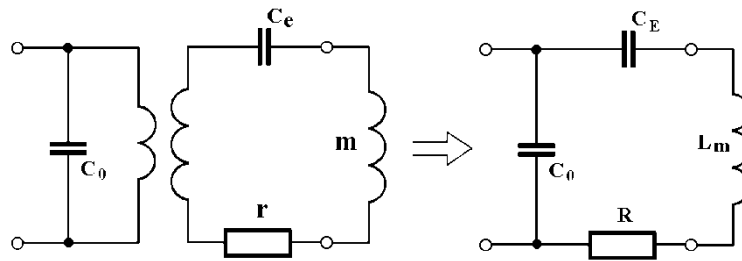
1.7 Piezoelement jako dvojbran



obr. 13: Piezoelement jako dvojbran [27]

V tomto náhradním schématu na obrázku 13 představují C_0 elektrickou kapacitu, C_e pružnost piezoelementu a k_b převodní konstantu.

1.8 Piezoelement jako jednobran



obr. 14: Elektrický ekvivalent piezoelementu jako jednobranu [27]

$$\omega_{\text{rez}} = \frac{1}{\sqrt{L_m C_E}} \quad (12)$$

V obvodě na obr. 14 představuje m hmotu a r ztráty. Je třeba konstatovat, že v literatuře existuje více náhradních elektrických modelů, které se liší z mnoha důvodů. Při odvozování náhradního modelu je často kladen důraz na určité parametry, kdežto některé parametry se zanedbávají [7]. Rezonanční frekvence se počítá dle rovnice (12).

2 Piezoelektrické materiály

Materiály s piezoelektrickými vlastnostmi se začaly průmyslově využívat od poloviny 20. století, kdy v 50. až 60. letech byl odstartován jejich intenzivní výzkum. Krystalické látky byly zejména zpočátku omezené na látky přírodní a teprve zvýšená poptávka vyvolala potřebu průmyslové výroby krystalů. V současné době se vývoj zaměřuje na nalezení materiálů s lepšími piezoelektrickými vlastnostmi, jako je zlepšení citlivosti piezomateriálu. Dále se pak požaduje větší účinnost převodu elektrické a mechanické formy energie, což vede celkově k větší úspoře energie. Vývoj je také směřován k nalezení materiálů s lepší teplotní stabilitou rezonanční frekvence a ke zmenšení pracovního napětí při stejném pracovním efektu, využívají se tenké vrstvy a mnohavrstvé struktury. Piezoelektrické látky patří do skupiny pevných látek. Tyto materiály mají různé seskupení atomových částic v krystalu a tomu odpovídající strukturu. Různá kombinace uspořádání krystalové mřížky nám umožňuje rozlišovat sedm systémů os vycházející ze sedmi krystalografických soustav. Každá soustava má

své typické vlastnosti a můžeme je vyčlenit tedy do těchto soustav: *trojklonná, jednoklonná, kosočtverečná, trigonální, šesterečná, čtverečná, krychlová.*

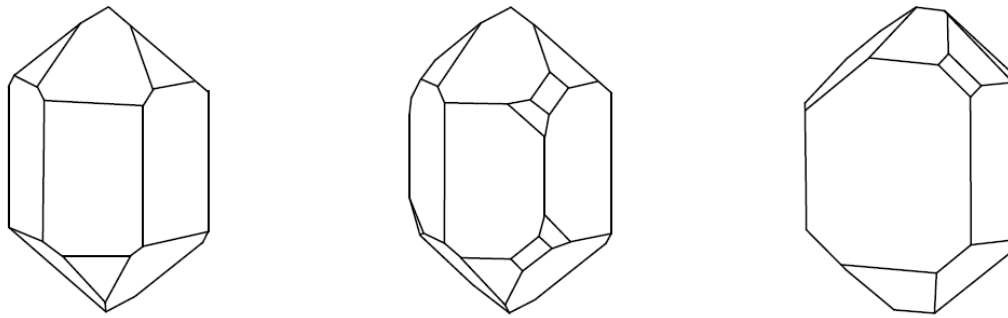
Piezoelektrické materiály můžeme rozdělit podle různých hledisek, a to dle struktury na:

- krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)
- polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika)
- organické polymery (piezoelektrické polymery)

Další hlediska pro dělení jsou například hodnota Curieovy teploty, vhodnost pro objemové nebo tenkovrstvé prvky.

2.1 Krystalické piezoelektrické látky

Křemen (SiO₂) anglický název „ quartz „ je nejpoužívanější piezoelektrický materiál v celém světě. Jeho používání má z pohledu historie piezoelektriky dlouhou tradici. Vždyť byl v podstatě prvním komerčně používaným piezoelektrickým materiálem. Je nejvíce používaným zástupcem této skupiny a také patří k nejrozšířenějším nerostům zemské kůry. Jeho čirou formou je křišťál a dalšími odrůdami jsou například ametyst, citrín, záhněda, černý morion a růženín. Křemen má kromě piezoelektrických vlastností také velmi stabilní chemické a mechanické vlastnosti. Je odolný proti kyselinám i zásadám. Rozpustí se pouze v kyselině fluorovodíkové a v horkých alkalických roztocích, zejména za vysokých tlaků. Piezoelektrické vlastnosti křemene nejsou tak vysoké jako u jiných piezoelektrických materiálů. Pro technické účely není vhodný všechen křemen v zemské kůře, jelikož jeho stavba, nepravidelnost monokrystalické struktury, rozmanité piezoelektrické vlastnosti předurčují, že jeho množství vhodné pro zpracování elektrotechnickým průmyslem jsou omezené na několik stovek gramů z několika tun horniny. Vhodný surový křemen požadované kvality byl nalezen pouze v Brazílii a na Madagaskaru. Na úkor nedostatku kvalitního přírodního křemene vznikl synteticky vyrobený tažený z taveniny Czochralského metodou. Umělý křemen je pěstován ve vodném roztoku při teplotě 400 °C a tlaku 1000 MPa v ocelových autoklávech. Jeho růst je velmi pomalý, přírůstek je 0,3 mm až 1mm denně a konečný krystal je tedy hotov za několik měsíců. Také umělý křemen může mít defektní části jako krystal přírodní. Piezoelektrické a elastické vlastnosti jsou také shodné s vlastnostmi přírodního křemene.



obr. 15: Tvary krystalů křemene [9]

Křemen má široké využití v elektrotechnice a radioelektronice. Nalezneme jej v zařízeních jako jsou radary, hodiny, senzory, telefony, počítače, je základem převodníků mechanických veličin (síla, zrychlení, tlak). V těchto vyjmenovaných zařízeních se používá především jako rezonátor díky jeho vysoké kvalitě Q_m (malé mechanické ztráty). Další pozitivní vlastností je jeho všeobecná stabilita a odolnost. Je chemicky vysoce odolný (proti kyselinám i zásadám), má vysokou tvrdost, snese vysoká mechanická napětí a jeho vlastnosti jsou relativně stabilní vůči teplotě, modifikace je stálá do 573°C [8], [9], [10].



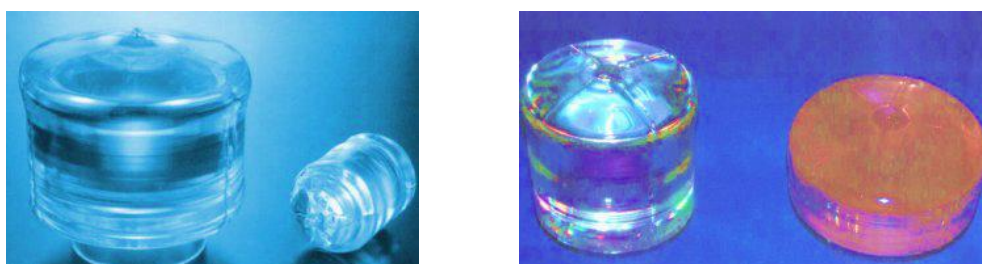
obr. 16: Krystal křišťálu [9]

AlPO₄ – berlinit je další krystal s vlastnostmi podobnými křemenu. Má vyšší elektromechanický coupling faktor \underline{k} . Je to vzácný přírodní krystal, ale vyrábí se i ve formě umělých krystalů. Přírodní je transparentní, šedě růžový až světle růžový.

Lithium tantalát – LiTaO₃ se pěstuje zpravidla Czochralského metodou tažením z taveniny při teplotě 1680°C . Pro získání jednodoménových krystalů je nutné ohřát krystaly nad teplotu Currieho bodu a ochlazovat je při současném působení

elektrického pole o intenzitě několik V/cm ve směru osy Z. Tento krystal se používá v zařízeních jako jsou dotykové obrazovky. V takovýchto zařízeních slouží jako vysílač i přijímač. Teplota Currieova bodu je 610 °C.

Lithium niobát – LiNbO₃ se pěstuje rovněž Czochralského metodou tažením z taveniny při teplotě 1300°C. Teplota Currieova bodu je okolo 1195°C. Používají se hlavně v optice pro přípravu periodicky pólovaných optických struktur pro generaci vyšších harmonických frekvencí světla a potom také jako materiály pro rezonátory na objemových (BAW) či povrchových vlnách (SAW).



obr. 17: Syntetické krystaly LiNbO₃ a vpravo LiTaO₃ [9]

Turmalíny jsou skupinou minerálů vyskytující se v přírodě v mnoha modifikacích. Zároveň je jedním z prvních objevených piezoelektrických materiálů. Orientuje se pouze k jediné elektrické ose Z. Používají se například v senzorech. Turmalín má mnoho podobných vlastností jako křemen, je však velmi závislý na teplotě.

Vinány jsou soli kyseliny vinné. Typický představitel je Seignetova sůl – vínan sodnodraselný. Používají se pro piezoelektrické snímače. Krystaly Seignetovi soli obsahují krystalovou vodu a při každé teplotě existuje určitý obor relativní vlhkosti vzduchu, ve kterém je Seignetova sůl stabilní. Za normální teploty je to v rozmezí relativní vlhkosti 35 % – 85 %. Pro zvětšení odolnosti se povrch někdy lakuje. Nedostatkem Seignetovi soli je malá stálost při kolísání vlhkosti, teploty a malá mechanická pevnost. Výhodou pak je velká piezoelektrická konstanta a příznivá cena.

Síran hlinitý, v technických aplikacích se používá monohydrát síranu lithného Li₂SO₄·H₂O označovaný zkratkou LSH.

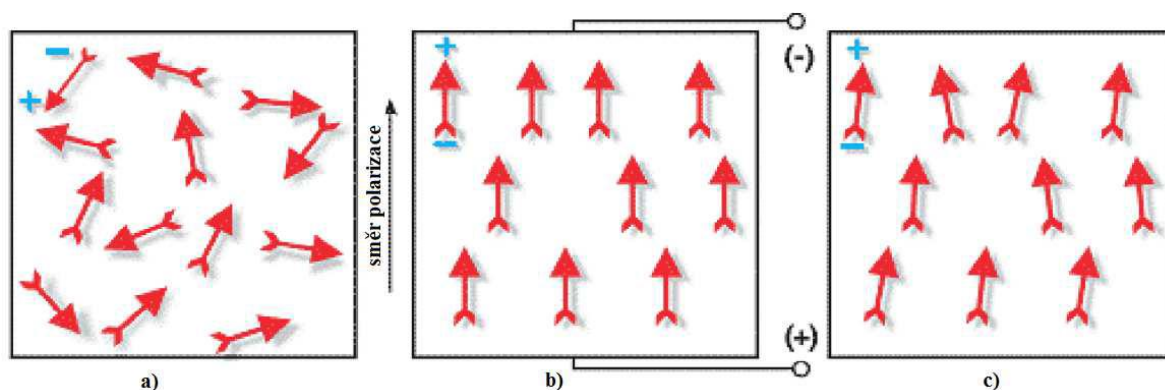
Fosforečnan galitý (GaPO₄) má podobné vlastnosti jako křemen, v několika ohledech je dokonce lepší než křemen. Má vyšší elektromechanický coupling k a

především je teplotně stabilnější. Používá se proto v aplikacích s vyšší teplotou, jako například senzor tlaku u spalovacích motorů. Nevyskytuje se v přírodní formě, je to umělý krystal.

Germanium vizmut se pěstuje Czochralského metodou tažením z taveniny při teplotě 950°C. Výchozím materiálem je čistý Bi_{12}O_3 a GeO_2 v poměru 6:1. Tavení výchozích složek se provádí v platinovém kelímku, při rychlosti růstu 5 mm – 20 mm za hodinu [21], [8].

2.2 Polykrystalické piezoelektrické látky (piezokeramika)

Jsou to uměle vyrobené materiály většinou s velmi dobrými piezoelektrickými vlastnostmi. Jedná se o polykrystalické keramické materiály, které jsou po výrobě složeny z velkého množství zrn, ty jsou náhodně orientovány a teprve polarizací v silném elektrickém poli nabývají piezoelektrických vlastností. Při polarizaci je keramika vystavena silnému stejnosměrnému elektrickému poli, obvykle při teplotě lehce pod Curieho bodem. Elektrické momenty domén tak srovnají svoji orientaci a ta z velké části zůstane i bez působení vnějšího elektrického pole. Tato zůstatková orientace se nazývá remanentní polarizace, znázorňuje obrázek 18, [12].



obr. 18: Polarizace, a) náhodná orientace před polarizací, b) polarizace el.polem, c) remanentní (zbytková) polarizace [14]

Tyto materiály bývají často přímo navrhovány pro konkrétní aplikace a jejich piezoelektrické vlastnosti se poté přidávají podle polarizace v různých směrech. Příměsi pak ovlivňujeme Curierův bod, ale také piezoelektrickou konstantu, při výrobě se volí kompromis mezi oběma vlastnostmi. Mezi tyto keramické materiály řadíme např. titaničitan barnatý BaTiO_3 , zirkoničitan olovnatý PbZrO_3 , titaničitan olovnatý PbTiO_3 ,

titaničitan bismutitý $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, niobičnan olovnatý PbNb_2O_6 , PMN-PT a nejpoužívanější PZT keramika $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Prvním piezokeramickým materiálem byl titaničitan barnatý, který byl brzo doplněn tuhým roztokem titaničitanu olovnatého a poté zirkoničitanu olovnatého takzvanou PZT keramikou. Piezokeramické materiály mají řadu výhod, a tudíž jsou z piezoelektrických materiálů nejpoužívanější. Mezi přednosti patří vysoké piezoelektrické konstanty jako je elektromechanický coupling faktor, nábojová konstanta, dielektrická konstanta a v porovnání s materiály, které dosahují podobných hodnot, je výhodou i cena. Jako zápornou vlastnost můžeme jmenovat omezenou pracovní oblast keramiky nižší Curieho teplotou. Dále pak omezení vztahující se k velikosti maximálního elektrického a mechanického napětí působícího na keramiku. Při překročení těchto omezení dochází ke ztrátě nebo změně piezoelektrických vlastností materiálu. Problémem u piezokeramik může být teplotní stabilizace piezoelektrických vlastností, která vymezuje použití keramiky v aplikacích s velkými změnami teplot [13].

2.2.1 Stárnutí piezokeramiky

Další neduhou je stárnutí piezokeramiky v důsledku výrobního procesu. Stárnutí probíhá logaritmicky a nejvyšších hodnot dosahují konstanty krátce po polarizaci. Výrobci udávají zhoršování vlastností na dekádu a obvykle se zhoršování vlastností pohybuje řádově v jednotkách procent na dekádu. Takže materiál, který stárne s 1% na dekádu, ztratí 1% z hodnoty piezoelektrických vlastností za 1 den, další 1% pak za deset dní, další za sto dní a tak dále. Tento jev je způsoben teplotním pohybem molekul piezokeramiky, které se postupem času odchyľují od osy polarizace. Stárnutí je rovněž umocňováno v době, kdy se materiál nepoužívá a kdy nedochází k opětovné polarizaci molekul materiálu působením přiloženého elektrického pole. Stárnutí urychluje i vystavování materiálu vysokým teplotám. Z těchto předešlých tvrzení vyplývá nutnost zohlednit provozní teplotu a při navrhování příslušných aplikací se již zaměřit na četnost jejich využití [18], [19].

2.2.2 PZT

PZT keramika je v současnosti nejpoužívanějším keramickým materiálem pro piezoelektrické aplikace, a proto se tomuto materiálu více věnuji. PZT je materiál na bázi tuhých roztoků oxidu olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti). Jsou to tedy složky

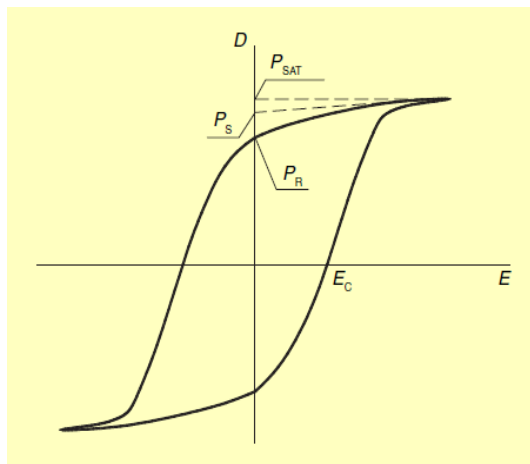
PbZrO_3 – složka PZ a PbTiO_3 – složka PT. Tyto materiály jsou známy od 50. let dvacátého století a nyní patří mezi vůbec nejvýznamnější průmyslově vyráběnou feroelektrickou keramiku. PZT keramika se vyrábí metodami práškové metalurgie. Proces začíná mletím surovin oxidů PbO , ZrO_2 , TiO_2 ve stechiometrickém poměru (kvantitativně vyjádřené počty molekul reagujících při chemických dějích) podle požadovaných vlastností v kulových mlýnech. Chemické složení PZT keramiky se modifikuje malým množstvím dopujících příměsí, čímž se významně ovlivňují materiálové vlastnosti. K významným příměsím patří atomy lanthanu (La) tvořící zvláštní typ keramiky označované PLZT. Ta je průhledná a množství procházejícího světla se řídí elektrickým polem. Některé vlastnosti si však konkurují a zlepšením jedné dojde ke zhoršení jiné vlastnosti. V mlýnech se jednotlivá zrna složek zároveň promísí. Následuje tzv. kalcinace, za zvýšené teploty se uvolní krystalová voda ze surovin a proběhne chemická reakce na tuhý roztok příslušného chemického složení. Poté se vzniklá látka znovu rozemele na zrna o velikosti $1\ \mu\text{m}$ - $10\ \mu\text{m}$. Přidá se organické pojivo a konečné tvary se získávají lisováním do forem a extrudováním. Pojivo se vypaluje při teplotách $1200\ \text{°C}$ – $1300\ \text{°C}$ dosahuje se tím zvětšení hustoty a zmenšení velikosti pórů. Potom se již PZT keramika opracovává běžnými metodami jako je řezání, broušení, vrtání. Po dosažení požadovaných tvarů se nanáší elektrody napařováním Au nebo Pt. Makroskopické piezoelektrické vlastnosti se získávají polarizací v oleji při pokojové či zvýšené teplotě. Elektrické pole používané k polarizaci je typicky $2\ \text{kV/mm}$ – $4\ \text{kV/mm}$ podle typu keramiky. Obvyklé tvary výrobků jsou disky, desky, tyčinky, válečky, trubičky, polokoule a různé speciální tvary dle přání zákazníka. Díky tomu, že feroelektrické vlastnosti keramiky zaručují také její piezoelektrické vlastnosti, může PZT keramika sloužit k přímému převodu elektrického pole na mechanickou deformaci a naopak.

Vlastnosti PZT keramiky vyzdvihává vysoká piezoelektrická konstanta, ale i dobrá stabilita s časem a teplotou. Nevýhodou je obtížné technologické zpracování, neboť se při teplotě slinování rozkládají. Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností (elastické \underline{s} , piezoelektrické \underline{d} a dielektrické $\underline{\epsilon}$) jsou anizotropní, mají tedy různé hodnoty v různých směrech vzhledem ke směru polarizace. Vztahy mezi mechanickým napětím $T_{\lambda\mu}$, elektrickým polem E_i , mechanickou deformací S_λ a indukcí elektrického pole D udávají stavové rovnice (13) a (14).

$$S_{\lambda} = s_{\lambda\mu}^E T_{\mu} + d_{ij} E_j \quad (13)$$

$$D_i = d_{i\mu} T_{\mu} + \varepsilon_{ij}^I E_j \quad (14)$$

Zde koeficienty materiálových vlastností závisejí díky piezoelektrickému jevu současně na mechanických i elektrických okrajových podmínkách. Elastické konstanty s se liší podle elektrických okrajových podmínek a podobně i elektrická permitivita se liší podle mechanického upevnění vzorku. Projevem doménové struktury nebo projevem přepolarizovatelnosti je hystereze [14]



obr. 19: Diagram hysterezní smyčky D-E, koercitivní pole E_c , remanentní polarizace P_r , spontánní polarizace P_s . [15]

Hystereze při mechanické deformaci komplikuje použití PZT keramiky v aktuátorech. Remanentní polarizace P_r PZT keramiky pro složení v blízkosti MPB jsou $20 \mu\text{C}/\text{cm}^2 - 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. MPB – morfotrofní fázová hranice je oblast chemických složení tuhých roztoků, kdy v širokém teplotním rozsahu existují společně dvě fáze. Plocha hysterezní smyčky odpovídá množství tepla uvolněného ve vzorku při jednom průchodu hysterezní smyčkou, obr.19. Užší hysterezní smyčku mají materiály s menšími dielektrickými ztrátami a jsou vhodné k aplikacím s vyšší přenášenou energií (svařování a ultrazvukové čištění). Naopak materiály se širší hysterezní smyčkou mají větší dielektrické ztráty a jsou vhodné pro použití jako aktuátory a senzory. Typické hodnoty koercitivního pole E_c pro PZT jsou kolem $0,5 \text{ kV}/\text{mm} - 1 \text{ kV}/\text{mm}$. Pro názornost uvádím materiálové vlastnosti PZT keramiky vyráběné v ČR shrnuté v následující tabulce 1. Význam jednotlivých koeficientů je následující: dielektrické ztráty $\tan\sigma$,

permitivita ϵ_{33} , Curieova teplota T_c , koeficienty elektromechanické vazby k , piezoelektrické nábojové koeficienty d , napěťové koeficienty g , elastické konstanty s^E , hustota ρ a koeficient mechanické jakosti Q_m .

Tabulka 1: Charakteristika některých typů PZT keramik vyráběných v ČR (APC International, Ltd., Piezokeramika, s.r.o., Libřice)

Vlastnost	Jednotka	APC840	APC841	APC850	APC855	APC856	APC880
ϵ_{33}/ϵ_0	1	1 250	1 350	1 750	3 250	4 100	1 000
$\tan \delta$	%	0,4	0,35	1,4	2	2,7	0,35
T_c	°C	325	320	360	195	150	310
k_p	1	0,59	0,60	0,63	0,65	0,65	0,50
k_{33}	1	0,72	0,68	0,72	0,74	0,73	0,62
k_{31}	1	0,35	0,33	0,36	0,38	0,36	0,30
k_{15}	1	0,70	0,67	0,68	0,66	0,65	0,55
d_{33}	10^{-12} C/N	290	275	400	580	620	215
$-d_{31}$	nebo	125	109	175	270	260	95
d_{15}	10^{-12} m/V	480	450	590	720	710	330
g_{33}	10^{-3} Vm/N	26,5	25,5	26	19,5	18,5	25
$-g_{31}$	nebo	11	10,5	12,4	8,8	8,1	10
g_{15}	10^{-3} m ² /C	38	35	36	27	25	28
s_{11}^E	10^{-12} m ² /N	11,8	11,7	15,3	14,8	15,0	10,8
s_{33}^E	10^{-12} m ² /N	17,4	17,3	17,3	16,7	17,0	15,0
ρ	g/cm ³	7,6	7,6	7,7	7,5	7,5	7,6
Q_m	1	500	1 400	80	75	72	1 000

Pro co nejvhodnější využití PZT keramiky v různých aplikacích se keramika modifikuje přidáním malého množství dopantů, obvykle pod 3 %. Podle druhu dopujících látek a jejich vlivu na vlastnosti materiálu se dá PZT keramika dělit na tvrdou a měkkou.

Tvrdá (hard) keramika vznikne pokud do směsi přidáme akceptor (prvek, který má o jeden elektron v obalu atomu méně než směr). Například místo dvojmocného iontu A_{2+} se přidá jednomocný jako je Ag^+ , K^+ . Na místo čtyřmocného iontu B_{4+} se přidá trojmocný iont jako je Fe_{3+} , Ni_{3+} nebo Mn_{3+} . Kladem tvrdé

keramiky pak je hlavně její stabilita vlastností, vyšší odolnost na depolarizaci, vyšší napěťová konstanta g_{ab} , vyšší činitel jakosti Q_m , nižší ztrátový $\tan\sigma$. Tento materiál je zejména vhodný pro vysokofrekvenční aplikace a aplikace s vysokým mechanickým i elektrickým napětím [12].

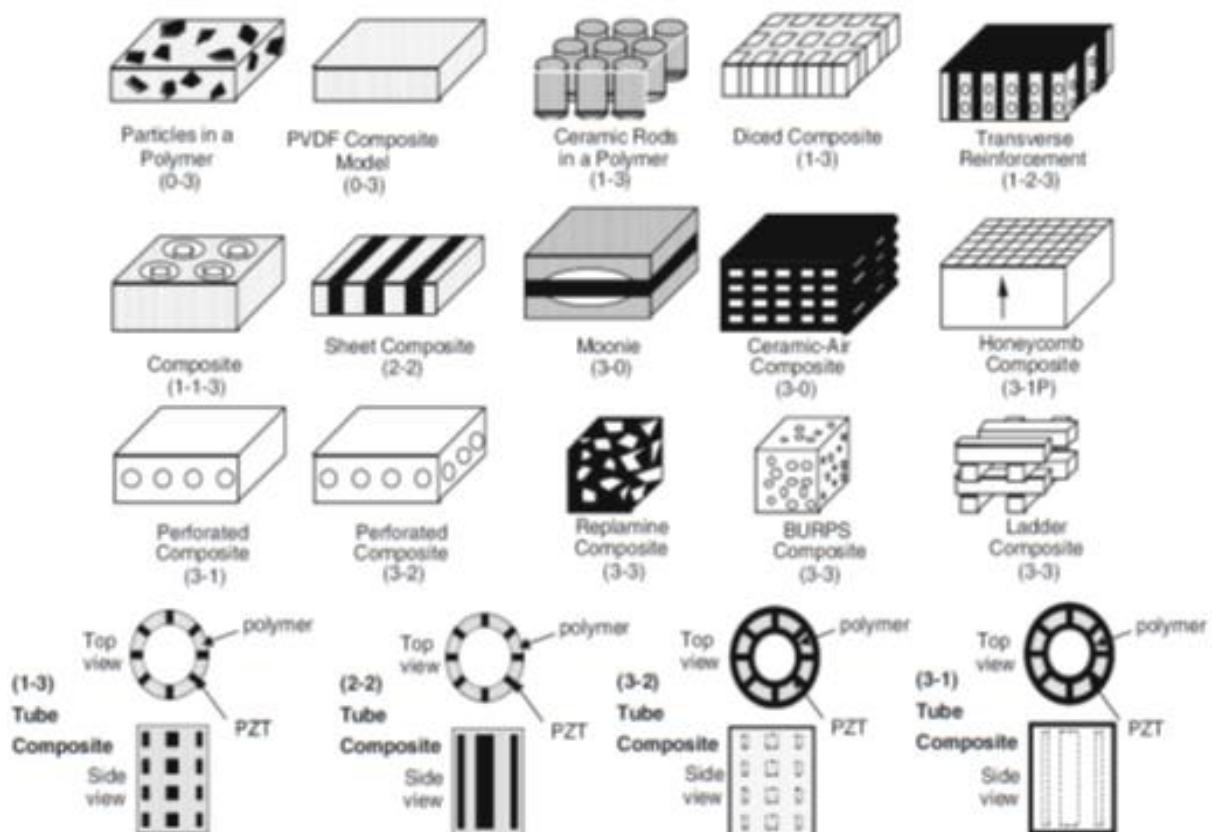
Měkká (soft) keramika vznikne přidáním donorů do keramiky. Na místo dvojmocného iontu A_{2+} se přidá trojmocný iont jako je La_{3+} , Bi_{3+} , Nd_{3+} . Na místo čtyřmocného iontu B_{4+} , se přidá pětímocný iont jako je Nb_{5+} , Sb_{5+} . Výhodou měkké keramiky je potom vyšší nábojová konstanta a vyšší permitivita. Zpravidla dokáže dosáhnout větších mechanických posuvů než tvrdá keramika a využívá se proto pro senzory a aktuátory. Problémem může být odolnost na depolarizaci a proto není vhodná pro vysokonapěťové aplikace.

Aplikace PZT keramiky má při volbě aplikací určitá kritéria, které se i dle návodů výrobců nemají překračovat. Překročení teploty, velikosti elektrického pole, ale i mechanického zatížení má za následek změnu doménové struktury materiálu a může tedy dojít ke změně materiálových vlastností. Při designu piezoelektrických rezonátorů je třeba dbát, aby pracovní oblast mechanických napětí byla pomocí trvalého mechanického předpětí posunuta do oblasti tlaků, které keramika snáší mnohem lépe než mechanická tahová napětí. Nesmíme také zapomenout na „stárnutí“ PZT keramiky, které postupuje logaritmicky. Tento široce používaný materiál nachází využití pro aplikace v „chytrých“ senzorech, generátorech ultrazvuku, aktuátorech a převodnicích. Je také významným elektrotechnickým materiálem pro automatizaci a regulaci. Nadále jsou zkoumány a vyvíjeny další typy PZT keramik pro nejrůznější použití [12].

2.3 Kompozity

Kompozitní piezoelektrické materiály jsou materiály, z nichž alespoň jeden má piezoelektrické vlastnosti. Navrhují se speciálně se zřetelem na určité aplikace. Složením několika materiálů v jeden celek se může dosáhnout takových vlastností materiálu, které by nedosáhl ani jeden materiál zvlášť. Dokonce pak některé vlastnosti kompozitu nejsou jen součtem vlastností jednotlivých materiálů, ale je synergickým efektem dosaženo vlastností mnohem lepších. Výsledkem může dokonce být i vlastnost, kterou před sloučením neměl ani jeden materiál. Kompozitních materiálů existuje celá

řada, jako piezoelektrická složka se nejčastěji používá keramika. Její piezoelektrické vlastnosti mohou být navrženy při polarizaci až po výrobě kompozitu, což je výhodou zejména pro kompozity s náhodně orientovanými zrny keramiky [15].



obr. 20: Ukázka piezoelektrických kompozitů [7]

2.4 Organické polymery

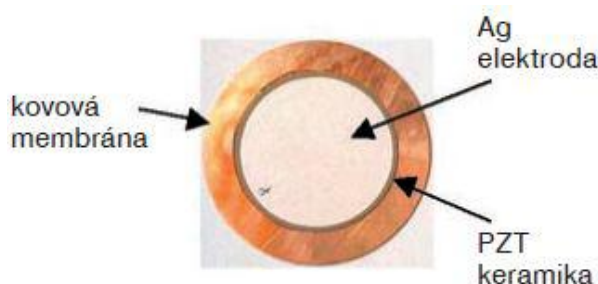
V těchto látkách byla piezoelektrina objevena v roce 1969 a to konkrétně u polyvinylidifluoretylenu (PVDF) a difluorpolyetylénu (PVF2). U těchto látek je pro piezoelektrinu potřebné anizotropie dosaženo vhodným uspořádáním polymerních jednotek v tzv. β -fázi, kdy jsou koncové atomy fluoru orientovány stejným směrem. Část polymeru se nachází ve formě krystalků a část ve formě amorfních řetězců

proplétající zrna krystalické fáze. Krystalická fáze je důležitá pro piezoelektrické vlastnosti. Postupem času bylo objeveno, že polymer PVDF vykazuje také feroelektrické vlastnosti a lze jej polarizovat silným elektrickým polem samostatně nebo v kombinaci se současným jednosměrným natažením. Výhodou polymerů oproti keramikám je jejich ohebnost. Polymerní piezoelektrické látky se používají spolu s elektrety jako membrány pro mikrofony, ale jsou také častou součástí piezoelektrických kompozitů, kde se využívá kombinace vlastností obou složek. Tyto kompozity se nejčastěji připravují ve formě tyčinek, destiček nebo zrn piezoelektrické složky v polymerní matici [11].

2.5 Typy piezoelektrických prvků

Piezoelektrické prvky se liší použitím jedné, dvou nebo více vrstev piezokeramiky.

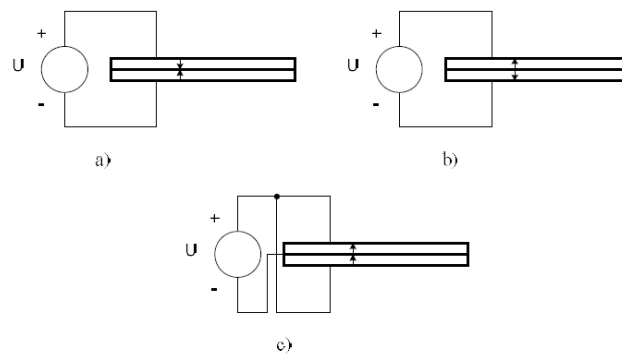
Unimorfy je název pro většinou kruhovou piezokeramiku nalepenou na tenké kruhové desce. Tato kruhová destička bývá kovová s nanesenou vrstvou piezoelektrického materiálu s napájecími vývody. Používají se nejčastěji v elektroakustických měničích, jako jsou bzučáky, sirény a v čidlech neelektrických veličin, vyobrazení je na obr.21.



obr. 21: Provedení uniformu [17]

Polymorfy jsou prvky složené ze dvou a více vrstev PZT keramiky. Mají vyšší účinnost převodu elektrické a mechanické formy energie a zmenšují nutné elektrické napětí při stejném výkonu. K pohybu dochází ve směru navrstvených piezoelektrických elementů. Tyto struktury mají pracovní výchylky v řádu jednotek až desítek mikronů a jsou schopny vyvinout sílu v řádu stovek až tisíců N.

Bimorfy jsou většinou obdélníkové plátky tvořené dvěma vrstvy piezokeramik. Tyto vrstvy se kombinují s kovovými vrstvami, které zde tvoří elektrody. Podle toho jakým způsobem k biomorfu přiložíme elektrické napětí, dělíme tyto prvky na sériové a paralelní, přičemž paralelní mají při stejném napětí dvojnásobnou výchylku proti sériovému zapojení. U sériového zapojení je napájecí napětí přiloženo na kraje dvou spojených piezoelektrických plátek, kdežto u paralelního zapojení je jeden pól připojen na kraje těchto plátek, obr.22. Z mechanického hlediska se jedná o vetknutý nosník, jehož volný konec se vychyluje v rozmezí stovek až tisíců mikronů [16], [17].



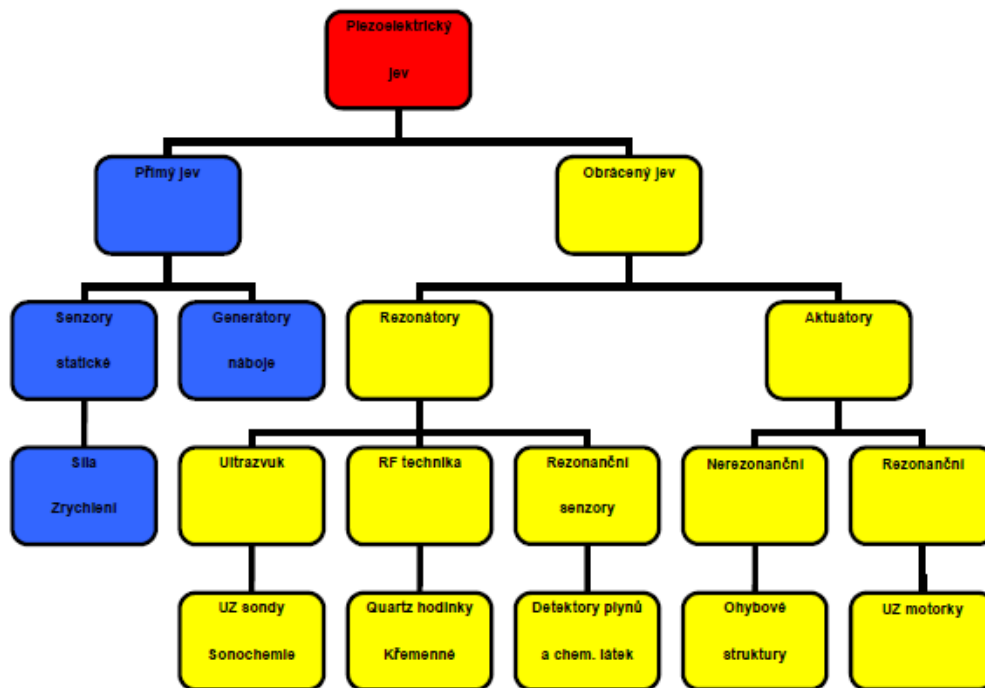
obr. 22: a) konfigurace bimorfů, b) sériové zapojení, c) paralelní zapojení [16]

3 Možnosti využití piezoelektrického jevu v praxi

Využití piezoelektrického jevu je vskutku obrovské a tak zde uvedu především hlavní oblasti využití, grafický přehled je vidět z obrázku 23.

- **generátory** – tyto soustavy využívají energii okolí, jako jsou vibrace, akustický hluk, pohyb lidského těla, generují malé napětí a malý výkon
- **senzory** – senzory tlaku, síly, toku, zrychlení, deformace, výchylky, vibrace...
- **motory a aktuátory** - tiskárny, transformátory a motory v miniaturním měřítku, bimorfy a mnohavrstvé aktuátory pro přesné polohování
- **tlumiče** – používají se kompozity na aktivní tlumení vibrací a hluku

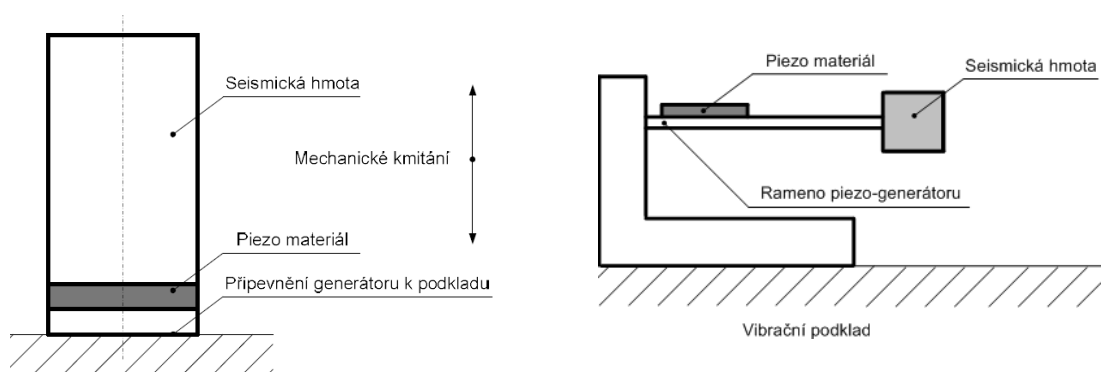
- **zvuková a ultrazvuková zařízení** – mikrofony, reproduktory, hydrofony, bzučáky, sonary, detekce přiblížení ...



obr. 23: Rozdělení využití piezoelektrického jevu [2]

3.1 Piezoelektrické generátory

Vibrační piezo-generátory dle konstrukčního provedení rozlišujeme tři typy. První typ je generátor, u kterého během vibrací dochází vlivem setrvačnosti seismické hmoty k neustálému stlačování a natahování piezomateriálu s výsledným generovaným elektrickým nábojem. Náboj je úměrný mechanickému namáhání (stlačení). Tento přístup je nejčastěji používán při konstrukci akcelerometrů. Druhý typ generátorů využívá torzní kmity piezokeramických válečků. Třetí typ je konstrukce piezogenerátoru jako vetknutého nosníku, obr.24. Na konec ramene se připevní setrvačná seismická hmota, ta vlivem vibrací rozpojuje rameno na kterém je připevněn piezomateriál. Střídavé tlakové a tahové namáhání pieza generuje náboj.



obr. 24: Typy vibračních piezogenerátorů, vlevo používaný pro akcelerometry, vpravo typ vetknutý nosník [11]

Piezoelektrický generátor může být využit i na bicyklu, jenž při jízdě vyrábí elektrickou energii, kterou jsou napájeny LED svítilny. Kolo jedoucí po nerovnostech na silnici produkuje vibrace přenášené rámem, na kterém je v nejvýhodnější pozici připevněn piezoelektrický generátor [20].

Tlakové piezo-generátory využívají kinetické energie, která působí na piezomateriál díky pohybu lidí, strojů, zařízení i přírodních vlivů. Mnoho těchto aplikací je teprve ve zkušebním provozu. Testuje se například využití piezoelektrických měničů v podlaze vstupních turniketů železničních a jiných stanic, kde jsou průchodem cestujících stlačovány piezoelementy. Počítá se, že by vyrobená energie měla napájet osvětlení a vlastní provoz turniketů. Podobný princip používají i železniční piezogenerátory umístěvané v kolejích, taneční parkety na diskotékách. Uvažuje se i o využití kinetické energie dopadající dešťové kapky nebo využití piezogenerátoru v podrážce boty [22], [23].

Zapalovače jsou piezoelektrickým zdrojem vysokého napětí. Stisknutím tlačítka se silně stlačí krystal a vznikne tak vysoké napětí, při kterém mezi elektrodami přeskóčí elektrická jiskra. Náboje vzniklé na elektrodách při použití keramiky typu PZT jsou dosti veliké, a proto se uvažuje o využití pro zapalování zážehových motorů.

Využití dešťových kapek pro výrobu elektřiny. Princip generátoru je založen na vibraci piezoelektrické struktury způsobené dopadem dešťových kapek. Systém pracuje s kapkami o průměru jeden až pět milimetrů a při simulaci bylo zjištěno, že je možné získat až 12 mW z jedné z větších lijákových kapek. Zařízení by mohlo být alternativou napájení v oblastech s deštivým klimatem, kde je obtížné použít sluneční energii. Při testování byl použit jako piezoelektrický materiál polyvinildenfluorid - polymer tloušťky 25 μm . Experimentem bylo zjištěno, že pomalu padající dešťové

kapky vytvářejí nejvíce energie, protože kapky padající při vysokých rychlostech často ztrácejí energii vlivem tvořící se louže. Vědci také ověřili, že při poklesu výšky dopadu dešťových kapek, je získaná energie úměrná druhé mocnině poklesu mechanické energie, zatímco napětí a mechanická energie jsou si přímo úměrné.

Využití lidské činnosti k získání energie může být dalším bezbateriovým zdrojem energie. Často se tak využívá instalace piezogenerátoru do podrážek bot. Jako generátor se používá membrána z elastomeru instalovaná do paty boty, touto cestou lze získat výkon až 0,8J z jednoho kroku boty při stlačení pouze 3mm. Při frekvenci chůze dva kroky za sekundu, jsme schopni získat 800 mWs z jedné boty.



obr 25: Použití piezoelektrického generátoru v patě obuvi [26]

Velmi slibnou aplikací piezomateriálů je použití v lékařství k napájení kardiostimulátorů. Silikonový plátek s piezočipy implantovaný do pacientova těla v oblasti hrudníku, by dokázal využít sílu dýchacích pohybů k výrobě energie pro dobíjení baterie kardiostimulátoru, nemusel by se tak provádět chirurgický zákrok při výměně baterie. Nanovlákná PZT materiálu jsou nanesena v rovnoběžných prouzcích, na koncích jsou nanovlákná připojena k elektrodám a celek je zapouzdřen v tenkém silikonovém plátku. Použitý silikonový materiál je běžně používán ke kosmetickým implantátům, je tedy dobře snášenlivý s živým organismem [26].

Piezoelektrické generátory instalované v podlaze využívají přepravní společnosti u vstupních turniketů. Procházející cestující tak vyrábějí elektrickou energii pro provoz vlastních turniketů a informačních tabulí. Mimo jiné je množství vyrobené energie využíváno ke zjišťování počtu cestujících. Na podobném principu lze piezoelektrické snímače použít i v oblasti železniční přepravy pro zjištění průjezdu vlaku. Piezoelektrické snímače vestavěné do vozovky je možné použít i pro měření tlaků způsobených osobními hmotnostmi všech jedoucích vozidel ve všech jízdních

pruzích. Překročení osových hmotností je spolu s identifikací vozidla hlášeno policistům, kteří po určitém úseku, nebo na místě kde je to možné, provedou přesné zvážení. Výhodou tohoto měřicího systému je opět absence napájecího zdroje. Ve formě studie jsou například i silnice pokryté piezoelektrickými měniči, které při každém otřesu generují elektrickou energii. Některé typy silnic, především pak dálnice by mohli na jednom kilometru vygenerovat až 400 kW. Existují pak myšlenky, že by silnice mohly přímo napájet některé typy elektromobilů [7].

3.2 Piezoelektrické senzory

Snímače vibrací – citlivý element snímače je vyroben technologií quartz-shear. Jedná se o modifikaci křemene a využívá stříhového principu. Například 2xKistler 87C2B100, tento piezoelektrický snímač má rozsah 100g, citlivost 50mV/g. Tyto snímače se používají v železniční dopravě pro zjištění průjezdu vlaku. Předností piezoelektrických snímačů je jejich malá velikost a konstrukční jednoduchost.

Vibrační detektory pro střežení dveří, oken a plášťovou ochranu objektu jsou založeny na piezoelektrickém měniči, který převede otřesy na elektrický signál, který je dále zpracován a porovnán s prahovými hodnotami. Vibrační detektor se používá v aplikacích, kde není možné použít audiodetektory a ochranu magnetickými kontakty nebo by jejich použití bylo příliš nákladné. U detektorů je možné nastavit jejich citlivost.

Piezoelektrické snímače se v hudebních nástrojích nejvíce používají ke snímání zvuku akustických kytar. Jedná se většinou o plátek z piezomateriálu umístěný pod sedlem kobyly snímající vibrace strun, jak je vidět na obrázku 26. Chvění rezonanční desky se podílí méně. Signál od piezoelektrického snímače bývá silný, ale bohužel nerespektuje charakter nástroje a přidává do výsledného zvuku vyšší frekvence, které způsobují dojem „elektrického zvuku“. Piezosystémy jsou stále vyvíjeny a nové modely se snaží popsané zápory minimalizovat. Výsledná kvalita zvuku je vysoce závislá na použití kvalitních součástek, s tím souvisí i cena nástroje.



obr 26: Piezoelektrický snímač akustické kytary [25]

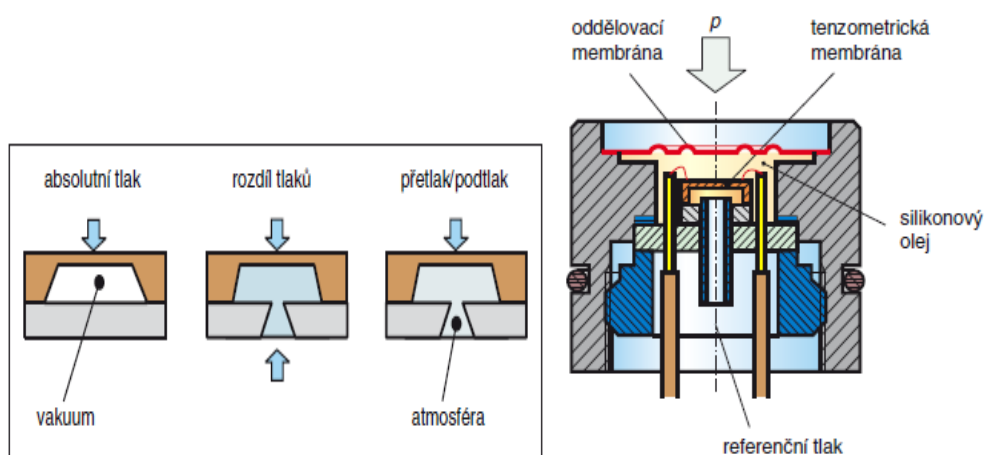
Snímače tlakové síly se skládají ze dvou piezoelektrických krystalů orientovaných tak, aby se náboje sčítaly při působení síly na přitlačný článek prostřednictvím membrány. Výstup ze snímače je z elektrody veden izolační průchodkou, tedy celý systém je uzavřen v pouzdře. Snímače se vyrábějí v různých konstrukčních variantách pro tlakové i tahové síly.

Piezoelektrický snímač síly pro náročné podmínky. Například piezoelektrické snímače síly CFT od firmy Hottinger a HBP jsou vhodné pro mnohé aplikace při kontrole výroby. Snímače se vyrábějí s rozsahy 5, 20, 50, 70 a 120 kN. Ve snímačích s nižším jmenovitým zatížením 5 a 20 kN se jako piezokrystal používá fosfát galia, který dává vyšší výstupní signál. Pro větší zatížení se potom používá křemík. Tyto snímače vynikají svojí kompaktní robustní konstrukcí a vysokým stupněm krytí IP65, což je předurčuje pro provoz v opravdu velmi náročných podmínkách, kompaktnost je vidět na obrázku 27. Typické použití těchto piezoelektrických snímačů síly je například při spojování, bodovém sváření, lisování nebo vysekávání.



obr 27: Ukázka kompaktnosti a velikosti vyráběných piezoelektrických snímačů síly [7]

Snímače tlaku – využívají se především pro měření dynamických tlaků. Při konstrukci volíme co nejmenší počet desek, čímž dosáhneme vysokého vlastního kmitočtu. Ten je nutný pro statické cejchování, kdy musí být vlastní kmitočet podstatně vyšší, než je nejvyšší měřený kmitočet. Při konstrukci snímače se dbá na to, aby hmotnostní části přenášející sílu na výbrus byly co nejmenší a měly vlastnost pružiny s lineární charakteristikou. Snímače, které pracují trvale v prostředí s vysokou teplotou je nutno chladit. Snímače tlaku se používají pro různá odvětví. Časté jsou aplikace ve spalovacích motorech nebo u kompresorů. Rozšíření aplikačních možností snímačů je často dosaženo tak, že se základní typy snímačů montují do pouzder, tím je možné je použít i při velmi náročných aplikacích. K tomu se v tlakoměrných systémech používá kovová oddělovací membrána a olejová náplň. Oddělovací membrána musí být zkonstruována tak, že neovlivňuje vlastnosti křemíkového čidla. Snímače s křemíkovými čidly mohou být uzpůsobeny na měření jak absolutního tlaku, tak i přetlaku, podtlaku a rozdílu tlaků, což ukazuje obrázek 28. Tyto snímače s křemíkovou membránou se používají k měření přetlaku až 100 MPa a podtlaku do 100 kPa. Předností piezoelektrických snímačů tlaku jsou zejména jejich dynamické vlastnosti, mohou být snadno miniaturizovány až na rozměry několika milimetrů. Nejsou použitelné k měření statických tlaků, jelikož náboj vzniklý po přiložení tlaku se díky nedokonalé izolaci vybíjí a napětí na elektrodách klesá. Nevýhodou může být i obtížnější zpracování signálu [22], [24].



obr. 28: Způsoby měření tlaku vlevo a vpravo křemíkové čidlo s oddělovací membránou [20]

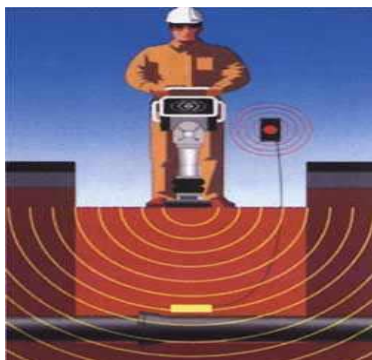
Piezoelektrický generátor sloužící jako snímač tlaku v pneumatikách využila firma Continental, která jej použila pro snímání tlaku pneumatik, především pak

v nákladních automobilech. Naměřená data se přenášejí do centrálního počítače, který zajišťuje optimální huštění pneumatik. V budoucnu se počítá s nasazením této technologie do všech automobilů, protože správně nahuštěné pneumatiky by měly zvýšit bezpečnost a snížit spotřebu paliva a s tím spojenou i nižší míru znečištění životního prostředí.



obr 29: Piezoelektrický snímač tlaku pneumatik [26]

Piezoelektrický měřič zhutnění půdy, pomáhá omezit závady při budování cest, způsobené převážně klesáním zásypů. Příslušný senzor je umístěn na dno výkopu, na něj se uloží vrstva zásypové zeminy a zhutňuje se do doby, dokud přístroj neoznámí stop. Po ukončení celého zásypu se kabel senzoru přestřihne a senzor se ponechá na dně výkopu. Princip měření je takový, že piezoelektrický senzor indikuje napětí, které je úměrné amplitudě tlakové vlny přenášené postupně hutněnou zeminou. Výslednými signály je napájena elektronika měřiče, kde jsou signály vyhodnocovány, obr.30 níže.



obr 30: Měřič zhutnění půdy na piezoelektrickém principu

Použití piezoelektrických snímačů pro měření výchylky nebývá příliš časté. Využití nachází ve speciálních aplikacích jako je například snímání záznamu u gramofonových desek, nebo měření drsnosti povrchu obráběných ploch.

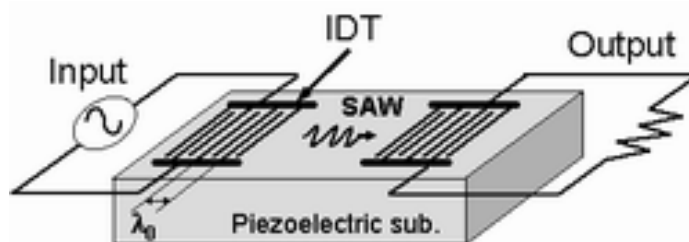
Piezoelektrický snímač teploty - princip těchto snímačů je založen na inverzním piezoelektrickém jevu se střídavým elektrickým polem, které způsobí mechanické kmitání piezoelektrického článku. Kmitající článek se chová v okolí rezonance jako oscilační obvod. Závislost rezonančního kmitočtu na teplotě je dána použitým materiálem a úhlem, pod kterým byla piezoelektrická destička vyříznuta z monokrystalu. Je zapotřebí, aby teplotní součinitel kmitočtu λ byl v požadovaném rozsahu teploty co největší a pokud možno konstantní. Jako materiál pro tuto aplikaci se zatím využívá nejvíce křemen.

Pomocí piezoelektrických snímačů lze snímat mnoho neelektrických veličin. Senzory na bázi přímého nebo nepřímého piezoelektrického jevu se chovají elektricky jako kapacita a mechanicky jako tuhá pružina. Mezi nežádoucí vlastnosti piezoelektrických senzorů patří hystereze, vliv teploty, stárnutí a také nemohou být využívány pro měření statických sil [22], [20].

3.2.1 Saw senzory

Surface Acoustic Wave – povrchová akustická vlna, která se šíří po povrchu pružného materiálu, přičemž se amplituda tlumí exponenciálně s rostoucí hloubkou substrátu. Základem senzoru SAW je piezoelektrická destička se dvěma hřebenovými elektrodami tzv. iterdigitálními měniči –IDT, které převádějí akustickou vlnu na elektrickou a zpět díky piezoelektrickému jevu použitého materiálu. Princip spočívá v přivedení vysokofrekvenčního napěťového signálu na vstupní měnič, kde dochází k nepřímému piezoelektrickému jevu, tudíž k synchronní deformaci piezoelektrického krystalu. Tato deformace vytvoří akustickou vlnu, která se šíří směrem k výstupnímu měniči, na rozhraní substrátu a vzduchu se přímým piezoelektrickým jevem vytvoří elektrický signál, znázorňuje obr. 31. Vlna má podélnou a příčnou složku, která vzniká rozechvěním materiálu, na kterém je elektroda napařena. Nežádoucí vlna se šíří i v opačném směru na kraj struktury, kde musí být utlumena, aby se neodrážela a neinterferovala. V závislosti na vlastnostech materiálu a druhu spojení se liší amplituda a rychlost šíření vlny. Snímání těchto hodnot umožňuje zpětně určit aktuální vlastnosti

materiálu, respektive okolního prostředí. Lze například určit teplotu, mechanické namáhání, chemické složení a podobně.



obr. 31: Struktura SAW snímače [24]

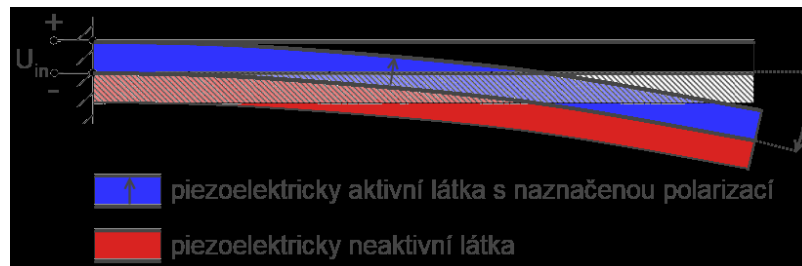
Technologie SAW se již delší využívá v mnoha typech integrovaných obvodů, které se využívají v oblastech datových komunikací, v obvodech filtrů, oscilátorů, dotykových displejů, v oblastech sensoriky, určování chemického složení látek a mnoho dalších odvozených parametrů a veličin. Tyto součástky jsou vyráběny fotolitografickým procesem využívaným při výrobě křemíkových integrovaných obvodů. Výhodou těchto senzorů pracujících s akustickou vlnou je jejich vysoká citlivost, dobrá linearita a nízká hysteréze. SAW obvody i při malé velikosti mohou pracovat na frekvencích od 10 MHz do 3 GHz [25].

3.3 Piezoelektrické motory a aktuátory

Piezoelektrické aktuátory se výhradně používají v aplikacích se střídavým napájením s buzením o hodnotě vlastní frekvence. Základní typy mikroaktuátorů vytváří pohyb, který když se sloučí, vytvoří piezoelektrický motor. Tento typ motoru je také někdy nazýván motorem ultrazvukovým, protože jednotlivé destičky mikroaktuátorů jsou buzeny střídavým ultrazvukovým zdrojem o frekvenci 20 kHz - 50 kHz. Princip motoru je založen na vybuzení stojaté nebo postupné elastické vlny složením dílčích piezoelektrických deformací. Pohybu motoru, ať už lineárního nebo rotačního, dosáhneme přenesením generovaných výchylek pomocí třecích sil na rotor. Tyto typy motorů mají pro malé pohony množství cenných vlastností, jako jsou velká hustota výkonu (W/kg), jsou kompaktní a tvarově adaptabilní, umožňují velmi přesné řízení, tichý chod, absence nežádoucího magnetického pole a konstrukční jednoduchost. Další nespornou výhodou je, že se třecí síly postarají o pevné zafixování pozice rotoru po odpojení napájení [27].

3.3.1 Piezoelektrické aktuátory

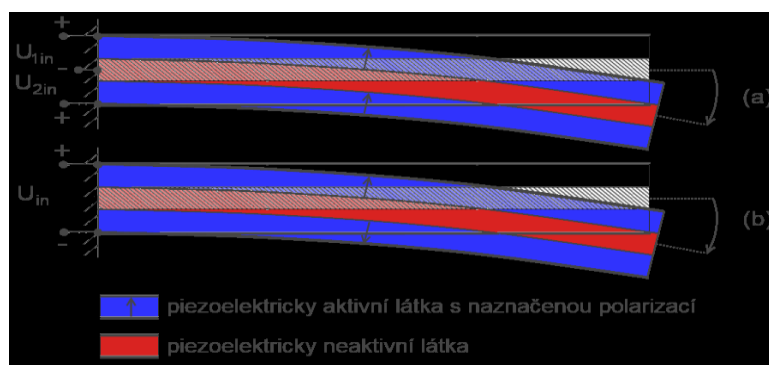
Typ vetknutý nosník je nejjednodušší piezoelektrický aktuátor. V provedení jako **unimorf** je základní ohybový kompozit. Zde se využívá příčný piezoelektrický jev, kdy je vlastní deformace způsobena nestejným rozepínáním spojených vrstev, jak ukazuje obrázek 32.



obr. 32: Vetknutý nosník – unimorf [30]

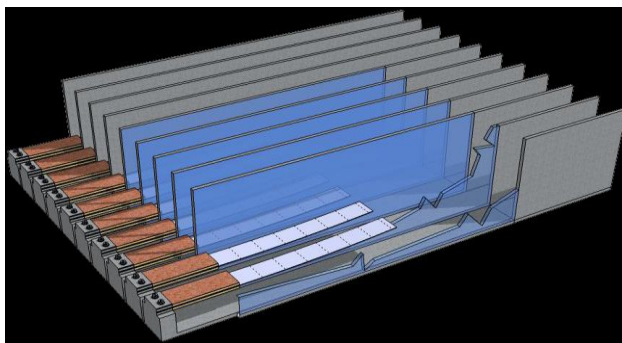
Piezoelektrický bimorf je složitější struktura proti unimorfu. Je schopna zvýšit sílu vyvinutou aktuátorem a zvětšit i výchylku koncového bodu. Vyskytuje se dvojí zapojení.

Paralelní zapojení se společnou elektrodou nebo zapojení sériové nevyžadující jednu elektrodu, jak je vidět na obrázku 33.



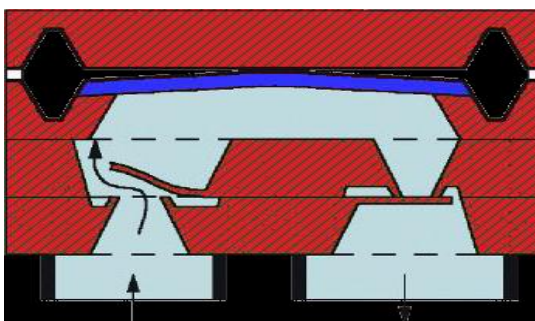
obr 33: a) paralelní zapojení bimorfu, b) sériové zapojení bimorfu [30]

Tyto aktuátory se uplatňují v aplikacích jako je například ventilátor do miniaturních zařízení, kde se využívá vlastností jako tichý chod, konstrukční jednoduchost a rozměry.



obr 34: Využití piezoaktuátoru při realizaci aktivního chlazení [30]

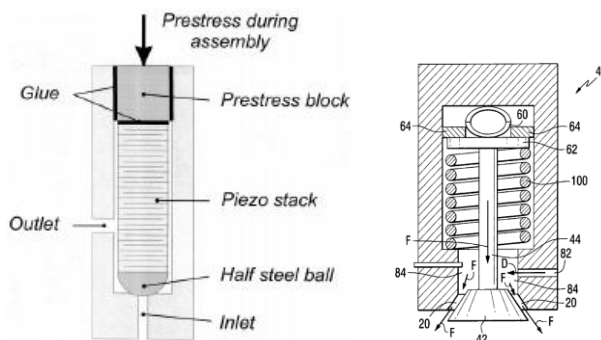
Mikroaktuátor typu membrána je další základní unimorfnní struktura, která se uplatní v přesných maloobjemových dávkovačích, miniaturní pumpy, nebo vysokofrekvenční sirény.



obr 35: Příklad využití membrány pro mikročerpadlo [32]

Mnohavrstvé mikroaktuátory – jsou kompozitní mnohavrstvé struktury, kde může být až několik desítek vrstev aktivního piezoelektrického materiálu. Výsledkem pak je vyšší účinnost a větší rozsah posuvu při použití řádově menšího napětí [28].

Piezoelektrický aktuátor jako ventil je další možností využití piezoelektrik.



obr 36: Vlevo kuličkový ventil piezo-stack, vpravo kuželkový ventil 2x THUNDER [33]

Piezoelektrické vstřikovače dieslových motorů používá Firma Bosch, v systému „Common Rail“, kde se ovladač vstřikovací trysky skládá z několika set

tenkých piezoelektrických krystalů. Výhodou piezoelektrického ovladače je jeho rychlost spínání, která je větší než desítitisícina vteřiny. Tato vysoká rychlost umožňuje přesné dávkování vstřikovaného paliva a lepší rozprašování paliva ve spalovacím prostoru. Přesné dávkování paliva snižuje emise vniklé při spalování. Jeden nebo dva předstříky zabrání, po studeném startu motoru, vzniku bílého a modrého kouře a také sníží hluk způsobený spalováním ve studeném motoru. Dostřík bezprostředně po hlavním vstřiku, snižuje emise sazí. Piezoelektrický člen vyvíjí v porovnání s elektromagnetickým ventilem desetkrát vyšší sílu a díky tomu je méně citlivý na drobné nečistoty v palivu, fotografie je na obrázku 37.



obr 37: Piezoelektrický vstřikovač [12]

Piezoelektrické vstřikování inkoustu v tiskárnách umožňuje na povel vystřelovat kapičky inkoustu přes trysku složenou z piezoelektrické trubičky uložené v kanálku z lité pryskyřice. Při přivedení elektrického napětí na piezoelektrickou trubičku vznikne smrštěním trubičky rázová vlna, která se šíří kanálkem. Jakmile dosáhne konce kónického kanálku, odrazí se s opačnou fází. Tak vznikají podtlakové a přetlakové vlny, které nasáknou a vystříknou kapku inkoustu směrem k papíru. Firmy vyrábějící inkoustové tiskárny na tomto piezoelektrickém principu, používají různý systém vystřelování kapiček inkoustu. Zdokonalováním této technologie byla umožněna větší rychlost tisku.

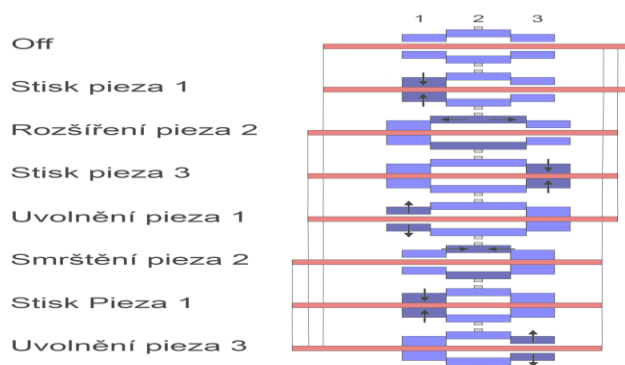
Mikroskop atomových sil - neopomenutelné možnosti zkoumání materiálu nabídl mikroskop atomových sil, který mapuje povrch látky na základě meziatomových sil mezi atomy povrchu a hrotem mikroskopu. Hrot skenuje povrch vzorku a měří sílu na něj působící. Pohyb i přiblížení skenovacího hrotu na potřebnou vzdálenost zajišťuje trubka z piezoelektrického materiálu opatřená uvnitř i vně elektrodami. Elektrické pole

způsobuje požadovanou deformaci krystalu, který tímto řídí pohyb hrotu. Elektronickou cestou se vytváří 3D mapa povrchu, kterou je možné zachytit i jednotlivé atomy.

3.3.2 Piezoelektrické motory

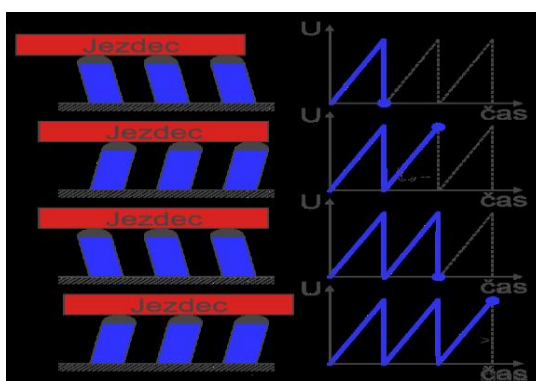
Využití těchto typů motorů je velmi široké. Uplatnění nachází v polohovací technice pro mikroskopy, biomedicínské zařízení především pak pro svůj přesný pohyb v jednotkách nanometrů. Ve spotřební elektrotechnice se využívají u videokamer, fotoaparátů, automatické ostření v mobilních telefonech a v dalších aplikacích. Zde se opět uplatní jejich nízká hmotnost, přesnost a dokonce i nízká spotřeba energie, která šetří baterii. Nové možnosti pro piezomotory se otevírají i v oblasti výroby zámků dveří bezpečnostních elektronických systémů. Význam mohou mít i v leteckém průmyslu, kde snížení váhy komponentů znamená snížení vlastní váhy a nato i snížení spotřeby paliva. Malého opotřebení, nízké ceny a malé velikosti využívá v hojné míře i automobilový průmysl. Na piezomotory se soustředila i telekomunikační technologie. V oblasti optických vláken se díky zvyšujícímu provozu v sítích požadují vyšší nároky na mikromechanické dynamické nastavení a na obrovskou přesnost, což je díky piezomotorům možné splnit. Veliké uplatnění nalézají také v nanorobotice. Piezoelektrických motorů existuje několik typů a různých možností provedení, proto zde uvedu jen několik příkladů piezoelektrických motorů [30].

Motor typu Inchworm (píd'alka) je lineární motor využívající tři páry pieza, který posouvají rotor s možností nanometrového kroku a rozsahem pohybu až stovek milimetrů. U tohoto typu motoru se používá vysoká frekvence buzení, která umožňuje vysokou rychlost polohování. Další výhodou je i jednoduchá konstrukce. Konstrukčně lze vyrobit motor, který je při vypnutém napájení buď zafixován a drží pevně polohu nebo pohon s prokluzem ve vypnutém stavu. Tento typ pohonu se používá pro přesné polohování v optických přístrojích a v tunelových mikroskopech [29].



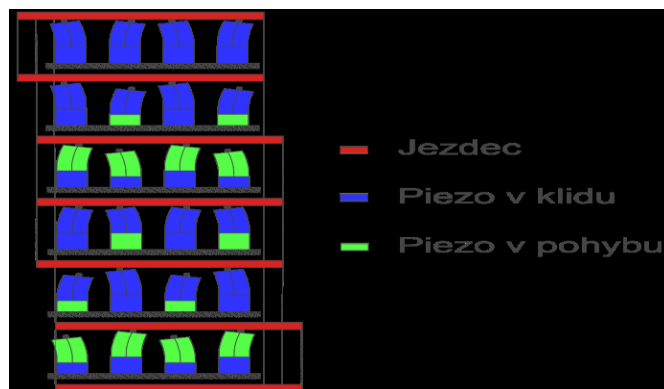
obr 38: Princip lineárního Inchworm motoru [29]

Motor typu stick-slip (přilnout-proklouznout). Tření je v tomto typu pohonu žádaný mechanismus k realizaci pohybu prostřednictvím stříhového piezoelektrického jevu. Při pozvolném a lineárně rostoucím napětí se stříhově pohybuje piezoelektrický materiál a unáší sebou volně ložený jezdec. Poklesne-li skokově napětí, piezomateriál se vrátí do své původní polohy a jezdec vlivem své setrvačnosti zůstane v nové poloze. Opakováním cyklu lze dosáhnout pohybu na libovolnou vzdálenost s krokem 10-100nm. Motor lze zkonstruovat jako lineární i jako rotační. Problémem u tohoto mechanismu je životnost vztyčných ploch mezi piezem a jezdcem.



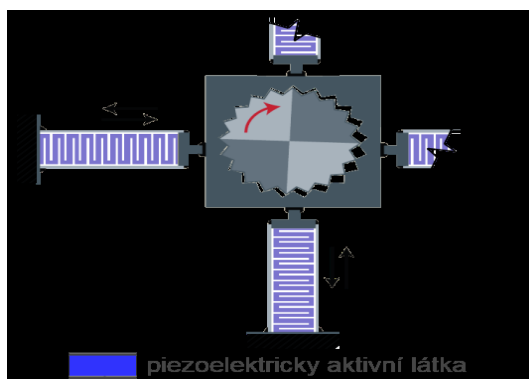
obr. 39: Princip motoru stick-slip [30]

Walking-drive motor nevyužívá k pohybu jezdce výhradně tření. Aktuátor se skládá z mnohavrstvých piez pro vertikální pohyb a vlastní horizontální pohyb zajišťují stříhově polarizovaná piezoelektrika. Výhodou tohoto principu je vysoká životnost, naopak problémem může být složitější řízení.



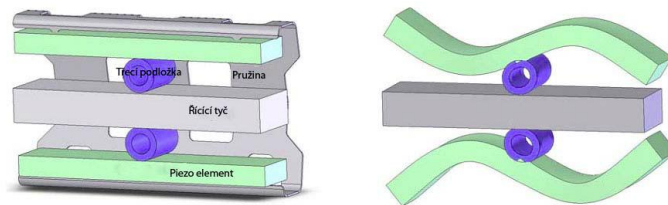
obr. 40: Princip Walking-drive motor [30]

Cykloidní motor, základ tvoří stator v podobě mezikruží s vnitřním ozubením a ozubený rotor, který zapadá do ozubení statoru. Řídící piezoelementy jsou rozmístěny s posunutím 90° . Napětí se na ně přivádí způsobem, aby na jedné straně docházelo k odtlačování a na protilehlé straně k přitahování statoru, který přes zuby pootočí rotorem. Napětí se cyklicky přepíná na další pár a tím dochází k rotačnímu pohybu rotoru. Tyto mikromotory mají podstatně vyšší životnost než motory přenášející pohyb výlučně třecími silami.



obr. 41: Cykloidní motor [30]

Motor piezowave na obrázku 42, je poměrně nový motor vyrobený pomocí nejnovějších moderních technologií a je složen z malého počtu částí. Princip je následující. Po přiložení napětí začnou piezoelementy oscilovat ultrazvukovou frekvencí okolo 93 kHz. Třecí podložky, které slouží k převedení pohybu z piezoelementu na jezdec, začnou vytvářet eliptický pohyb, díky zvlněnému prohnutí piezoelementu. Používá se zde ještě pružina k zabezpečení třecí síly mezi podložkou a jezdcem.



obr. 42: Princip PiezoWave motoru [29]

Elektronické zapojení bývá velmi jednoduché. V podstatě dva nízkonapětové signály různých tvarů, přičemž závislost na frekvenci je malá. Každý piezoelement obsahuje dvě nezávislé části. Na obě části přivádíme signály vzájemně posunuté o 90° . Fázový posuv mezi signály způsobí pohyb ve směru jezdce. Pohyb v opačném směru zajistíme opačným zapojení fází.



obr. 43: Ukázka reálné velikosti piezomotoru [29]

Tento typ mikromotoru se používá pro nejrůznější aplikace ve spotřební elektronice, ale také v medicínské elektronice, zabezpečovacích systémech a v dalších podobných aplikacích [29], [30], [31].

Piezomotory v polovodičové výrobě jsou používány v mnoha náročných polohovacích aplikacích při polovodičové výrobě. Počet těchto aplikací stejně jako jejich náročnost se stále zvyšuje. Průmysl stále vyhledává nové spolehlivé manipulátory v moderních technologiích, které mohou pomoci ve výrobě mikrosoučástek. Ke splnění těchto požadavků se používají piezomotory v provedení Ultra high vakuum, nebo nemagnetických verzích. Masové využití se předpokládá zvláště v nanometrologii, kde piezomotory tvoří nosné manipulační nástroje s rozlišením jednotek nanometrů.

Použití piezomotorů v polohovací technice především tam, kde jsou vyžadovány přesné a rychlé pohyby v rozsahu až nanometrů. Motorčky tohoto principu jsou potom použity například v mikroskopech, metrologických a biomedicínských

zařízení. Polohování piezoelektrickými motorky se využívá i u mechanik nových pevných disků, technologie dvou ramének. Systém ustavování hlav se dvěma raménky zvyšuje poziční přesnost vůči datovým stopám. Primární raménko zajišťuje hrubé přemístění s využitím tradičního elektromagnetického principu. Sekundární raménko používá piezoelektrické polohování pro jemné doladění pozice hlavy, tím se získá vyšší úroveň přesnosti.

Piezoelektrické motory ve spotřební elektronice umožňují zákazníkům z elektronických společností navrhnout menší a lehčí produkty se zvýšenou funkcí, jako je zoom a automatické zaostřování v mobilních telefonech. Dále jsou využívány pro zlepšení funkčnosti v digitálních kamerách a fotoaparátech. Velice malý příkon piezomotoru ho předurčuje pro použití v dalších zařízeních, kde je kladen důraz na výdrž baterie. Příkladem použití piezoelektrických motorů ve fotoaparátech je vyvinutý systém ultrarychlého vysoce přesného řízení Supersonic Wave Drive (SWD) využívající piezoelektrický aktuátor, který v současné době nachází široké uplatnění v nejrůznějších aplikacích. Výsledný akční člen je nemagnetický, kompaktní a nevyžaduje žádnou údržbu. SWD slouží v zrcadlovkách značky Olympus jako mechanický stabilizátor obrazu, kdy během zlomků sekundy přesně pohybuje obrazovým snímačem. Kompenzuje tak ovlivnění obrazu nechtěným pohybem fotoaparátu.



obr 44: Použití piezomotoru k polohování snímače fotoaparátu a antiprachový filtr. [30]

Zrcadlovky využívají ultrazvuk také pro čištění snímačů, kdy ultrazvukový filtr generuje vibrace s frekvencí 35000 kmitů za sekundu, kterými setřásá prach z povrchu senzoru. Odstraněný prach je zachytáván na adhezivní pásce pod filtrem.

V leteckém průmyslu se piezomotory používají ke snížení váhy komponentů. Automobilový průmysl je využívá pro jejich malé opotřebení, nízkou cenu a malou velikost ovládacích komponentů.

Využití piezomotorů je také v telekomunikační technologii. Optická vlákna v kombinaci se zvyšujícím se provozem v sítích dávají stále vyšší požadavky na mikro-mechanické dynamické nastavení a obrovskou přesnost. Nanometrová přesnost a malá velikost piezomotoru v tomto odvětví jsou ceněné vlastnosti [32].

3.4 Tlumení hluku pomocí piezoelektrických komponentů

Řešení problémů s hlukem se stává prioritou vlád rozvinutých zemí především z hlediska přísnějších regulačních opatření. K potlačování přenosu hluku existují nyní dva principiálně odlišné konvenční přístupy a to pasivní a aktivní. Pasivní způsob je založen na principu použití zvukových bariér z hutných materiálů (cihly, beton, kov...), porézních (vata, netkané textilie...) a z viskoelastických materiálů (například pryžové vrstvy...). Výhodou pasivního tlumení je cena a dostupnost izolačních materiálů. Nevýhodou se v některých aplikacích může stát objemnost pro dosažení určitého stupně tlumení. To ve výsledku znamená nárůst hmotnosti tlumeného systému. Kvalitní odhlučnění pasivními materiály by tudíž bylo problematické použít například v letadlech nebo dopravních prostředcích. Aktivní přístup tlumení hluku, založený na destruktivní interferenci zvukových vln ve vzduchu, se skládá ze soustavy mikrofónů a reproduktorů. Soustava je připojena k počítači, který vyhodnocuje přicházející zvuk a vytvoří zvuk stejné amplitudy, ale opačné fáze a vyšle jej do reproduktorů. Sloučením obou vln se vlny vyruší a v ideálním případě jsou nepostřehnutelné lidským uchem. Nevýhodou je, že tento systém lze použít jen v omezeném prostoru na nízkých frekvencích. Realizace je komplikovaná a provoz náročný na elektrickou energii. Na základě negativit obou možností potlačování hluku, vznikla nová metoda, a to využívání unikátních materiálových vlastností piezoelektrických materiálů.

Moderní semiaktivní přístup tlumení hluku je založen na jednoduchém akustickém jevu, na odrazu zvukových vln na rozhraní dvou prostředí. Dopadne-li vlna šířící se vzduchem na rozhraní s jiným prostředím, část zvukové vlny se odrazí zpět a zbylá část vlny rozhraním projde. Je-li rozhraní tvořeno například okenní tabulí, pak odraz zvukové vlny způsobí rozechvění skla a to potom funguje jako zdroj hluku pro

prostředí za ním. Rozechvění, v tomto případě skla, se dá tlumit použitím piezoelektrických materiálů s aktivním řízením jejich elastických vlastností, nebo-li zvýšením ohybové tuhosti. Jako příklad praktické realizace této metody uvádím protihlukový štít. Piezoelektrická membrána o tloušťce 40 μm z PVDF materiálu je napnuta do rámu 20x30 cm. Membrána je připojena k aktivnímu elektronickému obvodu, který je navržen tak, aby zvýšil neprůzvučnost membrány ve frekvenční oblasti okolo 300 Hz a bylo dosaženo minimálního útlumu 25 dB pro všechny slyšitelné frekvence. V tomto přístupu tlumení hluku se využívá jednak pasivní metody tlumení a je možné ještě ve vybrané frekvenční oblasti tlumení zesílit činností aktivního elektronického obvodu, který podstatně zvýší neprůzvučnost zvukového štítu. Při pokusech bylo dosaženo snížení hluku a vibrací až o 40 dB v široké frekvenční oblasti od 1 kHz do 100 kHz. Tato metoda nabízí realizaci levného, lehkého a jednoduchého zařízení s nízkou spotřebou, které může být využito v letadlech, vysokorychlostních vlacích a dalších hlučných prostředích.

Veliký zájem je zaměřen na adaptroniku, což je integrace sensorových a aktuálních funkcí materiálů, především právě piezoelektrických. Tyto materiály, s podporou externího zpracování dat a řídicích prvků mohou nahradit složité a někdy až příliš těžkopádné technické systémy, přitom s nižší spotřebou energie [25], [32].

3.5 Detekce plynů

Krystalové rezonátory se využívají také pro detekci plynů a par obsažených v okolní atmosféře. Plynové senzory na bázi krystalových rezonátorů využívají různé sorpční vrstvy mající afinitu k molekulám sledované látky. Nasorbované molekuly detekovaného plynu představují hmotnostní přírůstek a změnu viskoelastických vlastností vrstvy, což se projeví změnou rezonanční frekvence. Selektivita odezvy je pak dána volbou materiálu sorpční vrstvy [21], [11].

3.6 Ultrazvuková zařízení

Ultrazvukem označujeme mechanický kmitavý pohyb pružného prostředí, jehož frekvence je vyšší jak 20 kHz a tudíž je lidským uchem neslyšitelný. Od zdroje se šíří v podobě mechanického vlnění (periodická pružná deformace prostředí), které existuje pouze v látkovém prostředí. Ve vakuu se zvuk nešíří. Podle směru kmitání částic rozlišujeme příčné a podélné vlnění. Podélné vlnění souvisí s podélnou deformací, kdy

se střídá zhušťování a zředování prostředí. Toto vlnění se může šířit jak v kapalinách, plynech i v pevných látkách, kde se navíc šíří i formou příčného vlnění. Při dopadu zvuku na překážku se zvuk odrazí, mění se směr jeho šíření. Ultrazvukové vlnění je buzeno a přijímáno piezoelektrickými měniči, kdy se odražená vybuzená vlna na piezoelektrickém snímači (sonda) opět mění na signál a ten je potom porovnáván s vyslaným signálem. Vlastnosti ultrazvukového pole jsou dány především tvarem měniče a poměrem jeho charakteristického rozměru k vlnové délce ultrazvuku v prostředí do kterého měnič vyzařuje. Důležitým parametrem piezoelektrického měniče je jeho rezonanční frekvence popsána rovnicí (15).

$$f_0 = n c_p / 2L, n = 1,3,5 \quad (15)$$

kde

c_p ... rychlost šíření akustické vlny v materiálu měniče

L ... tloušťka piezokrystalu

n ... liché číslo: pro $n=1$... základní rezonanční frekvence

Předešlý výraz lze přeformulovat tak, že rezonance piezomateriálu nastává tehdy, je-li tloušťka krystalu rovna lichým násobkům poloviny vlnové délky, vyjadřuje rovnice (16)

$$L = n \lambda_p / 2, n = 1,3,5 \quad (16)$$

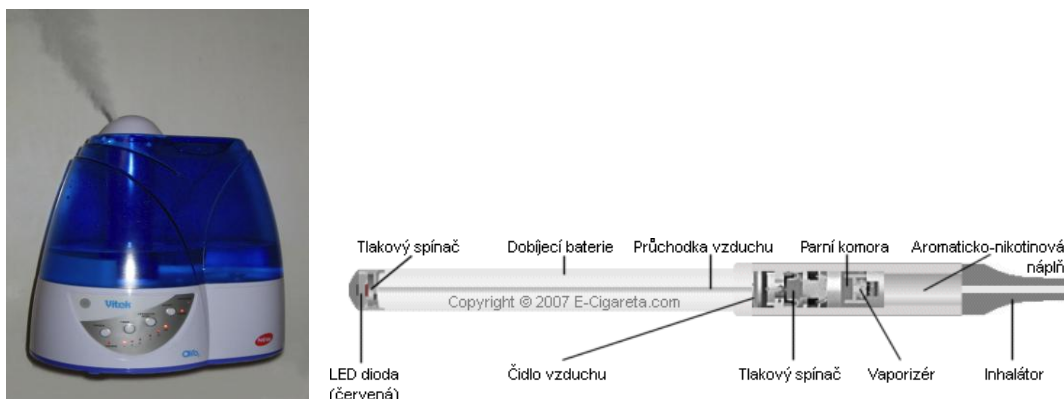
Ve stavu rezonance je vysílaný akustický tlak, tedy i energie vysílané ultrazvukové vlny největší. Při sudých harmonických frekvencích se vysílané a odražené vlny setkávají v protifázi a amplituda akustického tlaku je minimální. Další významnou veličinou, která vedle kmitočtu charakterizuje ultrazvukové pole, je intenzita ultrazvuku.

Ultrazvuk má široké využití v běžném životě. Používá se v průmyslu, kde se uplatní při defektoskopii (nedestruktivní kontrola materiálů), kontrole homogenity, měření tloušťky materiálu, dále pak při čištění vzduchu (odstraňování exhalací), čištění předmětů jako například brýle, šperky, používá se také při sterilizaci mléka a vody. Nepřehlédnutelný význam má ultrazvuk v lékařství, kde je používán pro různá diagnostická zařízení, rozbíjení žlučových kamenů atd. Nachází uplatnění také ve vojenství a rybářství. Na principu ultrazvuku funguje také sonar, který zjišťuje polohu a vzdálenost různých těles. Dalším typickým použitím ultrazvuku, jsou parkovací čidla na

autech, kontrola výšky hladiny, počítání výrobků na páse atd. Pro ultrazvuková zařízení se používají zejména keramické měniče, díky opracovatelnosti do požadovaných tvarů s cílem směřovat vlny [33].

3.6.1 Rozprašování kapalin ultrazvukem

Rozprašování kapalin ultrazvukem se používá například pro aplikaci léků na sliznici v malých kapkách, dále pak na zvlhčování vzduchu, ale také na nanášení kapek na povrchy vláken, piezoelektrické rozprašování je použito i v elektronické cigaretě a v dalších podobných aplikacích. Povrch kapaliny se pohybuje díky ultrazvukové vlně. Výhodou je, že velikost kapek se dá definovaně řídit v řádu mikrometrů. Dá se snadno kontrolovat atomizované množství tekutiny a velikost částic.



obr 45: Ultrazvukový rozprašovač a elektronická cigareta [8]

3.6.2 Ultrazvukové homogenizátory (desintegrátory)

Ultrazvukové homogenizátory (desintegrátory) generují ultrazvukové pole o vysoké intenzitě a amplitudě, které je přenášeno pomocí sond do kapaliny. Toto velice intenzivní ultrazvukové pole umožňuje kvalitativně nové aplikace ultrazvuku jako například: rozrušování buněk, bakterií, virů, tkání, urychlování chemických reakcí nebo štěpení vysokomolekulárních látek. Ultrazvukové homogenizátory nacházejí uplatnění v laboratořích, v průmyslovém výzkumu při přípravě vzorků pro kontrolu kvality. Další využití je při výrobě menších šarží speciálních produktů, například výroba kvalitních emulzí, kosmetických přípravků, antigenů, vakcín atd.



obr 46: Ultrazvukový homogenizátor včetně sondy

3.6.3 Kontrola tloušťky materiálu pomocí ultrazvukových přístrojů

Měření je realizováno pomocí ultrazvukové impulzní metody. Přístroj vysílá i přijímá impulzy, které se odrážejí od protější hrany zkoušeného předmětu a měří čas, za který odražený impulz dorazí zpět do přístroje. Například při měření tloušťky oceli vycházíme ze známé rychlosti šíření vln v oceli ($c_s = 5920$ m/s) přístroj pak vypočítá dráhu, kterou signál urazí a dle svého nastavení ji vyhodnotí jako tloušťku, respektive délku měřeného materiálu.



obr. 47: Použití ultrazvukového měřiče pro měření tloušťky materiálu [8]

Na obrázku 47 je použit přístroj SONIC 1200HR s přímou sondou, kterou změříme tloušťku materiálu. Příkladem může být kontrola tloušťky základových patních plechů ocelových zásobníků tekutin. Před vlastním měřením je třeba kalibrace přístroje, dále pak volba měřících míst a vhodná metoda pro objektivitu měření a také důkladné očištění měřených míst pro navázání akustické vazby. Ultrazvukové přístroje lze dále použít i na kontrolu délky kotevních šroubů, trnů, nebo výztuží, ověření kvality svarů, určení skrytých vad kotevních systémů.

Ultrazvukový přístroj SONIC 1200HR od firmy STAVELEY INSTRUMENTS INC. lze použít i s úhlovou sondou. Součástí sondy je potom nástavec nejčastěji z plexiskla nebo polystyrenu s úhlem nastaveným podle velikosti kritických úhlů pro dané materiálové rozhraní. Ultrazvukové měřicí přístroje s úhlovou sondou se používají pro defektoskopii, kde se nejvíce kontrolují ocelové materiály a proto jsou sondy cejchované převážně pro ocel. Používá se nejčastěji úhel 35 nebo 45 stupňů. Úhlová sonda se používá také pro kontrolu kvality svarů, znázorňuje obrázek 48.



obr 48: Použití ultrazvukového měřicího přístroje s úhlovou sondou pro kontrolu kvality svarů [8]

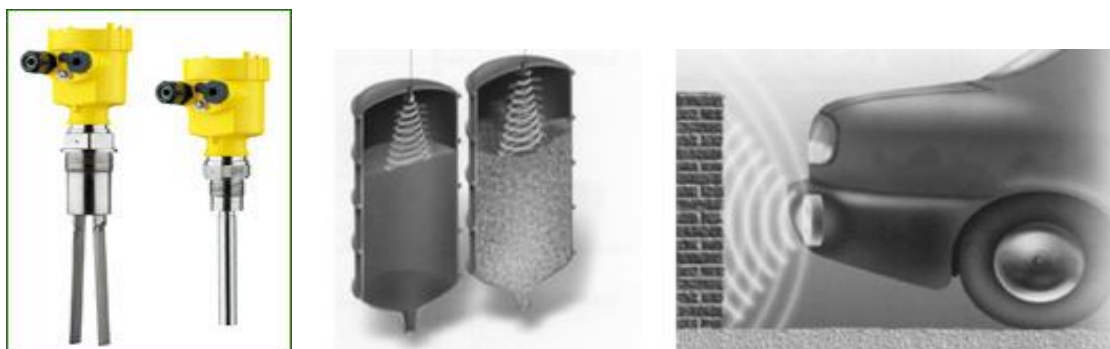
3.6.4 Aplikace ultrazvukových senzorů

Detekce přítomnosti lahví v prostředí se stříkající vodou. V tomto prostředí se nedá použít optický senzor, právě díky přítomnosti stříkající vody. Využívá se tedy ultrazvukový senzor s krytím IP67 v provedení jako jednocestná závora.

Zjišťování výšky hladiny materiálů pohlcujících zvuk. Jedná se o sypké materiály, které práší a opět se v těchto aplikacích nedá použít optosenzor. Použijeme zde ultrazvukový senzor, u kterého nastavíme aktivní rozsah až na konec vyřazovací charakteristiky. Ultrazvukový senzor se montuje v horizontálním směru. Je-li v dráze ultrazvukové vlny přítomen sypký materiál, který vlny pohltí, nedostane se zpět žádná odražená vlna.

Reflexní měření výšky hladiny. V tomto případě se porovnává doba, za kterou se vrátí odražená vlna. Ultrazvukový senzor se montuje ve vertikálním směru. Piezoelektrický člen se zde používá opět v módu vysílač – přijímač, tedy nepřímý – přímý piezoelektrický jev.

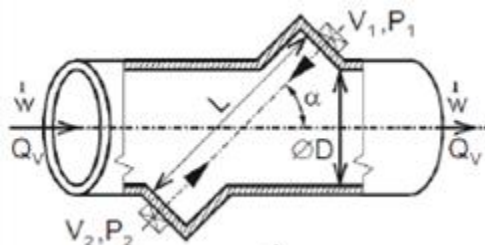
Vibrační hladinové spínače (na obrázku 49) pracují na principu porovnávání charakteristik kmitání tělesa ve volném prostoru oproti kmitání v prostoru zaplněném kapalinou nebo sypkým materiálem. Vibrujícím prvkem je tyč nebo vidlice, které jsou rozkmitávány na rezonanční frekvenci piezoelektrickým měničem. Ve volném prostoru kmitá vibrující prvek na rezonanční frekvenci, jakmile dosáhne hladina na vibrující prvek, nastane útlum amplitudy kmitů a změní se frekvence kmitání. Elektronika vyhodnocovacího obvodu porovná okamžitou hodnotu signálu a jakmile frekvenční posun dosáhne nastavené žádané hodnoty, změní spínač svůj stav. Při měření v prostředí s turbulencí hladiny, nebo při rozstříku kapaliny, lze zvýšením hodnoty časového zpoždění eliminovat riziko chybného spínání. Některé typy těchto spínačů jsou vybaveny monitorováním poruchových stavů. Uplatnění vibračních hladinových spínačů je vysoké, lze je využít k indikaci mezních úrovní čistých i znečištěných kapalin, detekce úrovně kalů v odpadní vodě, sypkých hmot a prášků jako jsou například cement, písek, cukr, sůl, káva, kusové uhlí apod. [34].



obr. 49: Vlevo vibrační spínače hladiny, uprostřed reflexní měření výšky hladiny, vpravo parkovací senzor. Parkovací senzor je dalším typickým použitím ultrazvukového vysílače – přijímače.

Ultrazvukové senzory průtoku jsou založeny na změně rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového signálu průtokem kapaliny. Ultrazvukový signál se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které jsou umístěny na stěnách potrubí v němž se měřená kapalina pohybuje rychlostí v . Proudění kapaliny vyvolá změnu rychlosti ultrazvukového signálu. Ultrazvukový signál je vysílán i přijímán ultrazvukovým měničem, pracujícím střídavě v režimu vysílač – přijímač. Mezi hlavní výhody těchto

snímačů patří absence pohyblivých částí. Ultrazvukové snímače průtoku je tedy možné použít například pro agresivní a výbušné kapaliny. Nevýhodou mohou být jisté nepřesnosti měření vlivem změny teploty, viskozity a hustoty měřené kapaliny. Na obrázku 50 značí V_1 , V_2 vysílací funkci měření a P_1 , P_2 funkci přijímací [34].



obr 50: Instalace snímačů v potrubí [25]

Piezoelektrické tvrdoměry - jako příklad uvádím moderní přenosný tvrdoměr Sonohar SH-21, tento přístroj pracuje na principu závislosti změny vlastní rezonanční frekvence sondy od velikosti vpichu zkoušeného materiálu. Zkušební sonda je opatřena diamantovým jehlanem podle Vickerse. Hloubka vniknutí jehlanu do materiálu a tím i celková kontaktní plocha mezi jehlanem a materiálem je úměrná změně rezonanční frekvence rezonátoru sondy. Rezonátor s diamantovým hrotem je pomocí piezoelektrického efektu vybuzený k oscilaci v podélném směru, působící zpětná síla způsobí zvýšení rezonanční frekvence měřící sondy a tím dojde k odečtení a přepočítání hodnot HV. Tato metoda se používá pro měření tvrdosti materiálů, jako jsou železné i neželezné kovy, teflon, sklo [24].

3.7 Adaptivní materiály a systémy

Adaptivní materiály lze jinak také pojmenovat jako materiály inteligentních struktur, jenž se prostřednictvím autonomních, či samořídících mechanismů přizpůsobují různým provozním podmínkám. Předpokladem pro funkčnost adaptivních materiálů je optimální systémové propojení senzorů a aktuátorů na bázi nových funkčních materiálů jako jsou piezoelektrická vlákna a fólie, ukázka na obr. 51. Je-li dobře nastaveno spojení senzor a aktuátor v rámci multifunkční struktury se systémem zpracování dat, vznikne celý adaptivní systém, který je schopen automaticky reagovat na podnět zvenčí, z prostředí v němž je struktura umístěna. Jedná se především o reakce na změnu elektrického proudu, změnu teploty, nebo změnu magnetického pole. Materiály

takto používané ve spojení se sebeučícím se řídicím prvkem se nazývají „adaptabilní“ a kompletní jednotka potom tvoří „adaptivní systém“.

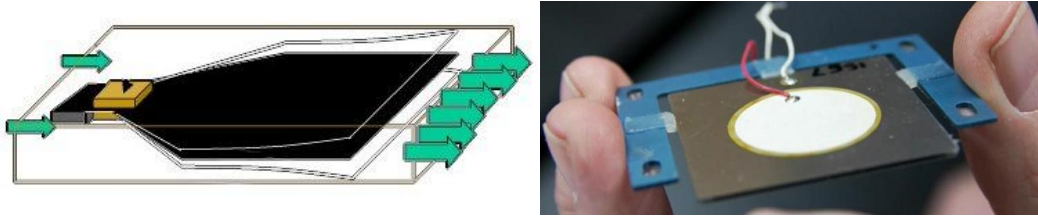


obr. 51: Piezoelektrická vlákna [1]

Adaptabilní materiály nachází uplatnění již v mnoha aplikacích, ať již ve vojenském průmyslu nebo v automobilním odvětví tak i ve strojírenství v obráběcích technologiích. Systémy založené na chytrých a adaptivních materiálech s integrací senzorů a aktuátorů s podporou externího zpracování dat a řídicích prvků, začnou už brzo přebírat řadu úkolů, které dnes vykonávají složité technické systémy. Důležitou roli bude hrát i úspora energie při použití těchto materiálů.

Firmy vyvíjejí také tenkou piezoelektrickou fólii, která dokáže ve spektru 20 Hz až 20 kHz fungovat jako reproduktor. Řešení našli v kombinaci viskoeleastického polymeru a piezoelektrického kompozitu, kdy při přiložení napětí začne kompozit vibrovat a polymer funguje jako membrána. Vše by také mohlo fungovat naopak a potom by taková membrána rozechvěná lidským hlasem dobíjela třeba baterii mobilního telefonu, nebo baterii podobného zařízení.

Pohyb piezoelementů při přivedeném střídavém napětí může sloužit také k víření vzduchu a chladit tak například počítačové součástky. Největší výhodou tohoto principu chlazení je nízká náročnost na elektrickou energii okolo 2 mW, dále také rozměry tohoto zařízení a téměř zanedbatelná hladina hluku při provozu. Výhodou je také nízká náchylnost k opotřebení a odolnost vůči prachu, znázorňuje obrázek 52.



obr. 52: Vlevo piezoelektrický vějíř, vpravo vzduchová pumpa [32]

Další možný typ „ventilátoru“ na obrázku 52, je tvořen dvěma listy či destičkami z piezoelektrického materiálu spojenými po okrajích. Pokud je elektricky vybudíme, tyto destičky se prohnou. Periodickou aktivací obou listů dochází k cyklickému prohýbání a narovnávaní. Tím vzniká pulzující dutina, která střídavě nasává okolní vzduch a poté ho zase vypuzuje ven, takže funguje jako pumpa. Při rychlém kmitání údajně dokáže vytvořit průvan o značné rychlosti proudění schopný chladit okolní elektronické součástky. Tento vynález byl inspirován fungováním plic [35], [36].

3.7.1 Aplikace ve větrných elektrárnách

Adaptabilní systémy jsou využívány ve větrných elektrárnách, kde jsou senzory lopatek jejich turbín vyráběny z piezoelektrických vláken zapuštěných do materiálu, z něhož jsou lopatky turbín vyrobeny. Takto vybavené lopatky jsou schopny reagovat na změny síly větru pohánějícího tyto elektrárny.

3.7.2 Aplikace piezoelektrických materiálů v letectví

Použití piezoelektrických materiálů „smart structures“ v letectví, konkrétně v konstrukci letadel, je zatím ve stádiu vývoje a testů. Cílem je použití kompozitů z piezoelektrických vláken pro konstrukci křídla letadla umožňující změnu tvaru křídla za účelem aerodynamické optimalizace letadla. To by mělo přinést změnu v principu řízení, náhradou klasických křidélek a klapek a tím snížení vibrací a hluku. Pro testování byla použita piezokeramická vlákna o průměru 0,25 mm a 0,8 mm. Testuje se také použití těchto materiálů pro konstrukci listů rotoru vrtulníku. Každá lopatka je řízena individuálně a to i při vysokých otáčkách, opět je zde snaha v podstatě tvarovat obtékání vzduchu kolem listu rotoru. Nicméně je třeba podotknout, že v leteckém odvětví je vždy ke komercializaci vyvíjeného typu dlouhá doba.

3.8 Ultrazvukové čištění

Ultrazvukové čištění se používá v mnoha aplikacích, ať již se jedná o čištění pleti, nebo například ultrazvukové čištění šperků, brýlí a podobně. Pro čištění pleti se používá ultrazvuková špachtle, která se skládá ze speciální pracovní hlavice a piezoelektrického systému oscilujícího na frekvenci 25 kHz. Hlavice obsahuje kovovou špachtli ohnutou v úhlu 45°, díky tomuto úhlu se ultrazvukové vlny mohou šířit po celém povrchu kůže a uvolňovat odumřelé buňky z kožního povrchu. Odumřelé buňky jsou uvolňovány na principu kavitace, kdy je tekutina vystavena vysokému vakuu, jakmile je absolutní tlak nižší než napětí tekutiny, vytvoří se silové pole a tekutina se začne odpařovat ve formě mikroskopických bublinek plynů obalených tekutinou. Tyto vzniklé bublinky podporují uvolnění odumřelých buněk. Příznivé jsou i mikromasážní účinky ultrazvuku.

Ultrazvukové čističky je možné použít v mnoha oborech. Základem je ultrazvukový generátor, jehož vysokofrekvenční energie se mění na mechanické kmitání pomocí piezoelektrických měničů umístěných na dnech ultrazvukových van.



obr. 53: Ukázka van piezoelektrických čističek

Ultrazvuková energie se přenáší do kapaliny ve vaně, kde způsobí vznik miliónů maličkých vakuových bublinek, které kolabují a vytvářejí vysoce efektivní tlakové vlny tzv. kavitaci, obrázek 53. Použijeme-li nižší frekvence, blízko 20 kHz - 25 kHz, vytváří se bublinky s větším průměrem a silnější tlakové vlny (v některých aplikacích dosahují lokální tlaky hodnot až 50 MPa), to se používá pro čištění větších robustnějších a silně znečištěných předmětů. Naopak vyšší frekvence okolo 35 kHz vytváří větší počet menších bublinek, které se využívají pro intenzivní, ale jemnější čištění. Čističky používají optici a výrobci skla pro odmašťování skla, čoček a optických soustav.

Používá je i automobilový průmysl při čištění vstřikovacích trysek, karburátorů, tlumičů, součástek motorů, plošných spojů a podobně. Také elektrotechnický průmysl využívá čističek na čištění součástek, plošných spojů, kontaktů. Ve strojírenství se používá ultrazvukové čištění na odmašťování ložisek, ozubení, filtrů, čištění povrchů před metalizací. Používají se i pro čištění řezných dřevozpracujících nástrojů, čištění forem v lisovně plastů, čištění počítačových součástek a dílů, filtrů do čističek vzduchu. V restauracích je možné takto vyčistit a odmastit sifony, kouřové filtry. V medicíně a zdravotnictví využijeme ultrazvukové čištění na čištění protéz, implantátů a lékařských nástrojů.

4 Perspektivní využití piezoelektrik v elektrotechnických aplikacích

4.1 Zvuková a ultrazvuková zařízení

Piezoelektrický reproduktor a mikrofon má výhodu ve značné variabilitě uspořádání a s tím spojenou miniaturizací zařízení. Hojně se využívá piezoplastická fólie, kterou je možno stáčet do role. Je používán často jako beeper v hodinkách, výškové reproduktory v levných aplikacích, reproduktory pro PC, přenosná rádia, telefonní sluchátka, signalizační zařízení a mnoho dalších aplikací. Piezomikrofony jsou inverzním měničem k piezoreproduktorům. Využívají se jako snímače ultrazvukových vln v měřicí technice, u sonarů, nebo v levných elektronických zařízeních. Zásadní nevýhodou piezoelektrických reproduktorů je poměrně nerovnoměrná frekvenční charakteristika a větší zkreslení. Naopak výhodou bývá poměrně vysoká účinnost, jednoduchá konstrukce a nízká cena. Právě díky nízké ceně je využití piezoreproduktorů obrovské, téměř každé zařízení, produkující nějaký zvuk, je vybaveno tímto typem „reproduktoru“. V současné době jsou již vyvinuty miniaturní voděodolné reproduktory s krytím IPX7, přitom jejich tloušťka je pouze 0,9 mm. Velmi dobrou vlastností těchto nových reproduktorů je elektromagnetická neutralita. Typickými aplikacemi jsou mobilní telefony, tablety, elektronické čtečky, digitální fotoaparáty atd.



obr. 54:Piezoelektrický reproduktor [35]

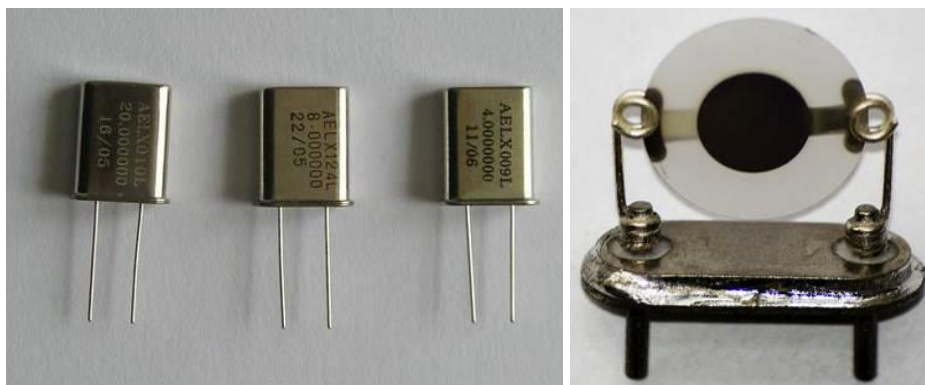
Piezoelektrické sirény, alarmy a vyráběné víceúčelové bzučáky jsou určeny k rozmanitému zvukovému použití, jsou rovněž konstruovány pro široký rozsah proudové spotřeby, elektrického napětí a zvukového tlaku. Piezoelektrické sirény se vyrábí v různých rozměrech dle katalogu vyrábějící firmy a s různými způsoby upevnění. Základem je piezoelektrický oscilátor, který upravuje pracovní frekvence. V miniaturních verzích se používají jako různé generátory zvuku ve spotřební elektronice, hračkách, v mobilních přístrojích atd. Také ochrana proti škůdcům pracuje na principu ultrazvuku s ostrým kmitočtem, který dráždí sluch hlodavců. Kvalitní odpuzovač by měl mít možnost automaticky měnit kmitočet, aby si škůdci časem na akustický signál nezvykli. Jsou prodávány plašičky na různé škůdce, liší se použitým kmitočtem.

4.2 Kontrola frekvence a zpracování signálu (rezonátory)

Piezoelektrický krystalový rezonátor QCM, jedná se o element z piezoelektricky aktivního materiálu nejčastěji ve tvaru destičky, tyčinky nebo prstence. Piezoelektrický krystalový rezonátor využívá přímého i nepřímého piezoelektrického jevu zároveň. Vhodně vyříznutá destička z piezomateriálu se opatří určitou konfigurací elektrod. Na elektrody se přivede střídavé napětí a destička se rozkmitá vlastním módem kmitu, který je dán geometrií, krystalovou orientací, materiálem destičky, geometrií elektrod a frekvencí přiloženého napětí. Hlavní druhy kmitů, tzv. módy jsou:

- ohybové s pásmem kmitočtů 1 kHz - 50 kHz
- podélné s pásmem kmitočtů 50 kHz - 180 kHz
- plošně střižné 180 kHz - 600 kHz
- tloušťkově střižné 0,8 MHz -160 MHz

Rezonance destičky je tedy vyvolána harmonickým a elektrickým polem o frekvenci blízké některé vlastní frekvenci rezonátoru. Amplituda mechanických kmitů bude maximální, jestliže frekvence elektrického napětí bude rovna mechanickému rezonančnímu kmitočtu. Rezonátor může kmitat řadou jednoduchých nebo vzájemně vázaných módů kmitů různých řádů. V aplikacích se však většinou využívá jediný mód. Mechanická rezonance destičky ovlivňuje i elektrické parametry součástky a tedy z pohledu obvodu, ve kterém je zapojen, se krystal chová jako velmi kvalitní elektrický rezonanční obvod. Na obrázku 55 je ukázka krystalových rezonátorů.



obr. 55: Krystalové rezonátory pro různé kmitočty a ukázka rezonátoru bez pouzdra [21]

Charakteristická rezonanční frekvence křemenného krystalu je 32768 Hz, je však ovlivněna orientací výbrusu a typem mechanické deformace. Pro rezonátory používané v radiotechnice nebo v akustice má zásadní význam velikost a stabilita rezonanční frekvence a vzájemná vazba nebo odstup sousedních módů kmitů. Současné použití rezonátorů klade vysoké nároky na přesnost jejich provedení. Na obrázku 55 je vidět postup výroby součástky, kdy se na přesný výbrus napaří tenké stříbrné nebo zlaté elektrody, jejichž tvar je závislý na požadovaném typu rezonance. Na elektrody se nakontaktují vývody a krystal se uzavře do kovového pouzdra. Pro krystaly se speciálními požadavky na stabilitu se provádí uzavření do speciálního vakuového pouzdra nebo se umisťují do termostatu, který eliminuje teplotní závislost kmitočtu.

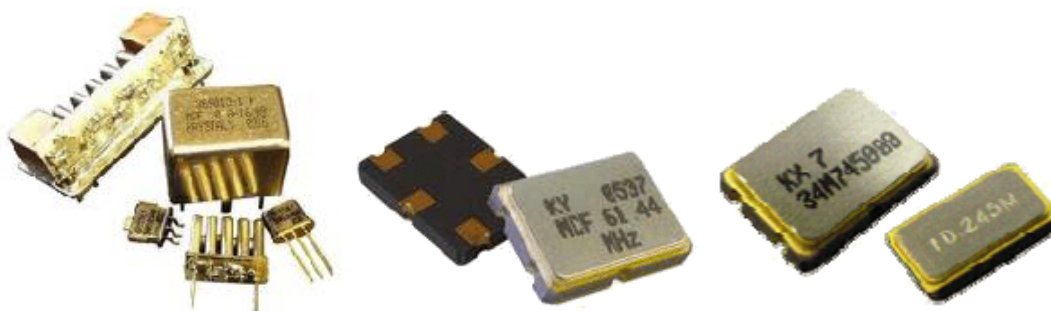
Krystalové rezonátory nacházejí uplatnění v řadě moderních zařízení. Tradičně u aplikací v oscilačních a filtračních elektrických obvodech, v budičích akustického signálu, v senzorech, ale také v aktuátorech, v ultrazvukových motorech, nebo v piezoelektrických transformátorech. Používají se jako frekvenční filtry v radiových přijímačích, ve vysílačích, v elektronických hodinkách, dále pro taktování procesorů

PC a dalších zařízení spotřební elektroniky. Dalším využitím piezoelektrických rezonátorů jsou diagnostické lékařské přístroje (ultrazvukové sondy, fonograf, tomograf), inhalátory léků, zvlhčovače vzduchu a mnoho dalších přístrojů. Využití QCM rezonátorů je vsutku široké, například použití v mikrováhových senzorech „QCM100 a QCM200“, které umožňují měřit hmotu v rozsahu mikrogramů po zlomek nanogramu s hranicí citlivosti odpovídající submonomolekulárním vrstvám atomů. Pro své schopnosti jsou proto QCM100 nebo QCM200 základním doplňkem biologické laboratoře, kde slouží jako imunologické senzory, sorpční senzory, analyzátoři vlhkosti, monitorování částic, monitorování znečištění, měření mocenství, vodíková absorpce na kovových vrstvách, utváření bublin, výzkum redukčních a vodivých polymerů, studie korozi, studia povrchových oxidací, studie DNA a RNA hybridizace, reakce protilátek, adsorpce proteinu, vyhledávání virů, bakterií a savčích buněk [5], [11].



obr. 56: Mikrováhové systémy QCM100 a QCM200 [1]

Krystalové filtry jsou dalšími součástkami pro zpracování signálu. Vyrábějí se v různých provedeních. Krystalové filtry v kovových pouzdech se používají například v bezdrátových komunikačních systémech, v měřicí technice atd. Další variantou jsou 2-pólové filtry v keramickém pouzdře SMD. Jejich výhodou je dobrá mechanická odolnost, jsou vakuově uzavřené pomocí švového sváru. V keramickém pouzdře se vyrábějí také 4-pólové filtry, jejich předností je vysoký útlum v potlačeném pásmu.

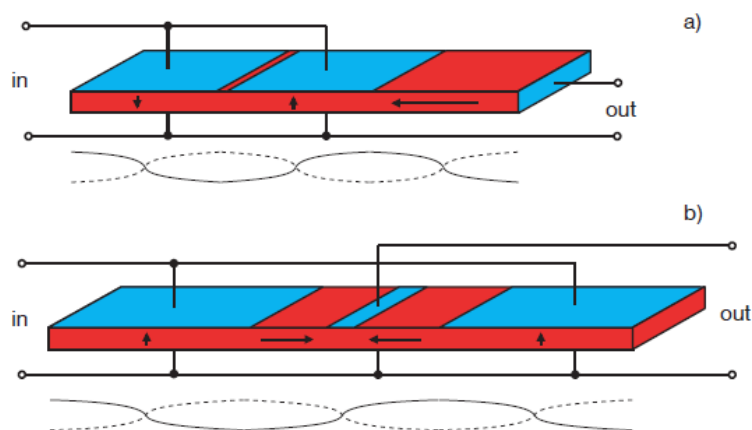


obr. 57: Nalevo filtry v kovovém pouzdru, uprostřed a vpravo filtry v keramickém pouzdře [21]

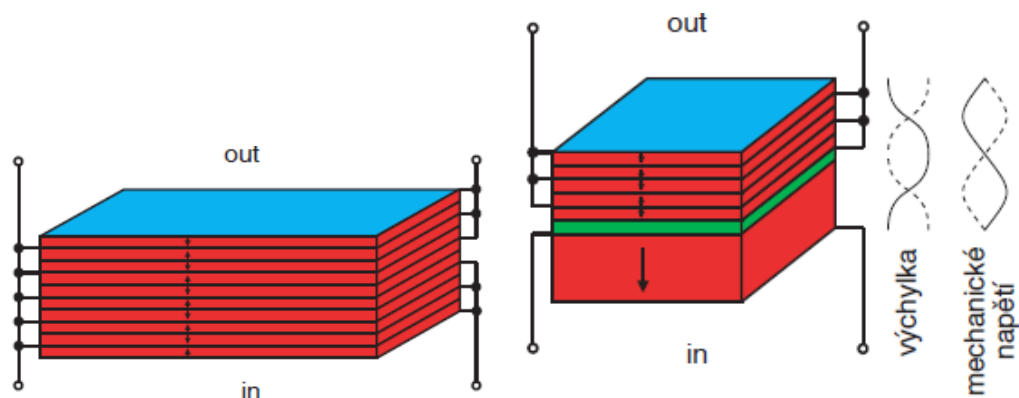
4.3 Piezoelektrické transformátory

Tyto transformátory jsou používány, podobně jako běžnější elektromagnetické, k transformaci střídavých elektrických napětí. Primární obvod piezoelektrického transformátoru je buzen napětím o vhodné frekvenci blízké rezonanční frekvenci prvku pomocí nepřímého piezoelektrického jevu. V sekundárním obvodu je na principu přímého piezoelektrického jevu generováno výstupní napětí. V těchto transformátorech je k transformaci napětí použita společná mechanická deformace v primárním i sekundárním obvodu. Pro srovnání elektromagnetický transformátor používá vazbu magnetickým polem na společném jádru. Piezoelektrické transformátory mohou být vyrobeny z jakékoliv piezoelektrické látky, ať už z monokrystalu nebo z keramik. Z ekonomických důvodů se v běžných aplikacích používají výhradně levnější keramické materiály, zvláště pak piezoelektrická keramika PZT. Piezoelektrické transformátory mají, proti tradičním elektromagnetickým, několik výhod, především pak malé rozměry a malá hmotnost, dále také vyšší účinnost při stejném poměru výkonu k objemu. Důležitou výhodou je v určitých aplikacích také absence elektromagnetického šumu, lze ocenit i nehořlavost této součástky. Díky těmto výhodám se využijí při vysokém stupni integrace a miniatuřizace moderní elektroniky. Piezoelektrické transformátory proto nacházejí uplatnění v měničích AC-AC, nebo AC-DC, v řídicích jednotkách fluorescenčních lamp se studenou katodou, například podsvětlení displejů z tekutých krystalů. Mohou být integrovány s piezoelektrickými motory. Aplikace AC-DC slouží jako zdroje stejnosměrného napětí nebo jako rychlé regulátory. Za podmínek současné minimalizace rozměrů se používají při vysokofrekvenčním spínání, kdy klasické elektromagnetické transformátory ztrácejí účinnost při vysokých frekvencích vlivem magnetických hysterezních ztrát v jádru.

Obecně lze piezoelektrické transformátory rozdělit na dva typy. První je založen na homogenní keramické destičce, druhý typ používá vícevrstvou strukturu, obrázek 58 a 59.



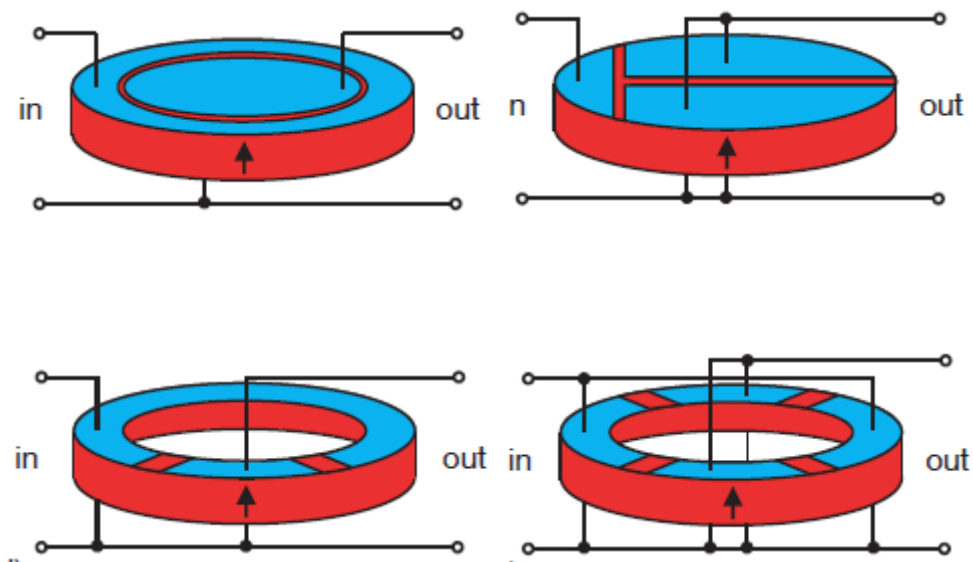
obr. 58: Jednovrstvý piezoelektrický transformátor Rosenova typu, dva různé designy. Vlnovkou je schematicky znázorněna podélná výchylka kmitů, šipka vyznačuje směr polarizace keramiky. [37]



obr. 59: Vícevrstvý piezoelektrický transformátor, vlevo pracující v tloušťkově rozpínacím módu, vpravo v délkově rozpínavém. Šipka značí směr polarizace, vlnovka značí průběh mechanického napětí a výchylky kmitů. [37]

Provozní parametry jsou ovlivněny využitím různých módů mechanických kmitů. Jednotlivý pracovní mód určuje systém elektrod, směr polarizace keramiky a také tvar prvku piezoelektrického transformátoru. Oba typy, jak jednovrstvý i vícevrstvý, mohou vstupní napětí zesilovat nebo zeslabovat v závislosti na konstrukci, pracovní frekvenci a impedanční zátěži.

Výkonové aplikace s použitím PT jsou limitovány generováním tepla vlivem dielektrických ztrát. Nárůst teploty vede ke změně materiálových vlastností a tím k degradaci provozních parametrů.



obr. 60: Ukázka prstencových piezoelektrických transformátorů [37]

Materiál vhodný pro PT by měl splňovat určitá kritéria jako jsou:

- Vysoké koeficienty elektromechanické vazby, které vedou k velkému zesílení.
- Vysoká mechanická jakost Q_m , která ovlivňuje stabilitu frekvence, účinnost, snížení generování tepla.
- Vysoká elektrická jakost Q_e ovlivňující množství generovaného tepla, malá závislost impedance PT na frekvenci
- Vysoká Curieova teplota T_c , která umožní nastavení pracovních podmínek na vyšších teplotách.

Tyto požadavky na větší zesílení a vyšší hustotu výkonu vedly k návrhům mnoha nových designů piezoelektrických transformátorů.

Hodnotícími ukazateli PT jsou zesílení vstupního elektrického napětí, hustota výstupního výkonu jako podíl výstupního výkonu a objemu PT a účinnosti myšlenou jako podíl výstupního a vstupního výkonu [37], [15].

4.4 Piezoelektrická tlačítka, spínače, klávesnice

Princip fungování piezoelektrického spínacího prvku je založen na přímém piezoelektrickém efektu. Při zmačknutí povrchu piezo tlačítka dochází k deformaci piezoelektrického prvku instalovaného pod vnějším povrchem a na jeho elektrodách

vzniká napětí dostatečné pro kontrolu bezkontaktních tranzistorových klíčů. Tlačítko nepotřebuje samostatný zdroj napájení, na výstupu má suchý kontakt. Tyto tlačítka se hodí v extrémních klimatických podmínkách, také jsou značně odolné proti vandalismu. Piezoelektrická tlačítka se vyrábějí v několika verzích pro různé použití, obr. 61.



obr 61: Různé verze piezoelektrických tlačítek [38]

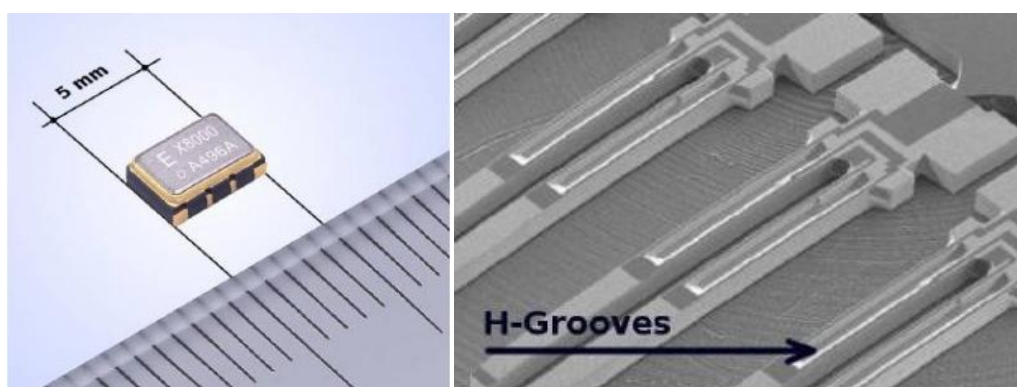
Piezoelektrické klávesnice splňují současné požadavky na energetickou úspornost, spolehlivost, kompaktnost a kompatibilitu s počítačovými kontrolními a řídicími systémy. Využití piezoelektrických materiálů ve spínacích výrobcích dnes přináší novou kvalitativní úroveň. Principiálně je piezoelektrická klávesnice sada piezoelektrických spínačů spojených v rámci jednoho panelu a připojených k jednomu společnému obvodu. Výhodou těchto klávesnic je opět absence pohyblivých dílů a možnost umístění v kovovém pouzdře což zajišťuje vysokou elektromagnetickou kompatibilitu, vodotěsnost (IP68) a spolehlivost [38].



obr 62: Ukázka moderních piezoelektrických klávesnic [38]

4.5 Gyroskopické senzory

Existuje mnoho řešení realizace senzorů zrychlení a rotace tzv. gyroskopické senzory. Například firma Epson Toycom proto vyvinula řadu miniaturních gyroskopických senzorů založených na principu vidlicové ladičky. Díky špičkovým technologiím je možné při minimalizaci součástky zachovat vysokou spolehlivost a odolnost s výbornými parametry, jako je frekvenční a teplotní stabilita.



obr. 63: Vlevo gyroskopický senzor XV-8000CB vhodný pro inerciální navigaci, vpravo krystal 32kHz s technologií QMEMS [1]

Do příchodu piezoelektrických gyroskopů vyráběných technologií QMEMS byl problém s použitím inerciální navigace díky její vysoké ceně způsobené použitím drahých „konvenčních“ akcelometrů a gyroskopů. Piezoelektrické gyroskopy se používají například jako krátkodobá náhrada GPS při jejím výpadku, v zeměměřičství atd. Tyto gyroskopy se využívají například i pro kompenzaci reakce hlavního rotoru RC vrtulníků a jistě i v mnoha dalších podobných aplikacích [39].

5 Zhodnocení perspektivního využití piezoelektrických materiálů

V dnešní době jsou velkým přínosem při vývoji nových aplikací s využitím piezoelektrických materiálů moderní materiály, mezi které patří například piezoplastické fólie a piezoelektrická vlákna. Ke vzniku kvalitních piezoelektrických součástek přispívají také unikátní technologické postupy při jejich výrobě. Spojením moderních materiálů a moderních technologií výroby vznikají piezoelektrické součástky malých rozměrů, nízkých hmotností a s výbornou frekvenční a teplotní stabilitou. Takto vyrobené piezoelektrické součástky poskytují, vůči technologiím používaných v minulosti, vyšší účinnost při stejném poměru výkonu k objemu. Mnohé piezoelektrické součástky jsou v aplikacích používány díky své absenci elektromagnetického šumu, další výhodou může být nehořlavost těchto součástek, výhodou je často i vysoká mechanická odolnost piezoelektrické součástky. Díky všem těmto vyjmenovaným vlastnostem moderních piezoelektrických součástek je vysoká perspektiva jejich využití v odvětvích, jako je například lékařství. V tomto odvětví jsou již piezoelektrické materiály hojně používány, ale vývoj nových špičkových lékařských přístrojů vyžaduje stále kvalitnější součástky a právě moderní piezoelektrické součástky mohou tyto požadavky uspokojit. Jako perspektivní vidím použití adaptivních piezoelektrických materiálů také v letectví, ať již pro tvarování plochy křídla, nebo odhlučnění kabiny letounu. V elektrotechnických aplikacích je veliký potenciál ukryt také v různých piezoelektrických tlačítkách a v transformátorech bez magnetického pole. Perspektivní je rovněž použití piezoelektrických motorů pro jejich rychlost a přesnost polohování jak při výrobních procesech, tak i ve spotřební elektronice.

6 Závěr

Cílem mé práce byla rešerše využití piezoelektrických materiálů. Dle mého názoru se mi povedlo vytvořit přehled používaných piezoelektrických materiálů. Dále jsem vytvořil přehled použití piezoelektrického jevu v jednotlivých aplikacích, kde jsem zároveň popsal výhody a nevýhody, které použití piezoelektrického jevu v konkrétní aplikaci přináší. V diplomové práci se zabývám také historií vzniku piezoelektrického jevu a použití piezoelektrických materiálů od jejich počátků v podobě výbrusů piezoelektrických krystalů až do dnešní doby, kdy se již používají různé piezoelektrické fólie a piezoelektrická vlákna.

Jako další možnost využití piezoelektrického jevu bych viděl v podobě piezoelektrického generátoru umístěného na tlumiči každého kola elektromobilu nebo hybridního automobilu. Takto instalovaný piezoelektrický generátor by pak spolu s funkcí tlumiče automobilu využíval rázy od kol způsobené nerovnostmi vozovky. Vygenerovaná energie by pak byla pomocí elektroniky upravena k použití, jako další pomocný zdroj energie k dobíjení akumulátorů hybridních a elektrických vozidel. Dojezd elektromobilů a úspora paliva u hybridních automobilů je závislá na stavu nabití akumulátoru, a proto každý příspěvek energie k dobíjení je v těchto systémech přínosem ke zvyšování celkové účinnosti pohonu. Piezoelektrický generátor, takto umístěný na tlumičích rázu nebo tlumičích vibrací, by se podobně jako u automobilu nechal využít i u dalších strojů a spotřebičů ke snížení jejich spotřeby energie.

Použité zdroje:

- [1] Wikipedia. *Piezoelektrický jev* [cit. 10.1.2013]. Dostupné z: <http://www.wikipedia.org/>
- [2] ERHART, J. *Demonstrujeme piezoelektrický jev*, Matematika, fyzika, informatika 2010. 106-109s.
- [3] MOHEIMANI, S. O. R. a A. J. FLEMING. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping: Advances in industrial control*. 1. vyd. Germany: Springer, 2006. 271 s. ISBN-13: 9781846283314.
- [4] PETRŽÍLKA, V., SLAVÍK J.B., ŠOLC, I., TARABA, O., TICHÝ, J., ZELENKA, J., *Piezoelektrina a její technické použití*. NČSAV, Praha 1960.
- [5] Ferroperm. *Piezoelektrické materiály* [cit. 22.2.2013], dostupné z: <http://www.ferroperm-piezo.com/>
- [6] Noliac. *Piezo ceramics* [cit. 22.2.2013], dostupné z: <http://www.noliac.com/>
- [7] HEYWANG, Walter; LUBITZ, Karl; WERSING, Wolfram. *Piezoelectricity : evolution and Future of a Technology*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. 580s. ISBN 978-3-540-68680-4, e-ISBN 978-3-540-68683-5.
- [8] Techmania. *Piezoelektrický jev* [online]. 2008 [cit. 2013-1-14]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php
- [9] Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. *Web.natur.cuni.cz: Mineralogie pro školy* [online]. 2000 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral/mineral/kremen.html>
- [10] PAVLOVEC, J., ŠRAMAR, J. *Krystalové jednotky a oscilátory*. Amatérské rádio. 1987, B/2, s. 42–48.
- [11] ZELENKA, J. *Piezoelektrické rezonátory a jejich použití*. Praha: ACADEMIA, 1983. 257 s.
- [12] SU, J. *Electroactive polymers for robotic applications: Ferroelectric Polymers for Electromechanical Functionality*. Germany: Springer, 2007.
- [13] SKÁCEL, V., J. FIEDLEROVÁ a K. NEJEZCHLEB. *Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice*. T-CERAM S.R.O. *T-ceram.com* [online]. [cit. 2012-10-15]. Dostupné z: <http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>.
- [14] HENDERSON, I. *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*, APC Int., USA
- [15] ERHART, J. *Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku: PZT keramika Elektro* [online]. 2002, č.11, str. 4-7, [cit. 2012-01-15], Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/e1110204.pdf>

- [16] PŮLPÁN, P. a ERHART, J. *Parametry piezoelektrických bimorfů*. Elektro [online]. 2002, č.3, str. 4-7, [cit. 2013-02-15], Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el030204.pdf>
- [17] PŮLPÁN, P. a ERHART, J. *Parametry piezoelektrických unimorfů*. Elektro [online]. 2005, č.1, str.4-6, [cit. 2012-05-15], Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010504.pdf>
- [18] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku*, Praha, SNTL, 1991
- [19] SODOMKA, L., FIALA, J.: *Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi*
- [20] *Úvod do snímačů zrychlení*. JAKAR ELECTRONICS, spol. s. r.o. Omegaeng.cz [online]. [cit. 2013-01-15]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/accelerometers.html>
- [21] krystaly.cz: Hradec Králové, a.s. *Krystalové jednotky*. [online]. 2010 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://www.krystaly.cz/cs/Produkty/Krystaly/Definice_KJ.
- [22] ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. SNTL Praha, 1983
- [23] KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. ČVUT Praha, 1993
- [24] JĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. ČVUT Praha, 1999
- [25] *Tenkovrstvé piezoelektrické senzory*. FAKULTA CHEMICKO-INŽENÝRSKÁ VŠCHT V PRAZE. [online]. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/14_senzory_QCM.pdf
- [26] PARADISO, J. a N. S. SHENCK. Piezoelectric Energy Scavenging In Shoes. *MIT* [online]. 1999 [cit. 2013-01-15]. Dostupné z: <http://resenv.media.mit.edu/power/Nate/index.html>
- [27] BREPTA, R., L. PŮST a F. TUREK. *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994. 592 s. ISBN 80-901684-8-5.
- [28] SODOMKA, L. *Elektroaktivní eleastomery* [online], [cit. 2013-1-4]. Dostupné z: <http://sodomkalubomir.blog.cz/1104/elektroaktivni-eleastomery>
- [29] EXFO, *Inchworm Motor Technology*, [online], [cit. 2013-2-20]. Dostupné z: <http://documents.exfo.com/appnotes/AnoteBurleigh010-ang.pdf>
- [30] PIEZOMOTOR, *Piezo legs – data and user instructions*, [online], [cit. 2013-1-10]. Dostupné z: http://www.piezomotor.se/uploaded/LEGS_opt_0510.pdf
- [31] HURÁK Zdeněk, HOLUB Ondřej, ŠPILLER Martin. Řízení piezoelektrických motorů pro mikropohování. *Automa*. 2007 číslo 04. ISSN 0036-9942

- [32] *Piezoelektrické akční členy* [online]. Praha [cit. 2013-02-22]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky. Dostupné z: http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/IP_piezo.pdf
- [33] APC INTERNATIONAL, Ltd. *Determining Resonance Frequency*. [online]. [cit. 2013-01-15]. Dostupné z: <http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezothory/determining-resonance-frequency.html>
- [34] MARTÍNEK, R. *Senzory v průmyslové praxi*. Ben 2004
- [35] POTŮČEK Z., SEDLÁK P., *Smart materiály a jejich využití*, České vysoké učení technické v Praze – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Praha 2007
- [36] EKOPYDLENÍ. *Piezoelektrické materiály*. [online]. 2010, [cit. 2013-2-12]. Dostupné z: [http://www.ekopydlení.eu/tag/piezoelektrické materiály](http://www.ekopydlení.eu/tag/piezoelektrické%20materiály)
- [37] KANAYAMA, K., MARUKO, N. *Properties of alternately poled piezoelectric transformers*. Jpn. J. Appl. Phys., 36/1997, p. 3048–3049.
- [38] APEM. Piezoelektrická tlačítka, klávesnice. [online]. Dostupné z: <http://www.apem.com>
- [39] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 1. díl – Piezoelektrické* [online]. 2007 [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>.