

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VYUŽITÍ PIEZO-MATERIÁLU PRO ZÍSKÁVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE Z VIBRACÍ

USING OF PIEZO-MATERIAL FOR ENERGY HARVESTING FROM VIBRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ HANUS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Hanus

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací

v anglickém jazyce:

Using of Piezo-material for Energy Harvesting from Vibration

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech s rozvojem bezdrátových technologií vzešel požadavek na vývoj pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro bezdrátové senzory, který nahradí doposud používané baterie. Jednou z možností je využití některé všudypřítomné formy okolní energie (solární energie, teplotní gradient, proudění tekutin, mechanická energie atd.).

Vibrační generátor je mechatronická soustava, která slouží k výrobě elektrické energie z mechanických vibrací a vytváří nezávislý zdroj elektrické energie pro napájení bezdrátových senzorů.

Cíle diplomové práce:

1. Vyhledejte v dostupných zdrojích informace o výrobě elektrické energie z vibrací a jejím využití.
2. Popište princip a zhodnoťte možnosti využití piezo-materiálů pro výrobu elektrické energie z vibrací.
3. Vytvořte model piezo-generátoru a porovnejte jej s vytvořeným elektromagnetickým vibračním generátorem.
4. Navrhněte a nalad'te parametry piezo-generátoru pro jeho možné použití jako zdroje elektrické energie z vibrací.
5. Navrhněte a analyzujte další možná použití tohoto zařízení jako autonomního zdroje elektrické energie.

Seznam odborné literatury:

Roundy, S. J.: Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, Ph.D Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley CA, 2003.

Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures, Springer, 1999.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 14.11.2008

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace:

Diplomová práce se zabývá získáváním elektrické energie z vibrací okolního prostředí pomocí piezoelektrického vibračního generátoru. K modelování piezokeramiky a návrhu mechanické části generátoru byl využit simulační program ANSYS 10.0. Nejdříve byly numericky vypočteny parametry navrhovaného piezoelektrického generátoru, poté byly tyto hodnoty porovnány se skutečným vzorkem. V práci je také uveden popis materiálových vlastností piezoelektrických materiálů.

Annotation:

Master's Thesis deals with obtaining electricity from the vibrations of the surrounding environment through piezoelectric vibration generator. To simulation piezoceramics and design mechanical parts of the generator was used simulation program ANSYS 10.0. First, parameters of the designed piezoelectric generator were numerically calculated, and then these values were compared with the real sample. Further work is in the description of material properties of piezo materials.

Klíčová slova:

Piezoelektrický jev, piezokeramika, piezoelektrický vibrační generátor, vibrace, získávání elektrické energie.

Keywords:

Piezoelectricity, piezoceramics, piezoelectric vibration generator, vibration, energy harvesting, energy scavenging, power harvesting

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma: Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací, jsem vypracoval samostatně, pod vedením svého vedoucího diplomové práce a s pomocí odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu použité literatury.

.....

Jiří Hanus

Bibliografická citace:

HANUS, J. *Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Hadašovi Ph.D. za cenné připomínky, pomoc, odborné vedení a trpělivost při vypracování diplomové práce. Dále děkuji své rodině za podporu během studia.

1	Úvod.....	9
2	Motivace a úkoly	9
2.1	Tradiční zdroje energie autonomních systémů	10
3	Získávání energie z okolního prostředí.....	10
3.1	Energy harvesting	10
3.2	Využitelné zdroje.....	11
4	Mechanická energie	11
4.1	Kmitání kontinua	12
4.2	Nahodilé pohyby lidského těla	13
4.3	Mechanické kmitání strojů a mechanizace	14
4.3.1	Elektrostatické vibrační generátory	15
4.3.2	Elektromagnetické vibrační generátory	16
4.3.3	Piezoelektrické vibrační generátory.....	17
4.4	Zhodnocení současného stavu v oblasti piezo generátorů	18
4.4.1	Průmyslově vyráběné a používané piezo generátory.....	19
4.4.2	Zhodnocení jednotlivých generátorů	22
5	Piezoelektrický jev.....	23
5.1	Princip piezoelektrického jevu.....	23
5.2	Obrácený piezoelektrický jev	24
5.3	Curieova teplota.....	24
6	Popis piezoelektrického materiálu - piezokeramiky	25
6.1	Piezoelektrická napěťová konstanta	27
6.2	Piezoelektrická nábojová konstanta.....	28
6.3	Permitivita.....	29
6.4	Modul pružnosti.....	29
6.5	Elastická poddajnost	29
6.6	Piezoelektrický Coupling faktor	30
6.7	Činitel jakosti.....	32
6.8	Rezonanční frekvence.....	33
6.9	Módy vibrací.....	34
6.10	Tvrdá a měkká keramika.....	35
6.11	Stárnutí piezokeramiky	36
7	Základní typy piezoelektrických prvků	36
7.1	Unimorfy.....	36
7.2	Polymorfy	37
7.3	Bimorfy.....	37

8	Modelování materiálu	37
8.1	Model materiálu piezokeramiky	37
8.1.1	Model anizotropního materiálu piezokeramiky	39
8.1.2	Piezoelektrická matice	42
8.2	Model materiálu oceli	43
9	Použitý prvek	44
9.1	Prvek použitý pro model piezokeramiky	44
9.2	Prvek použitý pro model oceli	46
10	Návrh piezoelektrického generátoru	47
10.1	Požadavky na piezoelektrický generátor	47
10.2	Základní koncepce	47
10.3	Návrh rezonanční části	48
11	Konečný návrh generátoru	50
11.1	Modální analýza	51
11.2	Měření vlastní frekvence	52
11.3	Impedance piezoelektrického materiálu	54
11.3.1	Numerický výpočet impedance	55
11.3.2	Měření vnitřního odporu:	57
11.4	Napěťová odezva na mechanické buzení	60
11.5	Návrh blokového schéma řízení odběru výkonu	62
12	Zhodnocení dosažených výsledků	62
13	Závěr	63
14	Použitá literatura	64

Seznam symbolů:

b	Šířka materiálu [m]
b_p	Poměrný útlum []
D	Hustota elektrického náboje [Cm^{-2}]
d	Matrice piezoelektrických koeficientů [V/m], [N/C]
d	piezoelektrická nábojová konstanta [C/N], [m/V]
E	Intenzita elektrického pole [V/m], [N/C]
E	Youngův modul pružnosti [Pa] [N/m^2]
F	Síla [N]
f	Frekvence [Hz]
f_a	Antirezonanční frekvence [Hz]
f_r	Rezonanční frekvence [Hz]
G	Elektrická vodivost [S]
g	Piezoelektrická napěťová konstanta [Vm/N]
K^T	Dielektrická konstanta - poměr absolutní a relativní permitivity
k	Coupling faktor []
k_{eff}	Coupling faktor pro libovolný tvar prvku []
l	Délka materiálu [m]
Q	Elektrický náboj [C]
Q_m	Činitel jakosti []
R	Rezistivita [Ω]
S	Mechanické přetvoření []
s	Elastická poddajnost [m^2/N]
$T(\sigma)$	Mechanické napětí [Pa]
T	Tloušťka materiálu [m]
T_c	Curieho teplota [$^{\circ}C$]
u	Elektrické napětí - proměnné v čase [V]
Y	Youngův modul pružnosti
Y	Admittance [S]
Z	Impedance [Ω]
ε	Absolutní permitivita [F/m]
ε_0	Permitivita vakua [F/m]
ε_r	Relativní permitivita [F/m]
ε^T	permitivita udávaná při stálém mechanickém napětí [F/m]
ε^S	permitivita udávaná při stálém mechanickém přetvoření [F/m]
ν	Poissonova konstanta []
ρ	Hustota materiálu [kg/m^3]
λ, μ	Lamého vztahy
ν	Logaritmický dekrement tlumení []
ω	Úhlová rychlost [rad/s]

1 Úvod

Postupný vývoj elektroniky umožňuje konstruování moderních elektronických zařízení, která jsou mnohem menší, odolnější, a vykazují menší spotřebu energie pro svůj provoz. Díky tomu se prosazuje nasazení nových technologií v průmyslu a domácnostech, které vedou ke zjednodušení a levnějšímu řešení problémů, snadné obsluhy a v neposlední řadě také ke zlepšení ekologických dopadů na životní prostředí. S rozvojem bezdrátových technologií přenosu dat, dochází k rozšíření použití bezdrátových senzorických sítí, které přenášejí měřená data rovnou do centrálního počítače ke zpracování. Jedná se jak o přírodovědecké stanice mapující rozlehlé okolí, tak i zajištění bezpečného provozu inženýrských zařízení jako jsou mosty, budovy, letadla, lodě, nebo automobily. Jednotlivé části takovýchto sítí vyžadují zabezpečení napájení, ať už se jedná o snímače, nebo jednotlivé uzly bezdrátové sítě. Vzhledem k tomu, že klasické zdroje elektrické energie jsou budovány jako centralizované, pro dopravu k místu spotřeby je třeba vybudovat elektrickou síť, což může být pro osamělá a vzdálená místa spotřeby velmi nákladné, nebo přímo nemožné.

2 Motivace a úkoly

Tradiční zdroje elektrické energie jsou většinou závislé na fosilních palivech, jako je uhlí a zemní plyn, které se v tepelných elektrárnách přeměňují na elektrickou energii. V dnešní době rostou požadavky na ekologičtější výrobu energie a zároveň chránění neobnovitelných zdrojů pro budoucí generace, stejně tak jako nezávislost na poskytovatelích těchto surovin. Z těchto důvodů roste poptávka po zařízeních s nízkou spotřebou energie, které je možno napájet pomocí obnovitelných zdrojů

Díky rozvoji elektronických zařízení se sníženou spotřebou energie, se stávají stále oblíbenějšími technologie pro získávání elektrické energie v malém měřítku. Tyto technologie jsou často výhodně používány v autonomních systémech, u kterých tak odpadá potřeba zajišťovat neustálý zdroj napájení, ať už pomocí baterií nebo elektrické sítě.

Zadali jsme si tyto dílčí úkoly:

- Naším úkolem je návrh piezoelektrického generátoru, což je z konstrukčního hlediska jeden z hlavních směrů výroby mikrogenerátorů.
- Požadujeme aby piezoelektrický generátor pracoval v oblasti nízkých frekvencí, musíme jej naladit na frekvenci řádově desítky Hz.

- Při návrhu musíme respektovat jistá omezení rozměrů. Pokud má být v budoucnu generátor využit, musí být možnost integrovat jej spolu s elektronikou.

2.1 Tradiční zdroje energie autonomních systémů

Pro napájení autonomních zařízení slouží několik tradičních způsobů napájení:

- baterie
- spalovací mikromotory
- palivové mikročlánky
- radioaktivní zdroje

Tyto druhy zdrojů však mají své nevýhody, pro dlouhodobý provoz je nutné skladovat a doplňovat palivo, měnit baterie. Výrazné ekologické problémy s radioaktivními zdroji stojí nemalé finanční prostředky a své opodstatnění mají jen v omezeném počtu příležitostí.

3 Získávání energie z okolního prostředí

3.1 Energy harvesting

Získávání energie je termín vycházející z angličtiny, kterým souhrnně označujeme přeměnu energie okolního prostředí na elektrickou energii a její skladování. Pojem získávání energie je v angličtině vyjadřován jako:

- Energy harvesting
- Energy scavenging
- Power harvesting

Nejčastěji je pojem získávání energie používán ve spojení s malými autonomními systémy jako jsou snímače, zařízení MEMS, zařízení pro bezdrátový přenos dat, elektromechanické systémy, mobilní telefony, mikropočítače, hodinky, přehrávače. Tyto systémy se vyznačují velmi malou spotřebou energie. Často jsou v provozním stavu jen po jistou dobu, a zbylý čas jsou přepnuta do stand-by stavu. V době vypnutí si zařízení vyrábí potřebnou energii, a poté ji využije při provozu. Díky absenci vnějšího napájení poskytují uživateli vysokou mobilitu a zároveň odpadá nutnost častého servisu při umístění na nedostupných místech. Například použití vysílaček a dalšího elektronického vybavení bez těžkých baterií, oceánské sondy, snímače mostních konstrukcí, vesmírné sondy. V prostředí, ve kterém jsou umístěna nezávislá zařízení se často vyskytuje něko-

lik druhů energie vhodné pro získávání elektrické energie. S výhodou se tedy konstruují i zařízení, která kombinují různé principy získávání elektrické energie a vzájemně se doplňují tak, aby byl zajištěn dostatek energie. Nutno dodat, že tyto technologie zpočátku nejsou levnou záležitostí a je třeba věnovat hodně úsilí pro jejich vývoj, i když je jejich přínos omezen pouze na určité situace.

3.2 Využitelné zdroje

Díky vývoji nových moderních zařízení s omezenou spotřebou energie, kterou potřebují pro svůj provoz, je možné využít i zdroje které jsou pro průmyslové použití nevhodné:

- Větrná energie – větrné mikroturbíny
- Energie elektromagnetického záření – fotovoltaika, v malé míře energie rádiových a televizních vysílačů
- Tepelná energie – teplo lidského těla, teplo dopadajících paprsků Slunce
- Mechanická energie – nahodilé pohyby, vibrace, kmitání kontinua

4 *Mechanická energie*

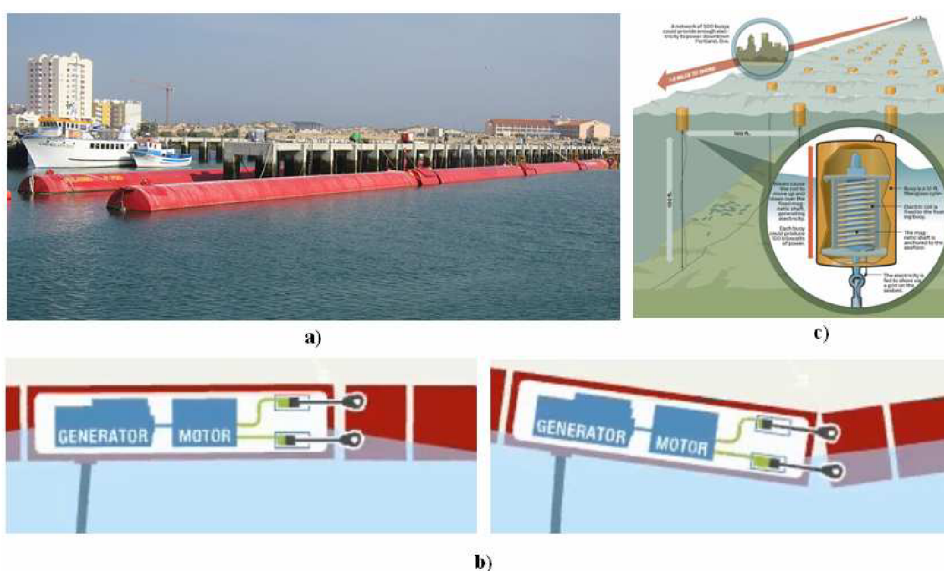
Velké množství autonomních systémů se nachází v prostředí, kde se projevuje mechanické kmitání vyvolané teplem, nebo lidskou činností. Má-li toto kmitání dostatečnou intenzitu, lze jej s výhodou použít pro výrobu elektrické energie.

- kmitání kontinua
- nahodilé pohyby lidského těla
- kmitání strojů

Generátory využívající energii kmitání jsou význačné jednou specifickou vlastností. Nejvyšší výkon dodává generátor tehdy, pokud je vlastní frekvence generátoru naladěna na frekvenci budících vibrací. Vhodné vibrace se však často vyskytují v příliš širokém, nebo nevhodném rozsahu. Je tedy důležité správně vybrat vhodnou budící frekvenci a naladit parametry systému tak, aby vlastní frekvence byla shodná s budící. Dalším projevem je tohoto vztahu je nutnost konstantní frekvence budících vibrací. Bude-li se významně měnit frekvence budících vibrací, nejsme schopni plně využít schopností generátoru. S touto vlastností souvisí projevy nelinearity, kdy při zvýšení amplitudy výchylek dochází k ohýbání skeletové křivky, což je další problém ovlivňující celkové chování generátoru.

4.1 Kmitání kontinua

V přímořských státech využívají komerční elektrárny energii mořských vln, případně přílivu a odlivu. Nejstarší metoda využití vln pracuje na principu plnění sběrné nádrže přicházejícími vlnami. Odtékající voda roztáčí turbínu, která je umístěna v místě odtoku. Dalším principem je využití pontonů spojených posuvnými rameny tak, že při pohybu pontonů po hladině dochází k posunům jednotlivých ramen uvnitř pístů.[27] Pohybová energie se přenáší na písty, které ženou hydraulickou kapalinu na motory, které roztáčí generátory vyrábějící elektrickou energii.



Obr. 1 a) Zařízení firmy Pelamis wave power zakotvené u pobřeží, [27]

b) Znárodnění principu činnosti

c) Návrh polí elektromagnetických bójí vyrábějících energii

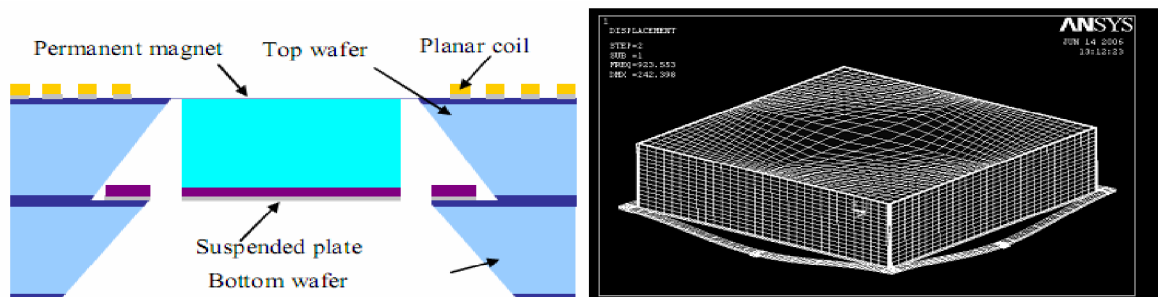
Dalším způsobem je využití bójí, nejčastěji pevně uchycených k mořskému dnu. Bóje je nadnášena vlnami a pohybuje se ve svislém směru. V bóji je pevně uchycená dutá cívka, kterou prochází pevný permanentní magnet spojený s kotvícím lanem. Pohybem bóje se v cívce indukuje elektrický proud. Druhý přístup převádí svislý pohyb bóje na rotační pohyb vhodný pro roztáčení generátoru. Společnosti rozvíjející tato zařízení předpokládají možnosti zásobovat energií i celá města. Pomocí umístění množství bójí do polí podél pobřeží, avšak návrhy provází konstrukční problémy, jako koroze, odvod elektrické energie, kolísání výšky hladiny. Prototypy s malými rozměry přesto dokazují funkčnost napájením měřících a zkušebních zařízení. Tyto přístupy

nejsou vhodné pro napájení malých autonomních zařízení, protože jsou často konstrukčně složitá a rozměrná.

Méně využívanou možností je získávání energie ze zvukových vln. Zvukové vlny vnímané jako zvuk jsou vyvolané změnou tlaku ve vzduchu. Tyto rytmické změny tlaku převádíme pomocí mikrofonů na elektrický proud. Mezi použitelné mikrofony patří:

- Elektrodynamické (cívkové) – Hlavní součástí tvoří membrána spojená s pohyblivou cívku, která se volně pohybuje mezi póly permanentního magnetu. Membrána se pod dopadajícími vlnami rozechvěje a rozpohybuje cívku v magnetickém poli. Pohybem cívky se indukuje elektrický proud.
- Krystalové (piezoelektrické) – Využívají piezoelektrický jev, kdy dopadající zvukové vlny stlačují plátek nebo disk piezoelektrického materiálu, na jehož elektrodách se objevuje náboj vyvolávající elektrické napětí.

Se zmenšováním rozměrů mikrofonů, začaly převažovat jejich záporné vlastnosti, a proto byly vyvinuty specializované mikrogenerátory.[29]

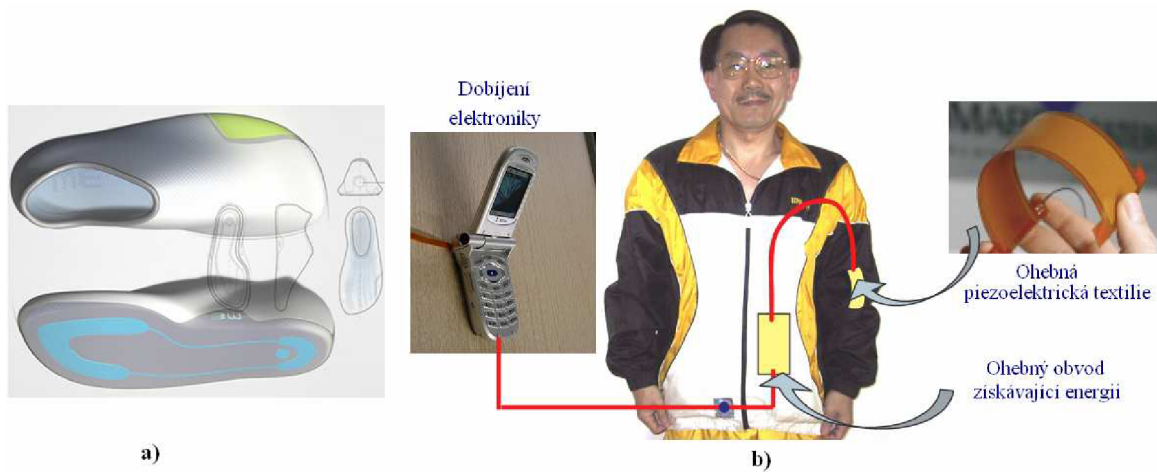


Obr.2 Návrh zvukových mikrogenerátorů

4.2 Nahodilé pohyby lidského těla

Při jakékoliv fyzické činnosti lidí dochází k nahodilým nepravidelným pohybům končetin, nebo trupu těla. Těchto pohybů lze využít pro napájení nejrůznějších zařízení. Nejznámějším případem jsou hodinky SEIKO, které využívají pohybu ruky pro samonatahování hodin. Prozatím nerealizovaným návrhem jsou boty opatřené piezokeramikou. Alberto Villarreal získal v roce 2005 vítězství v designérské soutěži Red Dot Design Award [3] s návrhem bot Brightwalk, které jsou opatřeny piezokeramikou. Další akademické skupiny vyvíjí boty určené pro napájení iPodu v soutěži japonské společnosti NNT. S vývojem nových vylepšených piezo materiálů, se prosazují návrhy pro

umístění prvků vyrobených z těchto materiálů do inteligentních oděvů (IC) [26], kdy by při pohybu uživatele tyto prvky generovaly dostatečné množství energie pro napájení osobních mikropočítačů, mobilních telefonů, přehrávačů a dalších zařízení.



Obr. 3 a) Boty Brightwalk, b) Návrhy využití piezoelektrických prvků [26]

Taneční klub Sustainable Dance Club [10], má v podlaze tanečního parketu ukryty prvky generující elektrickou energii. Pohybem návštěvníků je vyráběna elektrická energie, která je využita napájení barevného pro osvětlení, částečné napájení audiotechniky, případně toalety.



Obr. 12 Fotografie z klubu

4.3 Mechanické kmitání strojů a mechanizace

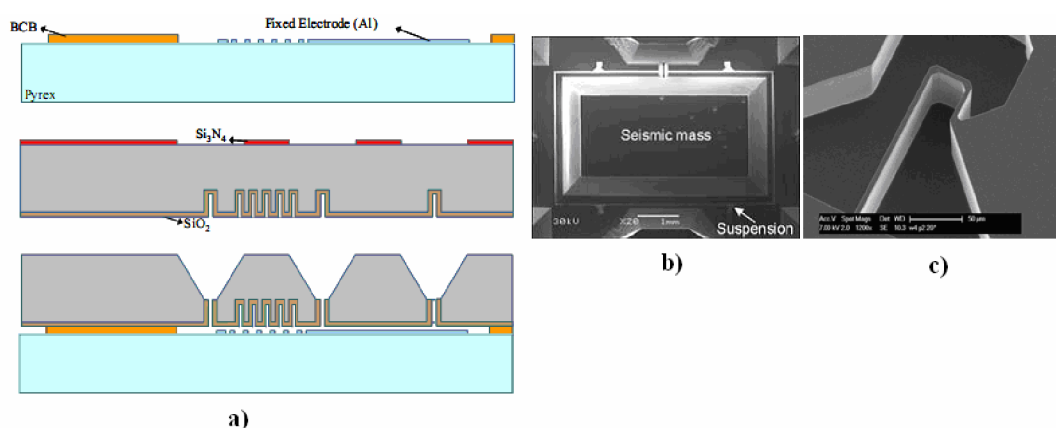
Všechny stroje nebo spotřebiče, obsahující pohyblivé součásti konající pohyb, vyvolávají vibrace. Tyto vibrace jsou často lidskými smysly nepostřehnutelné, avšak velmi nízké frekvence mnohdy velmi špatným způsobem ovlivňují psychiku člověka.

Při návrhu mechanismů musíme dát pozor na vlastní a pracovní frekvence, kdy při jejich shodě dochází ke stavům rezonance, což často vede k destrukci zařízení. Pokud se rozhodneme energii vibrací využít, snažíme se navrhnout vibrační generátory tak, aby jejich rezonanční frekvence odpovídala frekvenci budící. Tím dosahujeme maximálního využití dodané energie. Podle principu přeměny energie rozdělujeme systémy na:

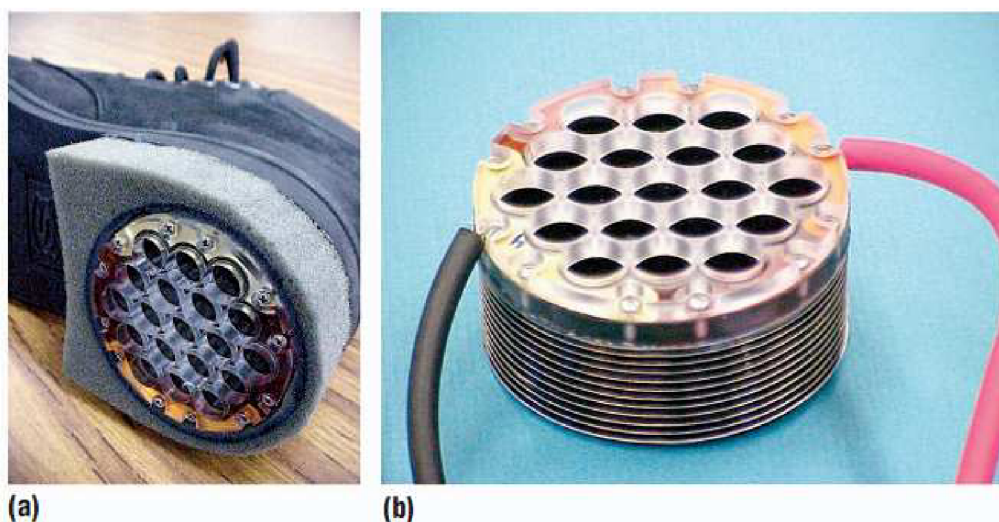
- Elektrostatické
- Elektromagnetické
- Piezoelektrické

4.3.1 Elektrostatické vibrační generátory

Základem tohoto typu generátorů je proměnný kondenzátor s polarizovaným dielektrikem, přičemž proměnnost kondenzátoru je založena na mechanickém přiblížování a vzdalování desek. Jedna deska je pevná, druhá připojená k seismické hmotě. Vibrace rozkmitávají seismickou hmotu a tak dochází k periodickým změnám vzdálenosti desek a tedy kapacity kondenzátoru. Změnou kapacity ovšem měníme i velikost impedance obvodu a vzhledem k trvalé polarizaci dielektrika můžeme při nižší impedanci odebírat větší proud. Čím více je protékající proud zesílen, tím víc jsou zatlumeny vibrace seismické hmoty. Trvalá polarizace dielektrika je zajištěna buďto externím napájením anebo použitím elektretu. Elektrostatické generátory se vyznačují vysokým vnitřním odporem, nízkým výstupním výkonem, vyžadují externí napájení nebo zabudování elektretu. Dále je nutné zabezpečit jištění seismické hmoty proti nadměrným výchylkám. Hlavní výhodou je možnost miniaturizace a široké uplatnění v technologiích MEMS. [6], [24]



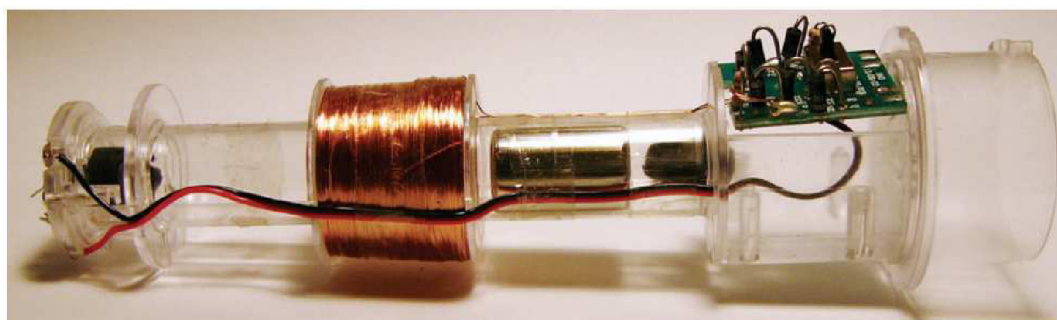
Obr. 4 a) Schéma proměnného kondenzátoru elektrostatického generátoru,
 b) Elektrostatický generátor – připojená seismická hmota
 c) Detail zavěšení seismické hmoty [24]



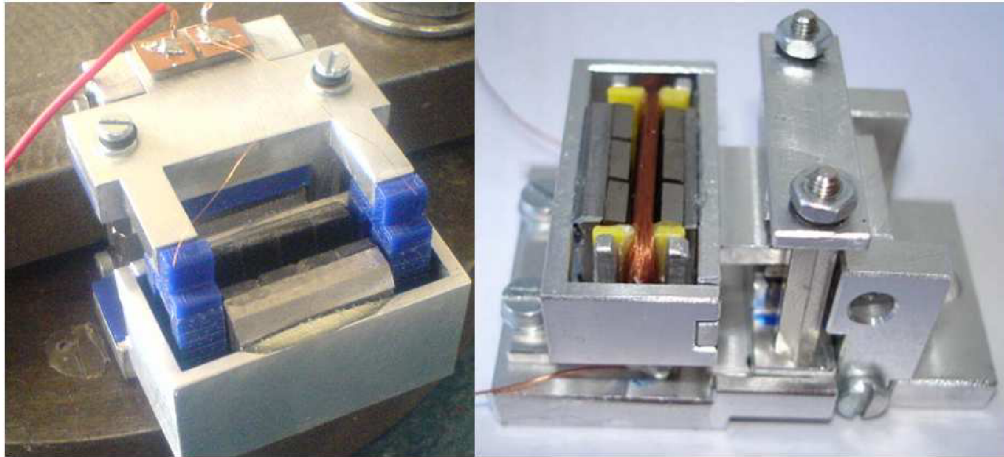
Obr. 5 a) Prototyp elektrostatického generátoru v obuvi
 b) Detail elektrostatického generátoru [6]

4.3.2 Elektromagnetické vibrační generátory

Využívají principu elektromagnetické indukce, kdy se energie zdroje v podobě vibrací mění na elektrickou energii pomocí magnetů a cívek. Konstrukce generátorů je založena na dvou přístupech, kdy při prvním je upevněn magnet a cívka se pohybuje, a nebo druhý, kdy je cívka pevná a magnet pohyblivý. Druhý případ je výhodnější, neboť odpadá problém pohyblivých vodičů. Tyto generátory jsou vhodné pro nízké frekvence, kdy obecně dodávají nízké napětí a větší proudy vhodné po napájení elektroniky v porovnání s generátory pracujícími na jiných principech. [7] [33]



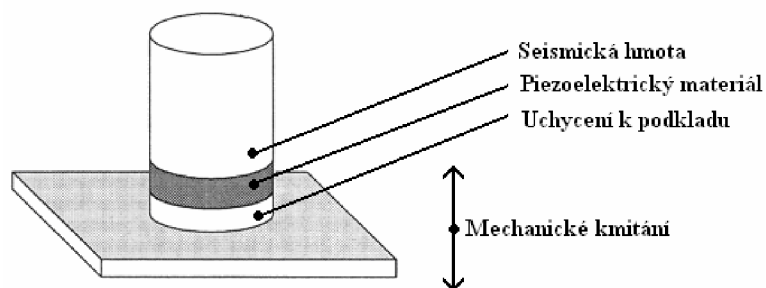
Obr. 6 Elektromagnetický generátor LED svítilny [6]



Obr.7 Elektromagnetické generátory pro napájení bezdrátových zařízení [7]

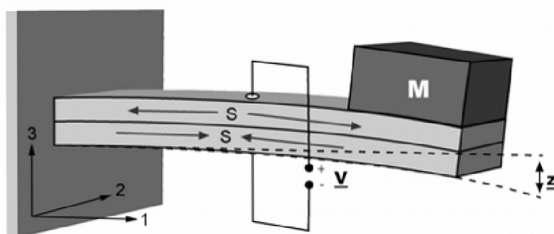
4.3.3 Piezoelektrické vibrační generátory

Piezoelektrické generátory pracují na základě piezoelektrického jevu, kdy piezomateriál při mechanickém namáhání generuje elektrický náboj. Toho se využívá k výrobě elektrické energie z mechanického kmitání. Konstrukce piezoelektrických generátorů vychází ze tří hlavních přístupů. První přístup je nejčastěji používán při konstrukci akcelerometrů. Při působení vibrací dochází vlivem setrvačnosti seismické hmoty ke stlačování a roztahování materiálu, jak je naznačeno na obrázku 8. Druhým způsobem je využití torzních kmitů válečků piezokeramiky [7], [33]



Obr. 8 Princip funkce piezoelektrického generátoru

Třetí přístup využívá ohýbání vetknutého nosníku, na kterém je umístěn krystal piezokeramiky. Vlivem ohybu nosníku dochází k tahovému napětí nad střednicí a tlakovému napětí pod střednicí. Krystal je tedy periodicky natahován a stlačován, čímž je vyvoláván elektrický náboj na elektrodách piezokeramiky. Tento přístup jsme zvolili i my při návrhu našeho vibračního generátoru.



Obr. 9 Princip funkce piezoelektrického generátoru jako vetknutého nosníku [7]

4.4 Zhodnocení současného stavu v oblasti piezo generátorů

Většina velkých univerzit se zajímá o vývoj piezoelektrických generátorů, případně o vývoj nových piezoelektrických materiálů. Zde uvádíme

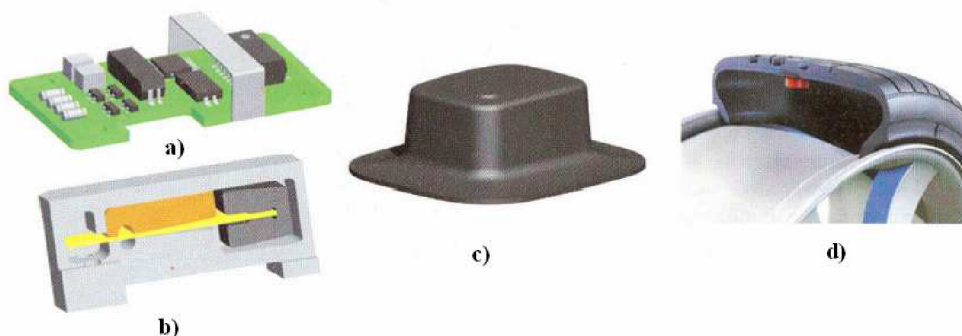
- University of California –Berkeley, USA, <http://berkeley.edu/>
- Massachusetts Institute of Technology, USA, <http://web.mit.edu>
- Georgia Tech, Atlanta, USA, <http://www.gatech.edu/>
- Clarkson University, Potsdam - New York, USA, <http://www.clarkson.edu/>
- The Penn State University, USA, <http://www.psu.edu/>
- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Německá republika, <http://www.uni-freiburg.de/>
- University of Darmstadt, Německá republika, <http://www.tu-darmstadt.de/>
- National University of Singapore, Singapur, <http://www.nus.edu.sg/>
- University of Missouri-Columbia, USA, <http://www.missouri.edu/>
- Aachen University, Německá republika, <http://www.rwth-aachen.de/go/id/bdz/>
- The University of Texas, USA, <http://www.utexas.edu/>
- Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Švýcarsko, <http://www.epfl.ch/index.fr.html>
- University of Nebraska-Lincoln, USA, <http://www.unl.edu/>
- University of Newcastle, Austrálie, <http://www.newcastle.edu.au/>
- National Taiwan University of Taiwan, Taiwan, <http://www.ntu.edu.tw/engv4/>
- Technická univerzita v Liberci, ČR, <http://www.vslib.cz/>

Mezi další velké společnosti (i státní) vyvíjející a vyrábějící piezoelektrické generátory patří:

- AdaptivEnergy , Hampton, Virginia, USA, <http://www.adaptivenergy.com/>
- DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency, USA, <http://www.darpa.mil/>
- PiezoSystems, Inc., Tower Office Park Woburn, Massachusetts, USA, <http://www.piezo.com/>
- Noliac A/S Hejreskovvej, Kvistgaard, Dánsko - Noliac má své pobočky: Noliac Systems (NS) a Noliac Ceramics (NC) v ČR, <http://www.noliac.com>

4.4.1 Průmyslově vyráběné a používané piezo generátory

Všechna nová vozidla v USA, s hmotností větší než 4,5 tuny, musí mít od září roku 2007 systém, který měří tlak v pneumatikách. Společnost Continental proto vyvíjí takzvaný Intelligent Tyre System (ITS) [8], který využívá piezoelektrický generátor pracující jako zdroj elektrické energie pro snímač tlaku v pneumatikách. Naměřená data se přenáší do centrálního počítače, který pak zajišťuje optimální huštění pneumatik. Předpokládá se budoucí nasazení této technologie do všech automobilů, protože správně nahuštěné pneumatiky činí vozidlo bezpečnější, ekologičtější, ale hlavně úspornější.



Obr. 10 Piezoelektrický generátor jako zdroj pro snímače tlaku systému ITS. [8]

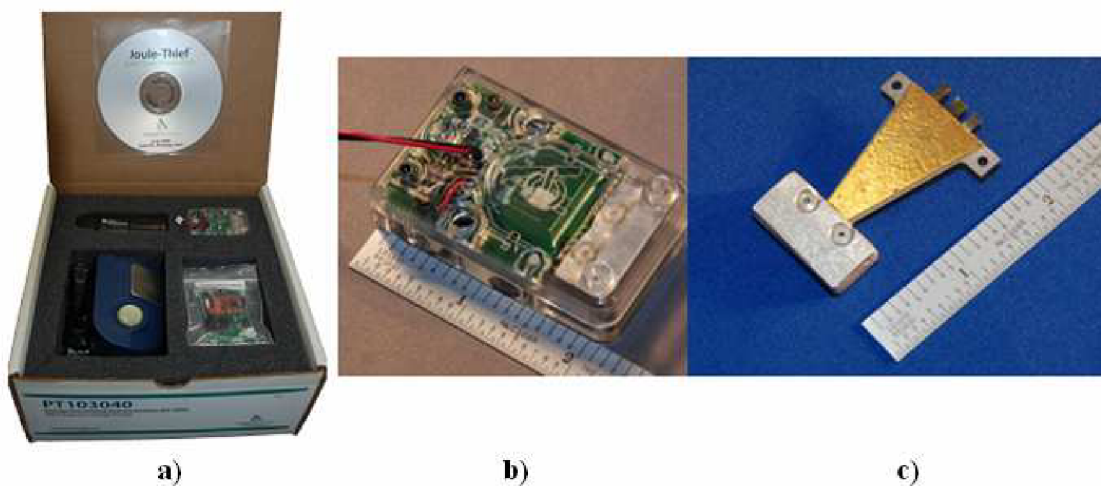
East Japan Railway Company (JR-East), společnost provozující železniční stanice, hledala způsob jak zajistit ekologičtější provoz. Proto ve spolupráci s univerzitou Keio [9] nainstalovali v roce 2006 do podlahy u vstupních turniketů piezoměničce z reproduktorů. Procházející cestující tak vyráběli elektrickou energii. V roce 2008 byl projekt rozšířen, a předpokládá se, že v budoucnu budou cestující vyrábět dostatek

energie pro provoz automatických turniketů a informačních panelů. Mimo jiné je množství vyrobené energie využíváno ke zjišťování počtu cestujících.



Obr. 11 Vstupní brány se zabudovanými piezoměniči.

Joule Thief je komerčně vyráběný piezo generátor používaný k výrobě elektrické energie vyvinutý společností AdaptivEnergy. Joule Thief byl primárně vyvinut k napájení bezdrátových senzorů, případně částí bezdrátových sítí, avšak postupem doby se možnosti použití rozšiřují.



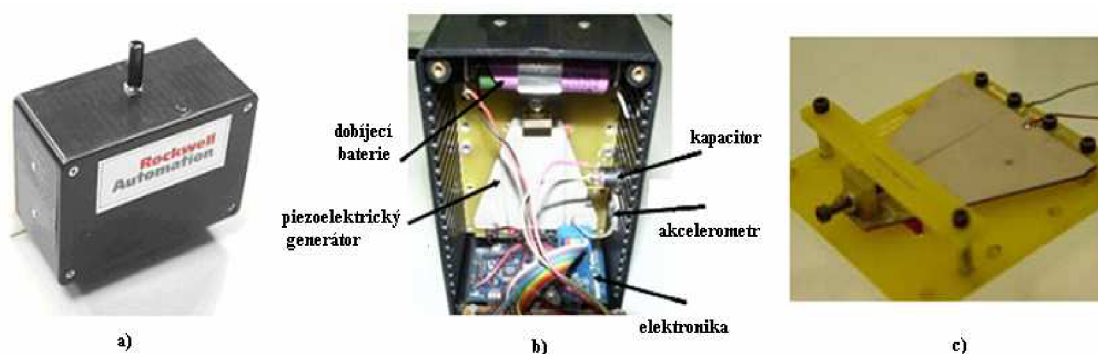
Obr. 13 a) Demo kit systému Joule Thief

b) Elektronika systému Joule Thief

c) Rezonanční část s piezokeramikou

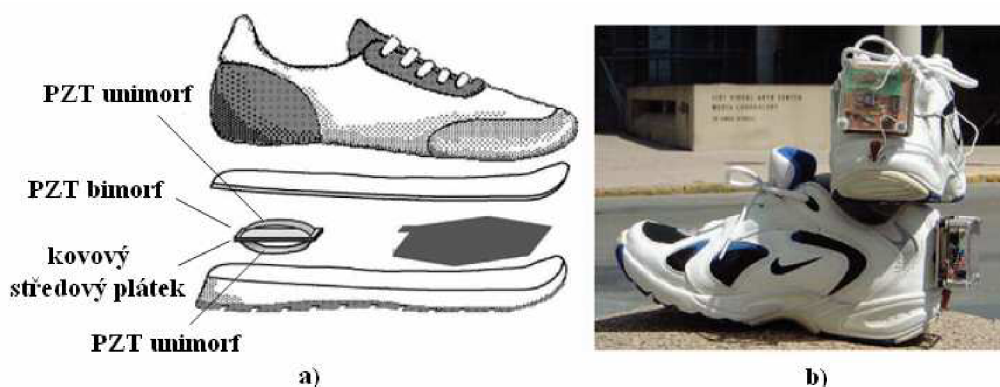
Další uplatnění napájení bezdrátových snímačů se testuje na lodích. Příkladem může být testování na tankeru Loch Rannoch [11], [12], [33]. Bezdrátové snímače byly

umístěny po celé délce trupu lodi, ve strojovně a v jiných důležitých prostorách, kde snímaly měřené parametry, které předávaly na můstek.



Obr. 14 a) Celkové provedení bezdrátového loďního snímače
 b) Vnitřní provedení
 c) Rezonanční část

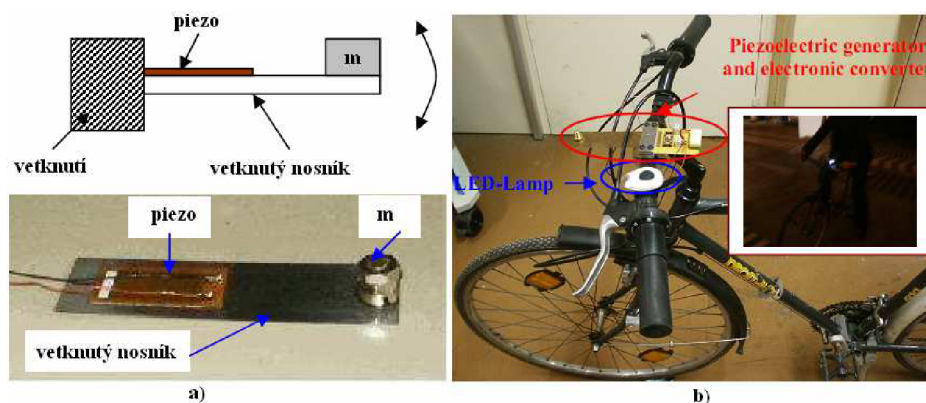
Pro napájení mobilních telefonů a přehrávačů vyvíjejí výzkumné týmy na MIT¹ sportovní boty s piezokeramikou v podrážce. Pohybem majitele je vyráběna elektrická energie, která je po zpracování elektronikou bezdrátově předáván napájenému zařízení. Tento typ bot je určen k napájení iPodu pro soutěž společnosti NNT. [6] [33]



Obr. 15 a) Konstrukce bot, b) Praktický model

Jiný způsob využití piezoelektrického generátoru je umístění na bicyklu, kdy při jízdě vyrábí elektrickou energii, kterou jsou napájeny LED svítilny. Kolo jedoucí po nerovnostech na silnici produkuje vibrace přenášené rámem, na kterém byl v nejnvýhodnější pozici připevněn generátor. [25]

¹ <http://web.mit.edu>



Obr. 16 a) Schéma a praktické zhotovení b) Použití na bicyklu

4.4.2 Zhodnocení jednotlivých generátorů

Pro naše účely budeme hodnotit zejména elektromagnetický a piezoelektrický generátor. Oba dva přístupy využívají kmitání okolního prostředí, avšak liší se ve frekvenční oblasti použití. Elektromagnetický generátor je vhodnější pro nízké frekvence vibrací. Z principu činnosti je nutné už v začátcích návrhu uvažovat, že napětí je závislé na rychlosti změny magnetického toku. Při rostoucích frekvencích vibrací, roste také indukované napětí. Vhodnou volbou parametrů je tedy možné nastavit generátor tak, aby dodával požadované napětí. Piezokeramický materiál má při nízkých frekvencích velmi vysoký vnitřní odpor, a i při vysokém generovaném napětí je schopen dodávat pouze malý výkon. Z tohoto důvodu je často vhodnější použít piezoelektrický generátor v pásmu vyšších frekvencí.

Tabulka 1 Srovnání vlastností

Princip činnosti	Vlastnosti
Elektrostatický	<ul style="list-style-type: none"> + Použití v MEMS technologiích - Nízký dodávaný výkon - Nutnost polarizace dielektrika vnějším zdrojem - Nutné mechanické omezení výchylek při kmitání
Elektromagnetický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodné použití při nízkých frekvencích v rozsahu desítek Hz + Poměrně velký dodávaný výkon - Někdy až příliš malé výstupní napětí
Piezoelektrický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodné použití pro frekvence stovek Hz až desítek kHz ± Vysoké generované napětí - Vysoký vnitřní odpor při nízkých frekvencích

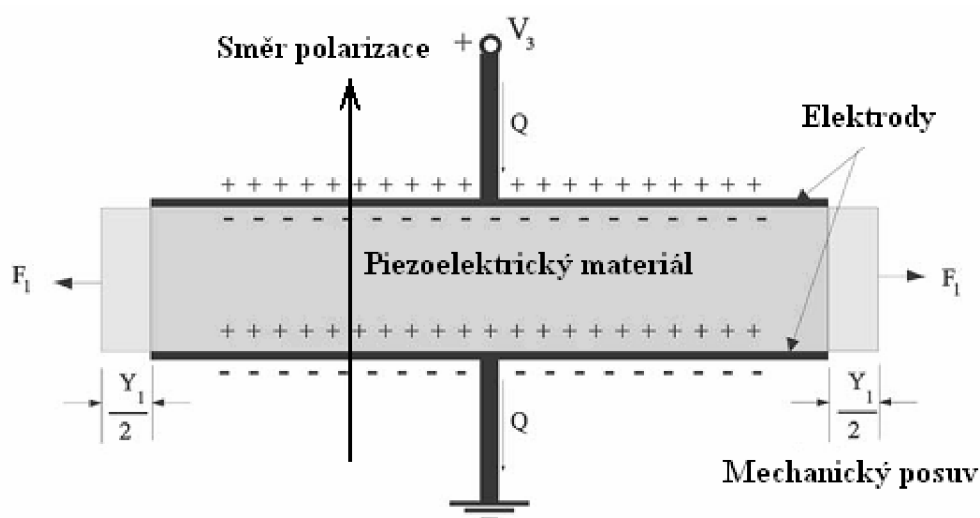
5 Piezoelektrický jev

Přímý piezoelektrický jev objevili bratři Jaques a Pierr Curieové v roce 1880, při stlačování krystalu turmalínu a později křemene. Pozorovali vznik elektrického náboje na deskách v důsledku mechanického namáhání. Generovaný elektrický náboj je přímo úměrný působící síle a tento poměr je uváděn jako piezoelektrická nábojová konstanta. [2],[14],[15],[16][17]

Materiály, které se vyznačují piezoelektrickými vlastnostmi, mají vnitřní strukturu prostorově orientovanou tak, aby jeden směr byl výraznější než ostatní. Působíme-li mechanickým namáháním nebo elektrickým polem na takovýto materiál, projeví se tato nesymetrie vznikem piezoelektrických jevů. Tyto jevy dále využíváme v mnoha různých aplikacích.

5.1 Princip piezoelektrického jevu

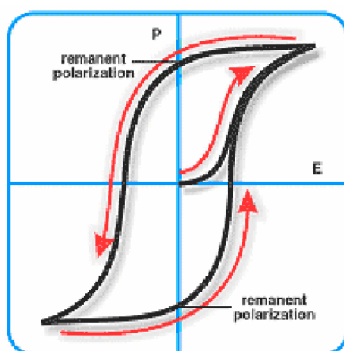
Piezomateriál obsahuje ionty různých prvků a molekul, které jsou uspořádány v krystalové mřížce pravidelně tak, aby si kladné i záporné ionty prostorově odpovídaly a materiál je tak elektricky neutrální. Při mechanickém stlačování krystalu dochází k deformaci krystalu. Vzhledem k ose nesymetrie se ionty se vychýlí ze svých pozic. Kladné ionty jedním a záporné opačným směrem. Jednotlivé krystaly se začínají chovat jako elektrické dipóly, a na elektrodách materiálu se objeví elektrický náboj opačné polarity. Působíme-li na materiál tahovou silou, ionty v krystalech se opět vychýlí, ale tentokrát na druhou stranu, a generovaný náboj se objeví s opačným znaménkem oproti prvnímu případu.



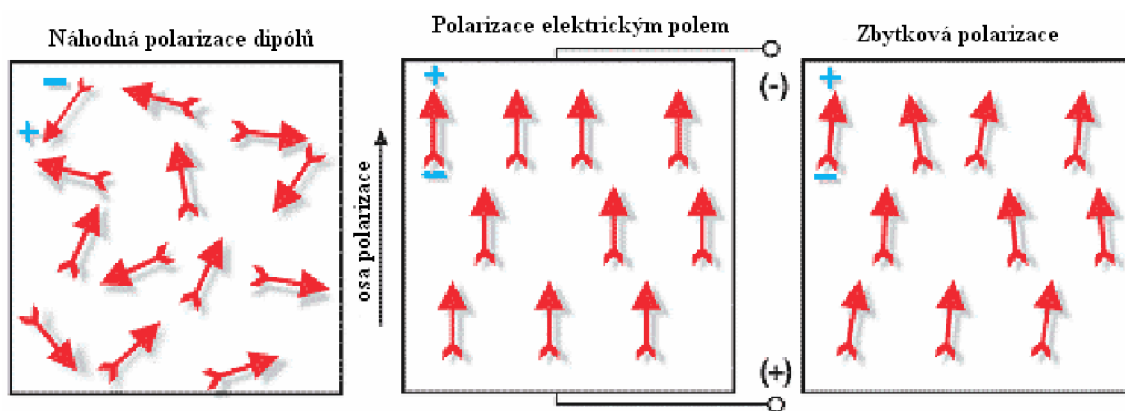
Obr. 17 Princip piezoelektrického jevu [19]

5.2 Obrácený piezoelektrický jev

Při působení elektrického napětí na piezokrystal dochází k uspořádávání volně orientovaných iontů ve směru působícího elektrického pole a jejich vzájemnému posunu. Tím dojde k prostorové deformaci krystalu. Tento jev se také nazývá elektrostrikce [2]. Mechanická deformace krystalu je u obráceného piezoelektrického jevu větší než u přímého jevu. Po odpojení napájecího napětí se jednotlivé dipóly nevrátí do původní polohy, ale zůstávají do značné míry polarizovány v původním směru, a materiál vykazuje zbytkovou polarizaci.



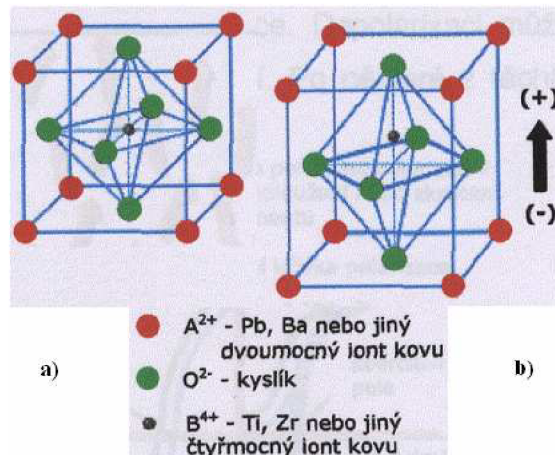
Obr. 18 Hysterezní křivka [3]



Obr. 19 Polarizace piezoelektrického materiálu [3]

5.3 Curieova teplota

Při vystavení piezokrystalu zvyšující se teplotě dosáhneme Curieovy teploty, kdy materiál ztrácí veškeré piezoelektrické vlastnosti. V materiálu dojde k fázovému přechodu, přičemž se nesymetrická struktura krystalů na změni na symetrickou, jednotlivé krystaly získají kubickou strukturu. Moderní piezokeramické materiály jsou už z výroby navrhovány tak, aby Curieho teplota byla co nejvyšší.



Obr.20 Vliv teploty na krystalovou mříž [17]

6 Popis piezoelektrického materiálu - piezokeramiky

Piezoelektrické keramiky používané v průmyslu se nejčastěji vyrábějí jako směs tuhých roztoků PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT). Poměr jednotlivých složek se pohybuje okolo 48% PZ a 52 % PT, odtud také plyne označení PZT.[4], [17]

Uměle vyrobené keramiky jsou při ukončení výroby složeny z velkého množství zrn, které jsou náhodně orientovány, a proto musí být polarizovány silným elektrickým polem. Polarizace materiálu určuje směr, který je nejvhodnější pro použití. Velké množství polarizovaných zrn způsobuje, že piezokeramika má anisotropní vlastnosti, proto je nutno popsat materiálové charakteristiky pomocí konstant, které vyjadřují vlastnosti keramiky v různých směrech.

Dále jsou vyvíjeny další typy piezoelektrických materiálů, jako jsou bezolovnaté piezokeramiky, materiály odolné vůči vysokým teplotám, nebo flexibilní materiály založené na bázi polymerů.

Piezoelektrický jev popisují následující rovnice, které uvádíme ve tvaru užívaném v zahraniční literatuře: [16]

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

Hookův zákon:
$$S = s \cdot T \quad (2)$$

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d^t] \{E\} \quad (3)$$

$$\{D\} = [d] \{T\} + (\varepsilon^T) \{E\} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{21}^E & S_{22}^E & S_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{31}^E & S_{32}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{12}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12}^E = 2(S_{11}^E - S_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

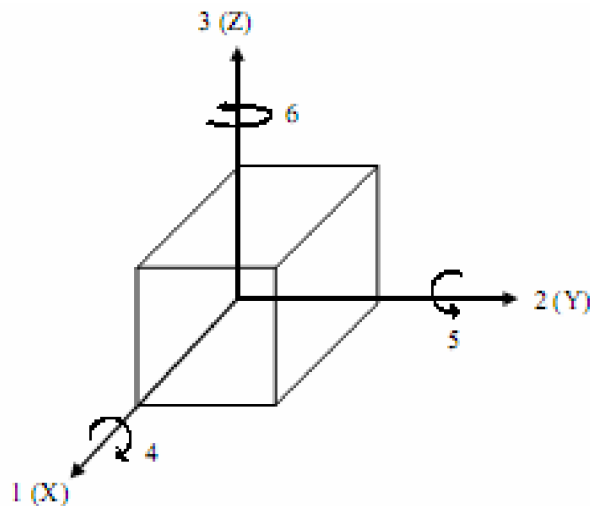
$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

kde:

D	hustota elektrického náboje
E	intenzita elektrického pole
ϵ	permitivita
s	elastická poddajnost
S	mechanické přetvoření
T	mechanické napětí
d	matice piezoelektrických koeficientů

Vzhledem k nesymetričnosti krystalů je nutno respektovat osy souřadných systémů, proto bylo stanoveno několik norem popisujících vzájemné vztahy a chování piezoelektrických prvků:

- ANSI-IEEE 176 (1987) Standard on Piezoelectricity IEEE 177 (1976) Standard Definitions & Methods of Measurement for Piezoelectric vibrators
- IEC 444 (1973) Basic method for the measurement of resonance freq & equiv series resistance of quartz crystal units by zero-phase technique in a pi-network
- IEC 302 (1969) Standard Definitions & Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators Operating over the Freq Range up to 30MHz



Obr. 21 Orientace piezokrystalu vůči osám – norma IEEE/ANSI 176 (1987)

6.1 Piezoelektrická napěťová konstanta

Piezoelektrická napěťová konstanta g (*piezoelectric voltage coefficient*) popisuje velikost elektrického pole vygenerovaného materiálem, na který působí jednotková velikost mechanického napětí, a nebo naopak velikost mechanického přetvoření vyvolaná působením vnějšího elektrického pole. Tato hodnota je důležitá zejména pro materiály, které jsou používány na výrobu snímačů. První index popisuje osu generovaného nebo přiloženého elektrického pole. Druhý index popisuje osu mechanického napětí nebo přetvoření.[13],[14],[15]

- g_{33} – vyvolané elektrické napětí je orientované ve směru 3 působením mechanického napětí které působí taktéž ve směru 3. Nebo přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 3.
- g_{31} – vyvolané elektrické napětí je orientované ve směru 3 působením mechanického napětí které působí ve směru 1. Nebo přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.
- g_{15} – vyvolané elektrické napětí je orientované ve směru 1 působením mechanického smykového napětí které působí v ose 2. Nebo přetvoření okolo osy 2 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

$$g = \frac{\text{Mechanické přetvoření}}{\text{Intenzita elektrické pole}} = \frac{\text{Intenzita elektrické pole}}{\text{Mechanické napětí}}$$

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad [\text{Vm} / \text{N}] \quad (7)$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T} \quad (8)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T} \quad (9)$$

$$g_{15} = \frac{d_{15}}{\epsilon_{11}^T} \quad (10)$$

kde:

d_{xx} je příslušná nábojová konstanta

ϵ^T je příslušná permitivita materiálu při konstantním zatížení

6.2 Piezoelektrická nábojová konstanta

Piezoelektrická nábojová konstanta d (*piezoelectric charge coefficient*) udává hodnotu generovaného náboje na jednotku mechanického napětí, kterým působíme na materiál. V opačném případě udává hodnotu mechanického přetvoření při působení elektrického náboje. Tato hodnota je důležitá zejména u materiálů, které jsou použity na výrobu aktuátorů. První index popisuje směr polarizace generovaného nebo přiloženého elektrického náboje. Druhý index popisuje osu mechanického napětí nebo přetvoření. [1],[13],[14],[15]

- d_{33} – generovaný elektrický náboj je orientován ve směru 3 působením mechanického napětí které působí taktéž ve směru 3. V opačném případě udává velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 3.
- g_{31} – generovaný elektrický náboj je orientován ve směru 3 působením mechanického napětí které působí ve směru 1. V opačném případě udává velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.
- g_{15} – generovaný elektrický náboj je orientován ve směru 1 působením mechanického smykového napětí které působí v ose 2. V opačném případě udává velikost přetvoření okolo osy 2 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

$$d = \frac{\text{Mechanické přetvoření}}{\text{Intenzita elektrické pole}} = \frac{\text{Plošná hustota náboje}}{\text{Mechanické napětí}}$$

$$d = k\sqrt{\epsilon^T \cdot s^E} \quad [C/N] \text{ případně } [m/V] \quad (11)$$

$$d_{31} = k_{31}\sqrt{\epsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E} \quad (12)$$

$$d_{33} = k_{33}\sqrt{\epsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E} \quad (13)$$

$$d_{15} = k_{15}\sqrt{\epsilon_{11}^T \cdot s_{55}^E} \quad (14)$$

Kde:

d_{xx} příslušná nábojová konstanta

k_{xx} hodnota Coupling faktoru

ϵ^T permitivita materiálu při konstantním zatížení

s^E hodnota elastické poddajnosti při konstantním elektrickém poli

6.3 Permittivita

Permittivita ϵ , nebo také dielektrická konstanta určuje změnu dielektrika při působení elektrického pole. Absolutní hodnota permittivity označovaná jako ϵ je určena jako součin permittivity vakua $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ [Fm⁻¹] a relativní permittivity materiálu ϵ_r . [1], [13],[14],[15]

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (15)$$

Při popisu hodnot permittivity piezoelektrického materiálu se však uvádí hodnota permittivity ϵ^T určené v případě, že je materiál vystaven stálému mechanickému napětí. V případě, kdy je materiál vystaven konstantnímu přetvoření je udávána hodnota ϵ^S .

- ϵ_{11}^T je permittivita udávaná při stálém mechanickém napětí v ose 1
- ϵ_{33}^S je permittivita udávaná při stálém mechanickém přetvoření v ose 3

Velmi často výrobci keramiky popisují materiál pomocí dielektrické konstanty K^T , která je uváděna jako poměr relativní a absolutní permittivity:

$$K^T = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \quad (16)$$

6.4 Modul pružnosti

Youngův modul pružnosti E (v zahraniční literatuře Y) popisuje pružnost (tuhost) materiálu jako poměr působícího mechanického napětí σ ku vzniklému přetvoření ϵ . Piezoelektrický materiál při mechanickém zatížení generuje elektrické pole, které zpětně působí na materiál. Tímto působením brání přetvoření materiálu vzhledem k namáhání materiálu, proto se užívá pro popis materiálových vlastností hodnota udávaná jako elastická poddajnost.

6.5 Elastická poddajnost

Často také uváděna jako anglický výraz *Elastic Compliances* s udává převrácenou hodnotu modulu pružnosti ve směrech s_{11} a s_{33} . Konstanta s^E udává hodnotu poddajnosti

při konstantním elektrickém poli a konstanta s^D udává hodnotu při konstantní hustotě náboje. [1],[13],[14],[15]

- s_{11}^E udává hodnotu poddajnosti pro napětí ve směru 1 a odpovídající přetvoření ve směru 1 při konstantním elektrickém poli
- s_{33}^D udává hodnotu poddajnosti pro napětí ve směru 3 a odpovídající přetvoření ve směru 3 při konstantní hustotě náboje

$$s = \frac{1}{E} = \frac{\text{Přetvoření}}{\text{Napětí}} \quad [\text{m}^2/\text{N}] \quad (17)$$

$$s_{33}^D = \frac{1}{4\rho f_a^2 l^2} \quad (18)$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (19)$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho f_r^2 l^2} \quad (20)$$

$$s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad (21)$$

$$s_{55}^D = \frac{1}{4\rho f_a^2 T^2} \quad (22)$$

$$s_{55}^E = \frac{s_{55}^D}{1 - k_{15}^2} \quad (23)$$

kde:

E	modul pružnosti
ρ	hustota materiálu
f_a	antirezonanční frekvence
f_r	rezonanční frekvence
k_{xx}	Coupling faktor
l	délka obdélníkové desky piezokeramiky
T	tloušťka desky piezokeramiky

6.6 Piezoelektrický Coupling faktor

Nebo také elektromechanický coupling faktor (*Piezoelectric coupling factor*, *Electromechanic coupling factor*) udává hodnotu efektivity, s jakou přeměňuje piezoelektrický materiál elektrickou energii na mechanickou, nebo naopak mechanickou energii na elektrickou. V rozsahu nízkých frekvencí je běžná piezokeramika schopná dosáhnout přeměny 30 až 75% vstupní energie. Někteří výrobci piezokeramiky však často uvádějí hodnoty odpovídající teoretickým maximálním hodnotám pro daný materiál. Spe-

ciálně navržené vzorky keramiky jsou schopny při vybuzení dosáhnout účinnosti až 90%, ale hodnota coupling faktoru poté neodpovídá hodnotě dielektrických ztrát.

Hodnotu coupling faktoru udávané pro nízké frekvence určují rozměry a tvar piezokeramiky. Pro tenké kruhové keramiky se uvádí hodnoty k_p (*planar*) a k_t (*thickness*). Pro obdélníkové plátky keramiky se udávají hodnoty k_{33} a k_{31} . [1],[13],[14],[15]. Dále se v literatuře uvádí charakteristiky pro tvarově odlišné prvky:

Vztahy pro tenký disk, jehož průměr je výraznější než tloušťka:

- Konstanta k_p vyjadřuje účinnost přeměny energie při orientaci směru elektrického pole v ose 3, ve které je keramika polarizována, a radiálními směry 1 a 2, ve kterých působí mechanické vibrace.
- Konstanta k_t vyjadřuje účinnost při polarizaci elektrického pole ve směru 3 a mechanickými vibracemi ve směru 3.

Vztahy pro tenké obdélníkové plátky, jejichž délka je 10x větší než šířka:

- Konstanta k_{33} vyjadřuje účinnost přeměny energie při orientaci směru elektrického pole v ose 3, ve které je keramika polarizována, a orientaci ve směru 3 ve kterém působí mechanické vibrace.
- Konstanta k_{31} vyjadřuje účinnost přeměny energie při polarizaci elektrického pole ve směru 3 a mechanickými vibracemi ve směru 1.

Pro tenké disky platí, že hodnota k_t je obecně menší než hodnota k_{33} . Je to způsobeno tím, že rezonanční frekvence kmitání ve směru tloušťky disku je větší než rezonanční frekvence podélného kmitání.

$$k = \sqrt{\frac{\text{Získaná mechanická energie}}{\text{Vstupní elektrická energie}}} = \sqrt{\frac{\text{Získaná elektrická energie}}{\text{Vstupní mechanická energie}}}$$

Pro nízké frekvence platí tyto vzorce:

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T} \quad (24)$$

$$k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{(s_{11}^E + s_{12}^E) \epsilon_{33}^T} \quad (25)$$

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \epsilon_{33}^T} \quad (26)$$

Vzorce používané pro vysoké frekvence:

$$k_{31} = \sqrt{\frac{\pi \cdot f_a}{2 \cdot f_r} \cdot \frac{1}{\frac{\pi \cdot f_a}{2 \cdot f_r} - \tan\left(\frac{f_a}{f_r}\right)}} \quad (27)$$

(28)

$$k_p \cong \sqrt{2,51 \cdot \frac{f_a - f_r}{f_a} - \left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right)^2} \quad (29)$$

$$k_t = \sqrt{\frac{\pi \cdot f_r}{2 \cdot f_a} \cdot \cot\left(\frac{\pi \cdot f_r}{2 \cdot f_a}\right)} \quad (30)$$

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_r^2}} \quad (31)$$

kde:

- d piezoelektrická nábojová konstanta
- f_a antirezonanční frekvence
- f_r rezonanční frekvence
- s elastická poddajnost
- ε^T permitivita udávaná při stálém mechanickém napětí

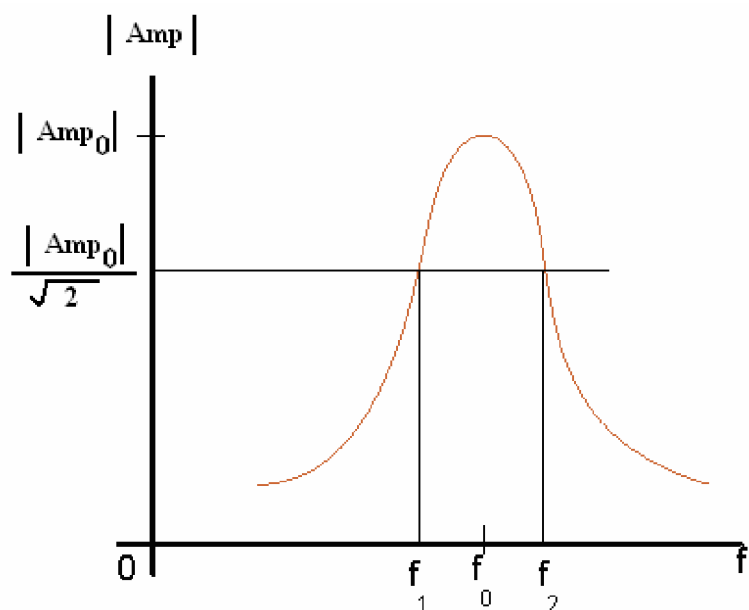
Hodnoty k_{33} a k_{15} mohou být spočítány obdobně pokud použijeme příslušné frekvence, další parametr k_{eff} se často používá k popisu efektivity keramiky libovolného tvaru.

6.7 Činitel jakosti

Činitel jakosti Q_m (*Mechanical quality factor*) je poměr mezi reaktancí a rezistivitou v náhradním sériovém zapojení při popisu piezokeramiky pomocí elektrických obvodů. Pomocí činitele jakosti tak můžeme popsat šířku rezonančního pásma a závislé charakteristiky. [1],[13],[14],[15]

$$Q_m = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{f_r}{BW} \quad (32)$$

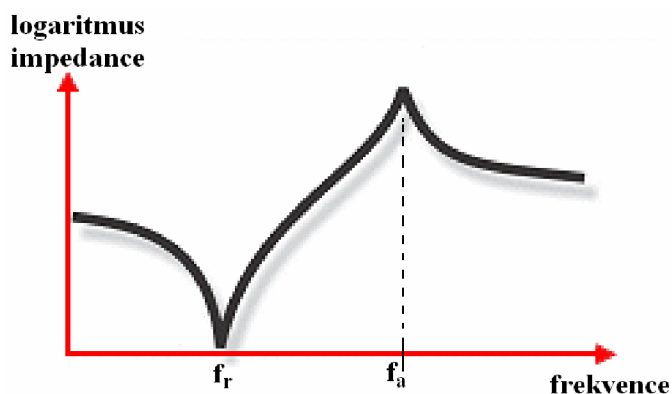
$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_m C^T (f_a^2 - f_r^2)} \quad (33)$$



Obr. 22 Amplitudově-frekvenční charakteristika – stav rezonance

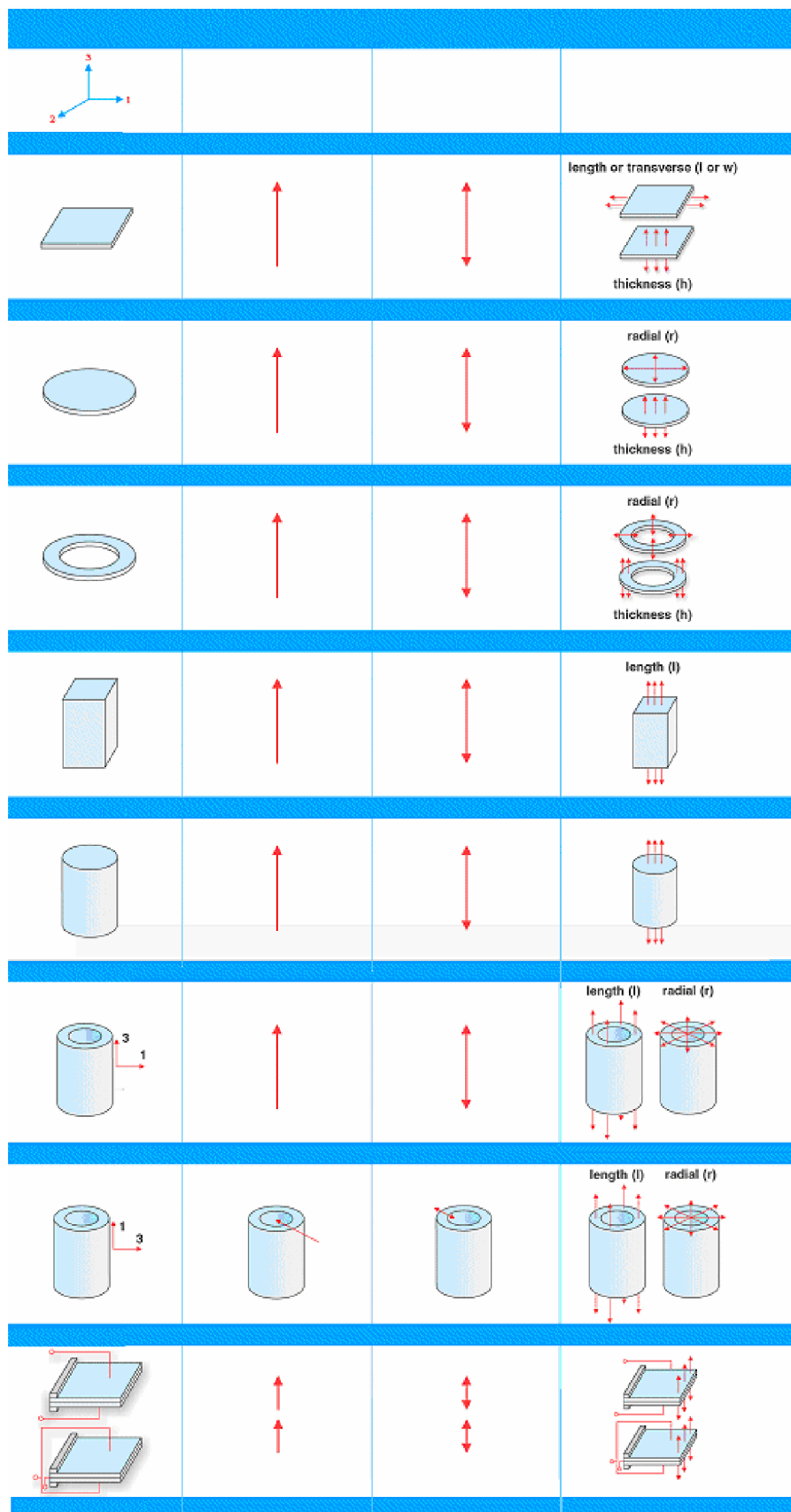
6.8 Rezonanční frekvence

Piezelektrické prvky mají různě velkou účinnost přeměny elektrické a mechanické energie v závislosti na hodnotě frekvence buzení. Pro každý tvar piezelektrického prvku lze nalézt frekvenci, kdy je mechanické kmitání prvku nejbližší elektrickému kmitání. Tuto frekvenci označujeme jako rezonanční frekvenci f_r , tehdy je impedance piezelektrického prvku nejnižší – řádově $k\Omega$. Opačný stav, při kterém je impedance prvku nejvyšší, – řádově stovky $k\Omega$ až $M\Omega$ - nastává při takzvané antirezonanční frekvenci f_a . Hodnoty antirezonanční (f_a) a rezonanční frekvence (f_r) jsou používány pro výpočet coupling faktoru.



Obr. 23 Průběh impedance v závislosti na frekvenci

6.9 Módy vibrací



Obr. 23 Typy piezoelektrických prvků a jejich namáhání

6.10 Tvrdá a měkká keramika

Přidáním malého množství příměsí donorů (prvek, jehož atom má o jeden elektron více než původní směs) do směsi potřebné pro výrobu keramiky, získáme materiál pro výrobu takzvané měkké keramiky. Měkká keramika (*soft ceramics*) má obecně schopnost větších mechanických posuvů a ohybů než tvrdá keramika, a také větší hodnoty permitivity. Měkké keramiky však nejsou vhodné pro buzení vysokými frekvencemi v kombinaci s velkým elektrickým polem.

Přidáme-li příměsí akceptorů (prvky, kterým jeden elektron chybí), získáme tvrdou keramiku (*hard ceramics*). Vlastnosti tvrdé keramiky jsou většinou opačné než u měkké keramiky, například mechanické posuvy jsou menší, přepolarizování je obtížnější.

V následující tabulce jsou uvedeny přibližná srovnání vlastností obou typů keramik. Tato hodnocení vycházejí ze srovnání několika typů keramik od několika různých výrobců, kteří se snaží vytvořit keramiku s co nejlepšími vlastnostmi, a tedy popis nemusí naprosto souhlasit.

Tabulka 2 Porovnání vlastností piezokeramiky

Vlastnost keramiky	Měkká keramika	Tvrdá keramika
Piezoelektrická napěťová konstanta	Menší	Větší
Piezoelektrická nábojová konstanta	Větší	Menší
Permitivita	Větší	Menší
Dielektrická konstanta	Větší	Menší
Dielektrické ztráty	Větší	Menší
Rezistivita	Vysoká až velmi vysoká	Menší
Coupling faktor	Přibližně shodné vlastnosti	
Curieho teplota	Mezi oběma typy keramiky jsou materiály s vyšší i nižší Curieho teplotou, podle složení	
Činitel jakosti Q	Malý	Vyšší až vysoký
Linearita	Malá	Větší
Odolnost proti přepolarizaci	Menší	Větší

Velké množství zdrojů uvádí, že Coupling faktor je u tvrdé keramiky větší než u měkké keramiky. Při srovnání zdrojů výrobců však hodnoty vychází velmi podobně pro

oba druhy keramiky. Podobně dopadlo srovnání Curieho teploty pro tvrdou a měkkou keramiku. Záleží i na vývoji nových materiálů, kdy se výrobci snaží o dosažení co nejlepších vlastností ve všech směrech, a postupně je uvádějí do výroby.

6.11 Stárnutí piezokeramiky

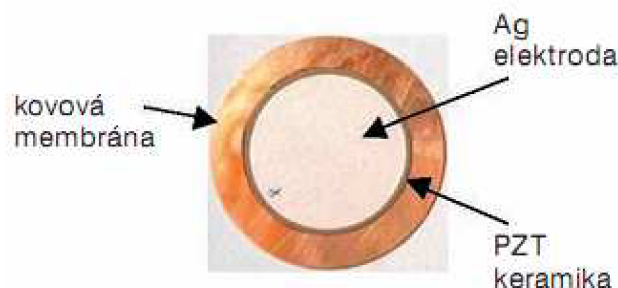
Jak je uvedeno v [4], vlastnosti PZT keramik se také vyvíjejí v čase – tzv. stárnutí (anglicky aging), které v čase postupuje logaritmicky. Krátce po polarizaci dosahují hodnoty např. piezoelektrického koeficientu d_{33} maximálních hodnot, potom se postupně zmenšují. Výrobci keramik udávají, kdy byl jejich materiálový koeficient měřen (např. typicky 24 h po polarizaci). Typické hodnoty stárnutí činí řádově procenta změny z materiálového koeficientu za dekádu. Například 1 % za dekádu znamená, že koeficient se změní o 1 % své hodnoty za jeden den, o další procento za dalších deset dnů, další procento za dalších 100 dnů atd. Toto je způsobeno teplotním pohybem, kdy se jednotlivé molekuly piezokeramiky odchyľují od osy polarizace. Toto je umocněno v době, kdy materiál není používán, a nedochází k opětovné polarizaci působením elektrického pole. Stejně tak je důležité nevystavovat keramiku vysokým teplotám.

7 Základní typy piezoelektrických prvků

Hlavní směry konstrukčního provedení piezokeramických elementů vychází ze závislosti na použití jedné, nebo více vrstev piezokeramiky. Uvádíme zde základní rozdělení, bližší informace jsou uvedeny v literatuře: [1],[2],[3],[4],[5]

7.1 Unimorfy

Nejčastěji tenké kruhové desky s nalepeným kruhovým prvkem piezokeramiky, které se používají jako generátory zvuku v sirénách, zvoncích a podobných aplikacích. Takovýto typ jsme použili při testování generátoru v praktických podmínkách.



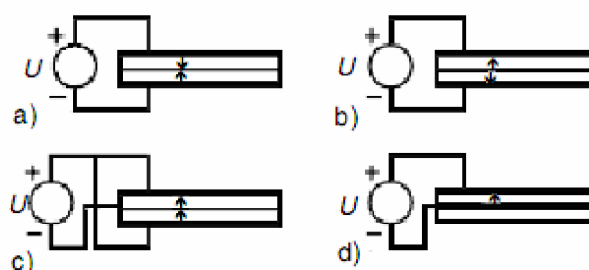
Obr. 24 Unimorf použitý jako piezoelektrický měnič

7.2 Polymorfy

Jsou piezokeramické prvky složené z více vrstev než dvou (*multilayered*), které vykazují zvýšenou účinnost přeměny energie. Často se využívají jako aktuátory v aplikacích s nízkou spotřebou energie, nebo tam, kde jsou požadovány velké posuvy.

7.3 Bimorfy

Jsou plátky případně disky vyrobené ze 2 vrstev piezokeramiky, často ještě kombinované s kovovými vrstvami tvořící elektrody. Rozlišujeme typ bimorfu podle směru polarizace jednotlivých vrstev, jak je naznačeno na obrázku 25. Nejčastější případ použití bimorfů jsou aktuátory a snímače.



Obr. 25 Konfigurace bimorfů: a), b) sériové spojení, c) paralelní spojení
d) unimorf s kovovým plátkem

8 Modelování materiálu

8.1 Model materiálu piezokeramiky

Jako piezo keramiku jsme při realizaci generátoru použili materiál s označením PCM 51 od firmy Noliac². Jedná se o měkkou keramiku splňující kompromis mezi požadovanými vlastnostmi a dostupnými vlastnostmi. Oproti jiným keramikám má vyšší hodnotu nábojové konstanty a napěťové konstanty. Dalším důležitým parametrem keramiky je činitel jakosti Q_m , který určuje šířku pásma rezonanční frekvence a velikost tlumení. Na kvalitě rezonance celého systému se však z největší části bude podílet kmitající nosník. Dále jsou uvedeny vybrané materiálové hodnoty keramiky PCM 51:

² www.noliac.com

Dielektrická konstanta $K^T = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 1850$ []

Ztrátový úhel $\text{tg}\delta = 190 \cdot 10^{-4}$ []

Coupling faktor []

- $k_p = 0,67$
- $k_t = 0,51$
- $k_{31} = 0,37$
- $k_{33} = 0,72$

Nábojová konstanta

- $-d_{31} = 190 \cdot 10^{-12}$ [C/N]
- $d_{33} = 460 \cdot 10^{-12}$ [C/N]

Napěťová konstanta³

- $-g_{31} = 13,1 \cdot 10^{-3}$ [Vm/N]
- $g_{33} = 27,4 \cdot 10^{-3}$ [Vm/N]

Činitel jakosti $Q_m = 80$ []

Hustota $\rho = 7800$ [kg/m³]

Elastická poddajnost

- $s_{11}^E = 16,2 \cdot 10^{-12} \left[\frac{m^2}{N} \right]$
- $s_{33}^E = 18,7 \cdot 10^{-12} \left[\frac{m^2}{N} \right]$

Curieho teplota $T_c = 340$ [°C]

Udáváme-li materiálové charakteristiky, musíme si uvědomit, že se vztahují ke standardu ANSI-IEEE 176. Tento standard určuje orientaci os piezoelektrického prvku a vůči této orientaci jsou uvedeny definované vztahy. Při práci v simulačním programu je tedy nutno orientovat osy piezokeramiky, a tedy i celého modelu do odpovídajících souřadnic. V opačném případě získáme naprosto zavádějící údaje.

Materiálové hodnoty potřebné pro numerický výpočet jsme zadávali pomocí skriptu tak, aby materiál označený jako 1 odpovídal piezokeramice, a materiál 2 odpovídal oceli tvořící rezonanční část. Hustotu, ztrátový úhel a permitivitu jsme zadali jako výše vypsane hodnoty. Dále je třeba poznamenat rozdíl v zadávání permitivity pro

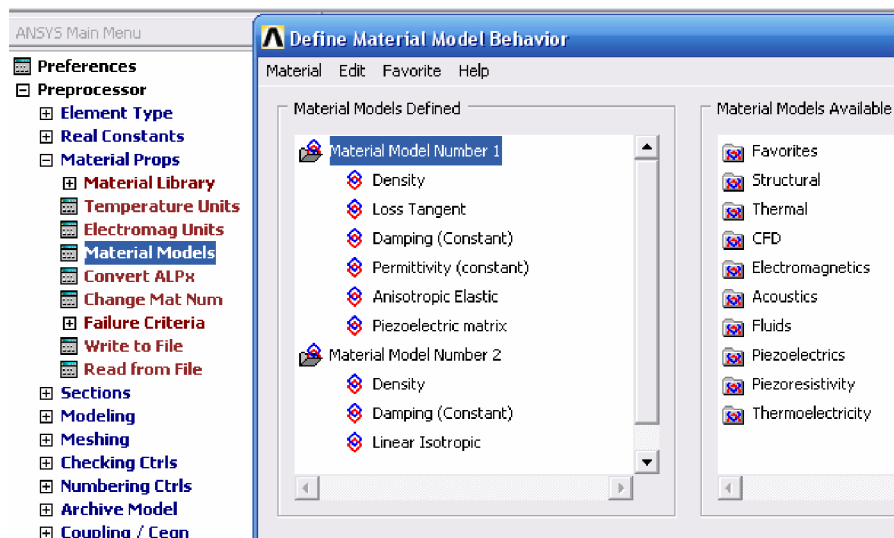
³ Oproti oficiálním materiálům je zde opravena hodnota exponentu z 10^3 na správnou hodnotu 10^{-3}

prvek SOLID5, SOLID98 a SOLID226. U prvků SOLID 5 a 98 umí program rozpoznat, zda se jedná o relativní nebo absolutní primitivitu, avšak pro prvek SOLID 226 je nutno vždy zadávat relativní permitivitu. Velikost materiálového tlumení materiálu piezokeramiky jsme určili z činitele jakosti Q_m : [19]

$$Q_m = \frac{1}{2b_p} \quad (34)$$

Hodnota b_p tedy činí $b_p = 0,00625$. Tuto hodnotu jsme zadali pomocí příkazu:

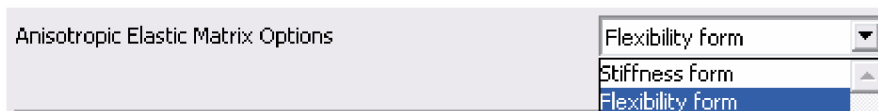
MPDATA, DAMP, 1, , 6.25E-3



Obr. 26 Zadané materiálové charakteristiky

8.1.1 Model anizotropního materiálu piezokeramiky

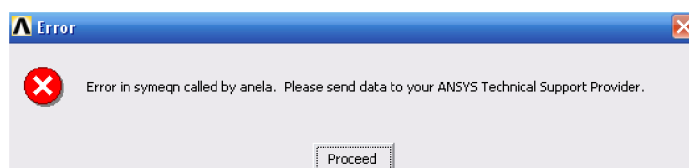
Vzhledem k anizotropní povaze materiálu piezokeramiky jsme byli nuceni určit materiálové hodnoty z elastické poddajnosti. ANSYS sice umožňuje zadat přímo matici elasticity jako matici tuhostní formy, nebo matici poddajnostní formy.



Obr. 27 Možnosti zadávání matice anizotropní elasticity

Ovšem při následném spuštění modelu se zadanou maticí v poddajnostní formě vyhlásí program chybu čtení. Dalším důvodem pro nevyužití této možnosti je poznámka

v dokumentaci programu ANSYS: „Matici poddajnostní formy je možno zadat, ale pro získání přesných výsledků je vhodnější použití matice v tuhostní formě.“ [30]



Obr. 28 Odmítnutí zadané matice v poddajnostní formě

Z těchto důvodů jsme zadávali matici elasticity v tuhostní formě. Při přepočtu hodnoty elastické poddajnosti sE na tuhostní formu jsme vyšli ze vztahů pro popis elastických koeficientů izotropního materiálu.[20] Protože většina autorů přejímá tyto vztahy od zahraničních autorů, uvedeme je zde ve tvaru používaném v anglicky psané literatuře.

$$\text{poddajnostní forma} \quad \begin{pmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\mu} \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$\text{tuhostní forma} \quad \begin{pmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \quad (36)$$

Kde:

E Youngův modul pružnosti

ν Poissonova konstanta

λ, μ jsou tzv. Lamého vztahy

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (38)$$

Z materiálových hodnot uváděných výrobcem, nám chyběla hodnota Poissonovy konstanty. Ačkoliv se jedná o anizotropický materiál, většina výrobců udává její při-

bližnou velikost. Hodnoty Poissonovy konstanty se ve většině případů pohybují v rozsahu od $\nu(\mu) = 0,2$ do $\nu(\mu) = 0,4$. Pro přepočítání jsme zvolili střední hodnotu $\nu(\mu) = 0,3$. Dopustili jsme se tak jisté chyby, ovšem bez tohoto řešení by chyba byla daleko větší vzhledem k zanedbání účinků namáhání v různých směrech.

Matice (35 a 36) jsou symetrické, proto stačí zadávat jen polovinu hodnot. Navíc zadané matice by měly být pozitivně definitní. Hodnoty jsou na místa v matici vkládány podle následujícího schématu:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccc}
 & x & y & z & xy & yz & zx \\
 x & D_{11} & & & & & \\
 y & D_{21} & D_{22} & & & & \\
 z & D_{31} & D_{32} & D_{33} & & & \\
 xy & D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & & \\
 yz & D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & \\
 zx & D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66}
 \end{array} \\
 \left. \begin{array}{l}
 \text{symetrické} \\
 \text{hodnoty}
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Obr. 29 Zápis matice anizotropní elasticity

Proto jsme při zadávání přepočítaných hodnot museli respektovat osy souřadného systému. Modul pružnosti jsme vypočetli shodně pro směry x-x, y-y poddajnosti s_{11}^E , z poddajnosti s_{33}^E hodnotu z-z. Podobně jsme dopočetli zbylé hodnoty. Výsledkem je tabulka na obrázku 30:

Anisotropic Elasticity for Material Number 1	
Anisotropic Elastic Matrix Options	
Stiffness form	
T1	
Temperature	
D11	5,33E+010
D12	2,45E+010
D13	1,96E+010
D14	0
D15	0
D16	0
D22	5,33E+010
D23	1,96E+010
D24	0
D25	0
D26	0
D33	4,27E+010
D34	0
D35	0
D36	0
D44	5,76E+010
D45	0
D46	0
D55	4,62E+010
D56	0
D66	4,62E+010

Obr. 30 Matice anizotropního materiálu zadaná v prostředí ANSYS

8.1.2 Piezoelektrická matice

Abychom mohli počítat elektrické napětí, které se objeví na piezokeramice při mechanickém namáhání a naopak, musíme zadat piezoelektrické vlastnosti v podobě matice napěťových, nebo nábojových konstant. My jsme se rozhodli pro zadávání matice v podobě napěťových konstant, jelikož nám to umožnilo výhodně srovnávat vlastní hodnoty materiálu s jinými materiálovými modely. Pro 3-D modely má piezoelektrická matice tento tvar:⁴

$$[e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(3 - D)

Obr. 31 Zápis piezoelektrické matice podle standardu ANSI/IEEE

Většina materiálových hodnot je uváděna podle standardu ANSI/IEEE Standard 176–1987, který uvádí pořadí jednotlivých os x, y, z, yz, xz, xy. Oproti tomu ANSYS používá pořadí x, y, z, xy, yz, xz. Proto je nutné dbát při zadávání hodnot pozor na správné pořadí vkládaných hodnot takto:

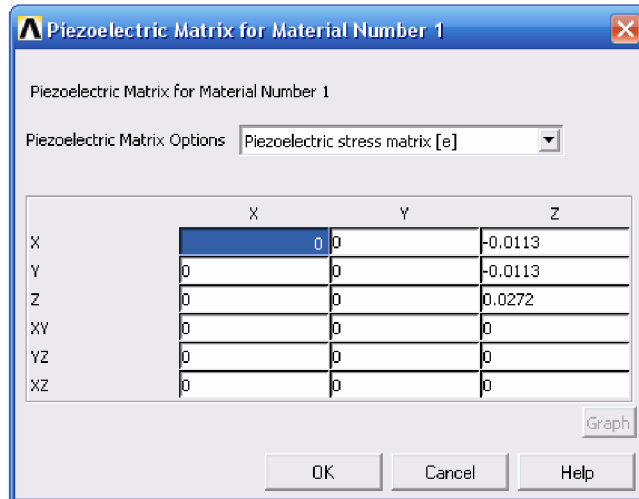
$$\text{ANSYS } [e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Obr. 32 Zápis piezoelektrické matice v prostředí ANSYS

V našem případě jsme se tomuto vyhnuli, protože jsme neznali přesné materiálové charakteristiky. Avšak zjistili jsme že oproti ANSI/IEEE normě, kdy jsou hodnoty udávány

⁴ symbol e zde označuje napěťovou konstantu d

jako d_{31} , d_{23} , musíme při vkládání hodnot do matice prohodit jednotlivé indexy na e_{13} , e_{32} , i když po zadání do tabulky má matice správný tvar. Při ověřování jsme zjistili rozdílné hodnoty výsledků pro oba dva zadané případy.



Obr. 32 Hodnoty matice piezoelectricity zadané v prostředí ANSYS

8.2 Model materiálu oceli

Pro modelování kovového kladívka jsme zvolili běžnou ocel s hodnotami:

Hustota $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Poissonova konstanta $\mu = 0,3$ (v angličtině ν)

Modul pružnosti v tahu $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Tlumení $b_p = 0,1$

Velikost materiálového tlumení jsme uvažovali jako velikost poměrného útlumu b_p . Skutečný materiál jsme vystavili mechanickým rázům a sledovali jsme odezvu na buzení. Podle [19] jsme určili poměrný útlum b_p z logaritického dekrementu tlumení jako:

$$\vartheta = \ln \left(\frac{q_n}{q_{n+1}} \right) = \frac{2b_p}{\sqrt{1-b_p^2}} \quad (39)$$

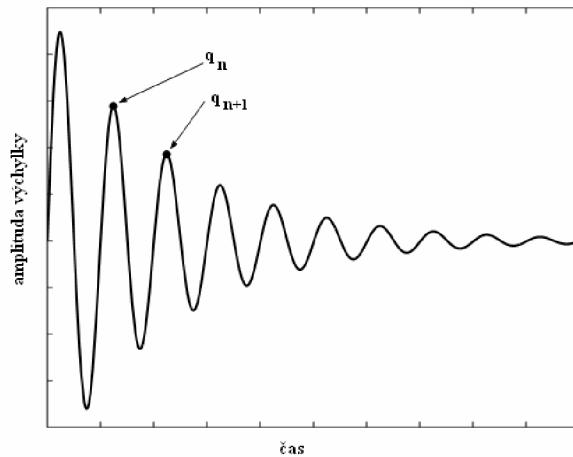
kde:

q_n je velikost amplitudy prvního kmitu

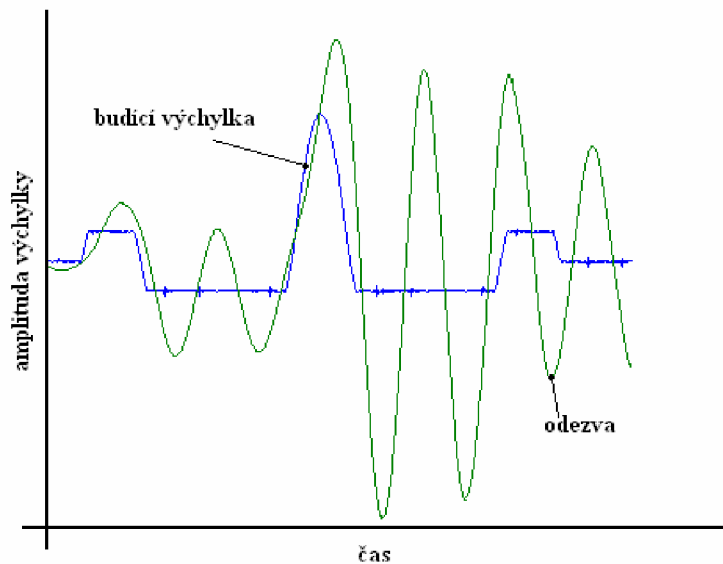
q_{n+1} je velikost amplitudy následujícího kmitu

Z naměřených hodnot jsme vypočetli hodnotu poměrného útlumu $b_p = 0,1$. Hodnotu tlumení jsme opět zadali pomocí příkazu:

MPDATA , DAMP , 2 , , 0 . 1



Obr. 33 Způsob výpočtu logaritmického dekrementu tlumení [21]



Obr. 34 Odezva rezonanční části navrhovaného generátoru na buzení při testování na vibrační stolici

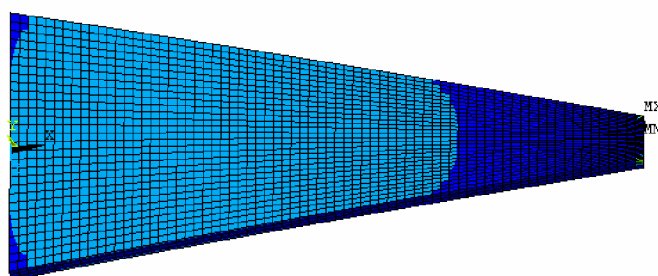
9 Použitý prvek

9.1 Prvek použitý pro model piezokeramiky

Pro výpočty námi modelované piezokeramiky je nutno vybrat prvek ze skupiny Coupled Field. Tyto prvky zahrnují mimo posuvů v osách x, y, z, ještě další stupně volnosti umožňující výpočty zahrnující elektrické napětí, tepelné výpočty, magnetické pole. Při prvních pokusech o modelování piezokeramického materiálu jsme vyšli z nápovědy k programu ANSYS. [30] V dokumentaci jsou uvedeny dva příklady spojené s modelováním piezokeramiky:

- vm175 – hledání vlastních frekvencí
- vm176 – výpočet rezistivity

Výpočtáři v těchto příkladech využívají pro tvorbu sítě nejjednodušší prvek SOLID5, který je schopný modelovat materiál s piezoelektrickými vlastnostmi. Prvek SOLID5 má 8 uzlů, každý se 6 stupni volnosti. Při prvotním návrhu tvaru generátoru jsme tento prvek použili, a otestovali možnosti dalšího použití. Hledali jsme vlastní frekvence navrhovaného generátoru, abychom si tak ověřili předpokládané hodnoty. Vytvořili jsme síť z těchto prvků a sledovali, jak se bude měnit vypočtená vlastní frekvence v závislosti na velikosti elementu, vypočtené hodnoty jsme uvedli v tabulce 3.



Obr. 35 Ukázka navrhovaného nosníku

Tabulka 3. Vliv velikosti prvku na vypočtenou frekvenci

Velikost elementu [mm]	Vypočtená vlastní frekvence [Hz]
10	130,07
5	129,22
4	128,99
3	128,77
2	128,42

Vypočítaná frekvence modelu s hustější sítí konverguje k přesnější hodnotě, avšak kvůli technickým omezením programu můžeme zjemňovat síť jen do určité hodnoty. S rostoucím počtem prvků roste počet nodů, až narazíme na omezení maximálního počtu uzlů. Proto jsme otestovali použití jiných prvků: [30]

- SOLID98 – kvadratický 10 uzlový čtyřstěn, rozšířená verze prvku SOLID5 s 6 stupni volnosti v každém uzlu.
- SOLID226 – kvadratická 20 uzlová krychle s 5 stupni volnosti v každém uzlu

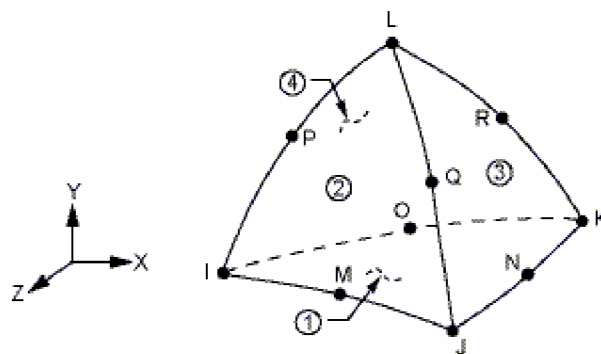
Kvadratické prvky používají kvadratické báze funkce, oproti tomu prvek SOLID5 používá lineární báze funkce. Použití prvku SOLID226 se jeví jako nejlepší volba, ovšem narazili jsme na omezení počtu uzlů v úloze, navíc se výrazně prodloužil výpočetní čas úloh. Čtyřstěn prvku SOLID98 produkuje méně přesné výsledky, zejména nespojitosti na hranicích prvku, oproti prvku 226, ale zároveň mnohem lepší výsledky než prvek SOLID5. SOLID5 a SOLID 98 používají shodné nastavení sítě, lze je tedy pro stejný model jednoduše zaměnit. Z těchto důvodů jsme se rozhodli spokojit se s méně přesnými výsledky při modelování piezokeramiky umístěné na generátoru, jehož parametry nejvíce ovlivňujeme tvarem kmitajícího nosníku. Při použití čtyřstěnových prvků si musíme dát pozor při tvorbě sítě, abychom nevytvořili příliš deformované prvky, které produkují největší chyby. Pokud bychom však modelovali hlavní část generátoru pouze z piezokeramického materiálu, bylo by vhodnější použít prvek 226.

Nastavení prvku 98:

```

ET,1,SOLID98                !prvek solid186
KEYOPT,1,1,3                !nastaveni solidu186
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,5,2

```



Obr. 36 Prvek SOLID 98 [30]

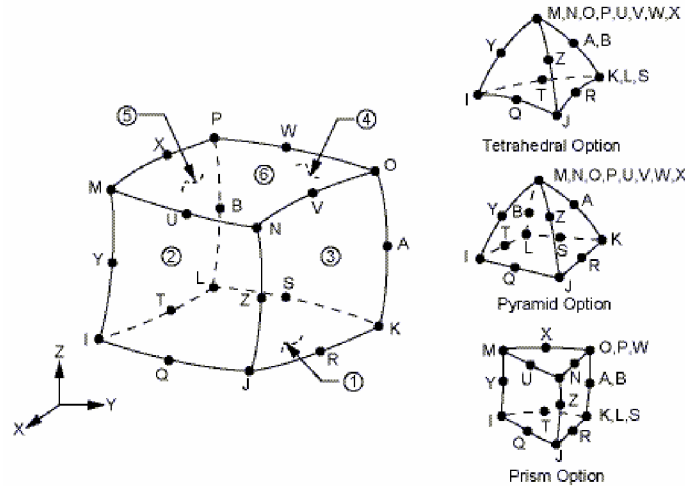
9.2 Prvek použitý pro model oceli

Abychom správně navázali síť ocelového nosníku a piezokeramiky, museli jsme pro ocel vybrat také kvadratický prvek. Tím jsme zabezpečili návaznost uzlů jednotlivých sítí. Vybrali jsme prvek SOLID186, 20-uzlový, kvadratický, krychlový prvek se třemi stupni volnosti v každém uzlu – posuvy v osách x, y, z.

Nastavení prvku 186:

```
ET,2,SOLID186  
KEYOPT,2,2,0  
KEYOPT,2,6,0  
KEYOPT,2,10,0
```

```
!prvek solid186  
!nastaveni solidu186
```



Obr. 37 Prvek SOLID 186 [30]

10 Návrh piezoelektrického generátoru

10.1 Požadavky na piezoelektrický generátor

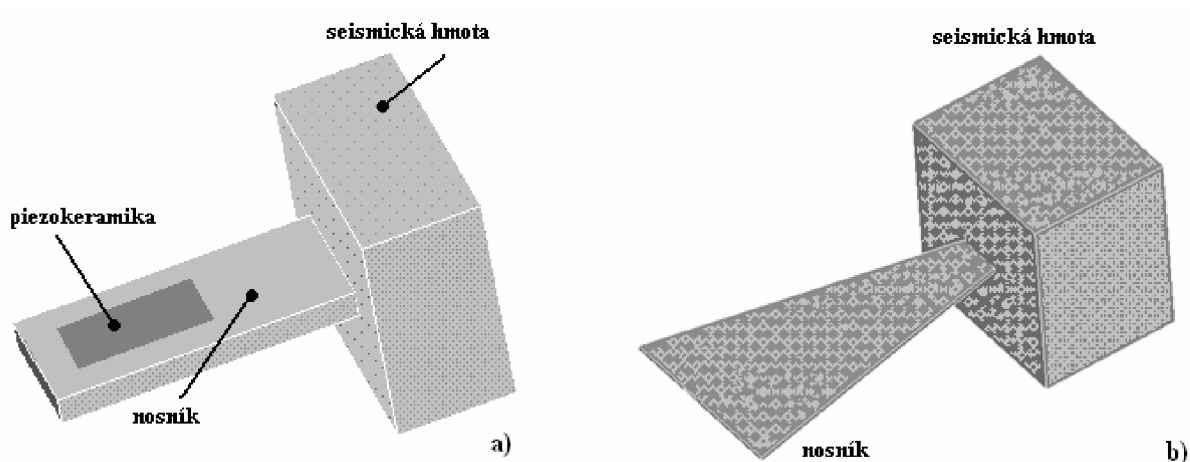
Základním požadavkem jsou malé rozměry generátoru, a jednoduchá konstrukce. Přestože jsou piezoelektrické generátory vhodnější pro frekvence přibližně od 200 až 500 Hz, je úkolem navrhnout generátor tak, aby byl použitelný do frekvence budících vibrací do 200 Hz. Pro každou frekvenci je nutné správně naladit rozměry generátoru. V rozsahu nízkých hodnot frekvencí se nabízí možnost porovnání s elektromagnetickými generátory.

10.2 Základní koncepce

Ze tří přístupů jsme si ke konstrukci generátoru vybrali návrh ve tvaru vetknutého nosníku. Tento tvar má výhodu ve větší ploše rezonanční části, kterou můžeme pokrýt piezokeramikou, a tedy i vyšší výstupní výkon. Dále umožňuje jednodušší připevnění piezokeramiky s elektrickými přívody. Tento typ konstrukce využívá ohybu vetknutého nosníku k deformaci piezokeramiky v módu 31. Pokud jsou dostupné budící vibrace vyšších frekvencí, je výhodnější využití vyšší vlastní frekvence nosníku a příslušného tvaru kmitu, kdy dochází k protahování nosníku do délky.

10.3 Návrh rezonanční části

První návrhy vypadaly jako na obr. 38 a). Při pohybu docházelo k největšímu namáhání u vetknutého konce nosníku. Pokud keramika pokrývala plochu nosníku, docházelo vlivem vyrovnávání náboje na elektrodách ke zbytečným ztrátám. Postupně se objevily další tvary nosníku, zúžené směrem k zatíženému konci tak, aby ohybový moment byl po celé délce nosníku přibližně stejný. Objevily se i návrhy nosníku s vyvrtanými otvory, avšak tyto návrhy se neujaly. Otvory způsobovaly lokální koncentraci napětí, a rozdílné deformace plochy piezokeramiky.



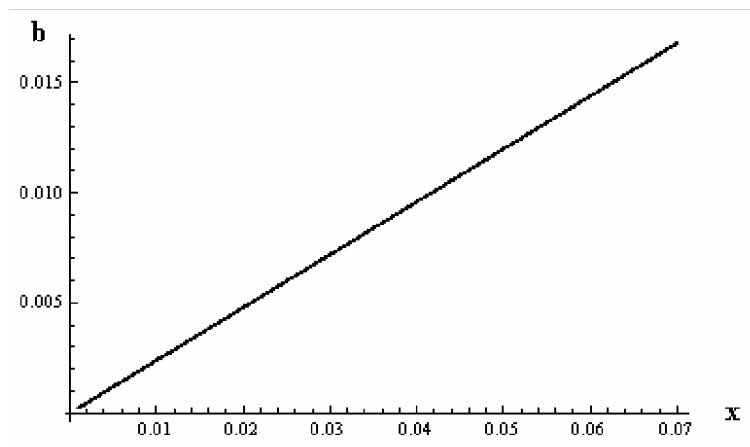
Obrázek 38 a) první návrhy rezonanční části b) vylepšené návrhy

Vyšli jsme z teorie lineární pružnosti, kdy jsme pro zadané zatížení hledali šířku materiálu tak, aby mechanické napětí bylo po délce rovnoměrné viz rovnice 40. Jelikož jsme zanedbali okrajové podmínky, dopustili jsme se tak jisté chyby, avšak při výrobě skutečného generátoru došlo k nepředvídaným technologickým úpravám, což umožnilo korekci námi akceptované chyby.

$$b = l \frac{12 \cdot F}{100 \cdot p \cdot T^3} \quad (40)$$

kde:

- b šířka materiálu
- l délka materiálu
- F zatěžující síla
- p mechanické napětí
- T tloušťka materiálu



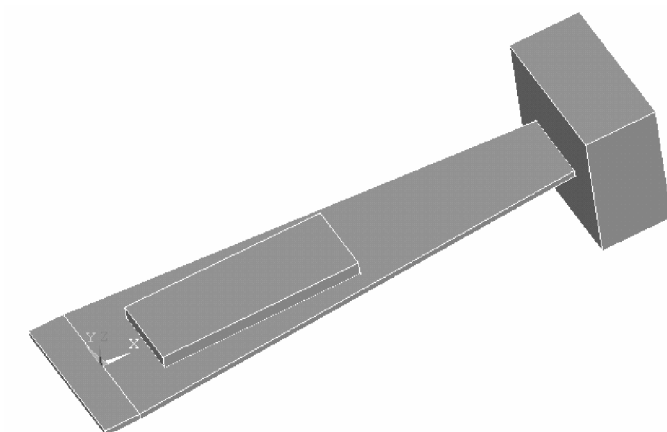
Obr. 39 Závislost šířky materiálu na délce

Z technologických důvodů však nemůže mít vetknutý nosník vypočtené rozměry. Na zúženém konci u seismické hmoty musí být širší, aby bylo možno bezpečně připevnit hmotnost na konec nosníku. Výpočet byl prováděn pro plné pokrytí plochy nosníku, abychom tak maximalizovali dostupný výkon. Rozměry navrhovaného generátoru jsou uvedeny v tabulce. Tyto hodnoty jsme pomocí skriptu parametricky předávali programu ANSYS.

Tabulka 4 Rozměry generátoru spolu s použitou piezokeramikou

Prvek	Délka [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	
Nosník	40	1	20	10
Seismická hmota	10	20	20	
Piezokeramika 1	28	10	2,03	
Piezokeramika 2	20	0,49	20	
Základna	20	1	20	

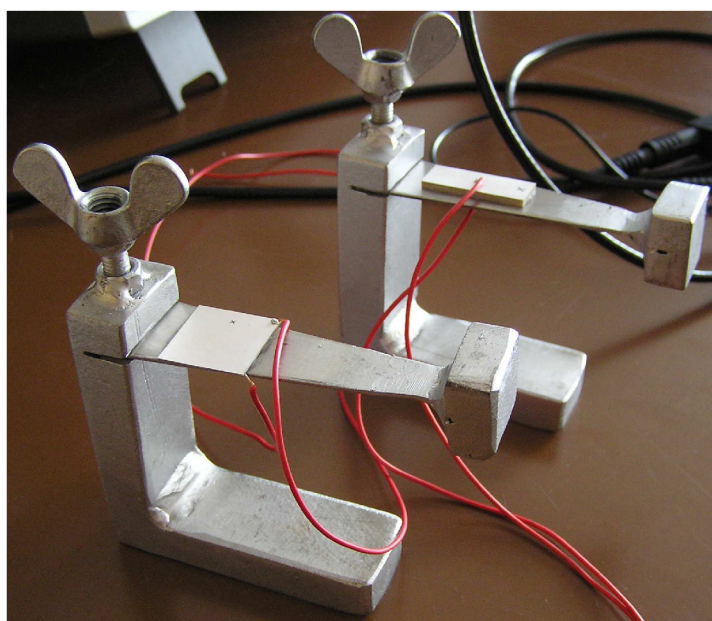
Poté co jsme navrhli tvar a rozměry nosníku, musíme naladit rezonanční část na vhodnou vlastní frekvenci. Vlastní frekvenci nosníku musíme pro každý případ buzení vždy naladit na správnou frekvenci. To je umožněno změnou rozměrů seismické hmoty na konci nosníku.



Obr. 40 Navrhovaná rezonanční část s připevněnou keramikou

11 Konečný návrh generátoru

Použité rezonanční části byly ze zkušebních a technologických důvodů vyrobeny s odlišnými rozměry oproti navrhované rezonanční části generátoru. Hodnoty měření však v dostatečné míře vypovídají i pro navrhovanou část s přesnými rozměry. Z cenových důvodů jsme pro testovací modely použili piezokeramiku pouze na část plochy vetknutého nosníku, jak je vidět na obrázku 41. Použili jsme piezokeramické plátky s rozměry uvedenými v tabulce 4. Na elektrody piezokeramických plátek jsme pomocí mikropájkky připájeli přívody, a zhodnotili jsme možnosti připevnění piezokeramiky k rezonanční části. [22],[23] Rozhodli jsme se pro připevnění piezokeramiky pomocí sekundového lepidla, přičemž další možností je použití epoxidového lepidla.



Obr. 41 Piezoelektrické generátory

11.1 Modální analýza

Vzhledem k povaze úlohy je nutné znát vlastní frekvence rezonanční části a tvary vlastních kmitů, abychom mohli správně naladit vlastní frekvenci na frekvenci budících vibrací. Provedli jsme modální analýzu modelu generátoru pomocí programu ANSYS.

Zde je vhodné uvést vliv tvorby a hustoty sítě na vypočtené výsledky. Při volbě automatické tvorby sítě s velmi řídkou sítí, jsme dostali hodnotu vlastní frekvence téměř stejnou, jako hodnotu vypočtenou pomocí ručně zadané sítě, s velmi vysokou hustotou. Výpočetní čas u takovéto úlohy byl velmi podobný, ale narazili jsme na omezení počtu uzlů v úloze. Je tedy nutné zvolit vhodnou velikost elementů.

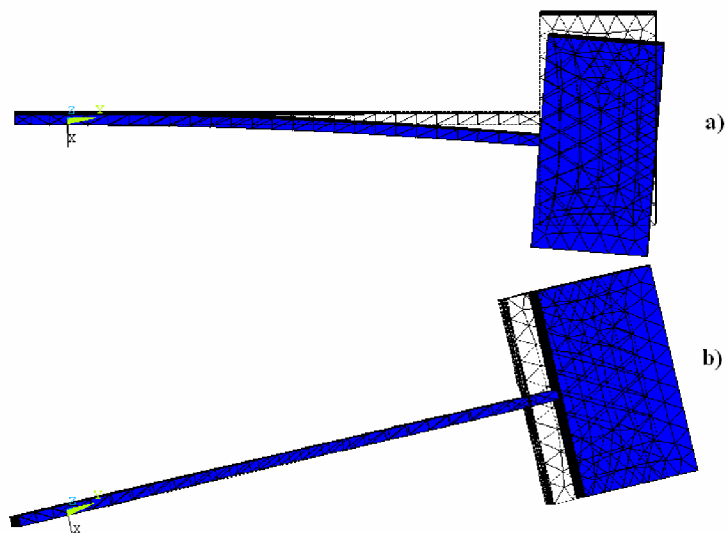
Tabulka 5 Hodnoty pro nosník o délce 65mm bez piezokeramiky

Způsob řešení	1. vlastní frekvence [Hz]
Naměřená hodnota reálného vzorku	43,5
Hodnota modelu s řídkou sítí	42,16
Hodnota modelu s hustou sítí	42,5

Tabulka 6 Hodnoty pro nosník o délce 45mm bez piezokeramiky

Způsob řešení	1. vlastní frekvence [Hz]
Naměřená hodnota reálného vzorku	65,34
Hodnota modelu s řídkou sítí (automatická velikost prvku)	69,855
Hodnota modelu s hustou sítí (velikost prvku 2mm)	69,874

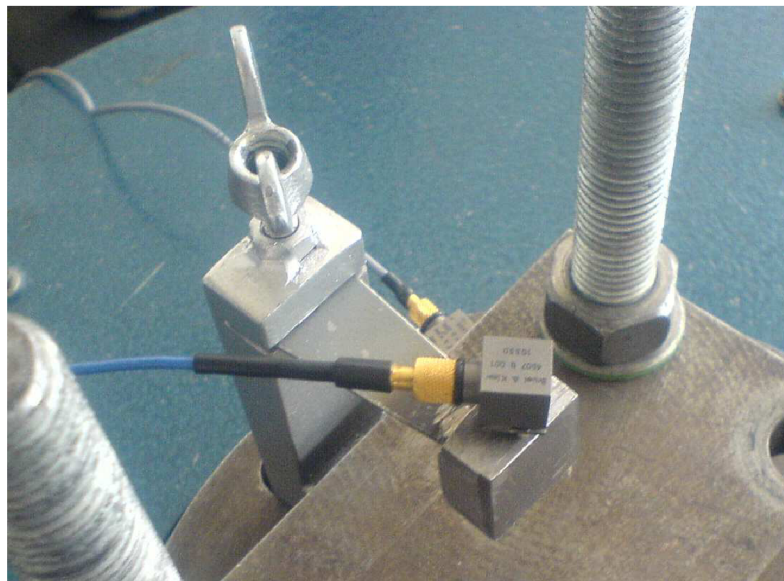
Na obrázku 42 jsou naznačeny tvary kmitu pro první a devátou vlastní frekvenci. Vzhledem k požadavku použití navrhovaného generátoru při nízkých frekvencích, využíváme tvar kmitu první vlastní frekvence. Při ohybu nosníku dochází k tahovému, nebo tlakovému namáhání krajních vrstev. Piezokeramika připevněná k povrchu rezonanční části je tak namáhána v modu vibrací 31. Pokud bychom mohli využít vyšších frekvencí buzení, bylo by výhodné použít kmitání při deváté vlastní frekvenci, kdy dochází přímo k tahovému a tlakovému namáhání nosníku



Obr. 42 a) První vlastní frekvence b) Devátá vlastní frekvence

11.2 Měření vlastní frekvence

Přípravek navrženého tvaru jsme upevnili do vibrační stolice, a působili mechanickým kmitáním, abychom změřili amplitudově-fázovou charakteristiku. Takto jsme si zároveň ověřili přesnost naší výpočtů. Doprostřed horní plochy seismické hmoty jsme připevnili akcelerometr. Druhý jsme připevnili na základnu vibrační stolice, pomocí kterého byl celý pokus řízen z měřicí ústředny. Díky tomu, že jsme měli vyrobeny modely s různou velikostí vetknutého nosníku, mohli jsme detailně prostudovat chování generátoru při vybuzení.

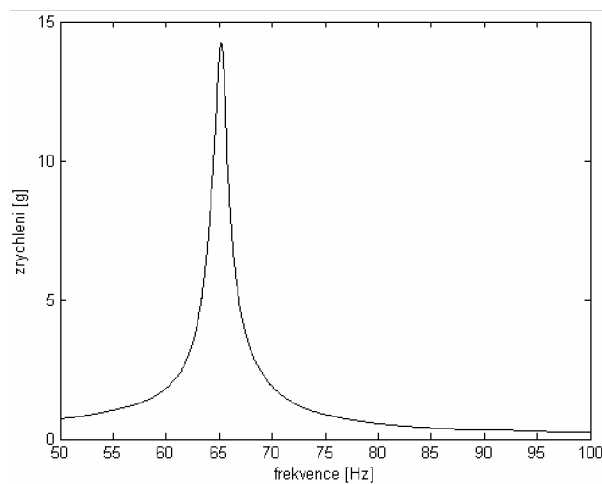


Obr. 43 Navrhovaný generátor připevněný k vibrační stolici

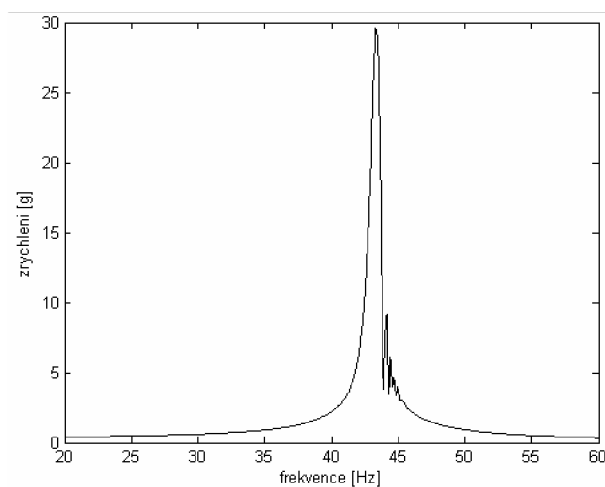
Zkušební přípravek jsme umístili na vibrační stoličku a upnuli do něj rezonanční části generátoru. Pro testování jsme použili různé rezonanční části, které se lišily rozměry nosníku:

- délka 65 mm, šířka 25 mm a 10 mm
- délka 40 mm, šířka 20 mm a 10 mm

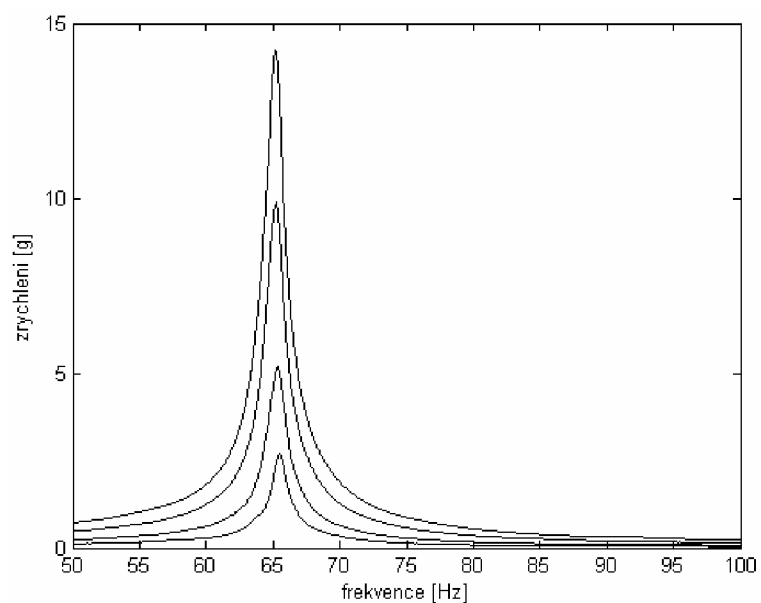
Změřili jsme amplitudově-frekvenční charakteristiky obou rezonančních částí, které jsou vykresleny na obrázcích 44 a 45. Jak je vidět na obrázku 45, při nastávající rezonanci docházelo k velkým výchylkám rezonanční části, které byly náhle zatlumeny vlivem nepřesného uchycení ve zkušebním přípravku. Došlo zde k projevu nelinearit, které se projevily typickými zákmity přicházejícími po zatlumení pohybu.



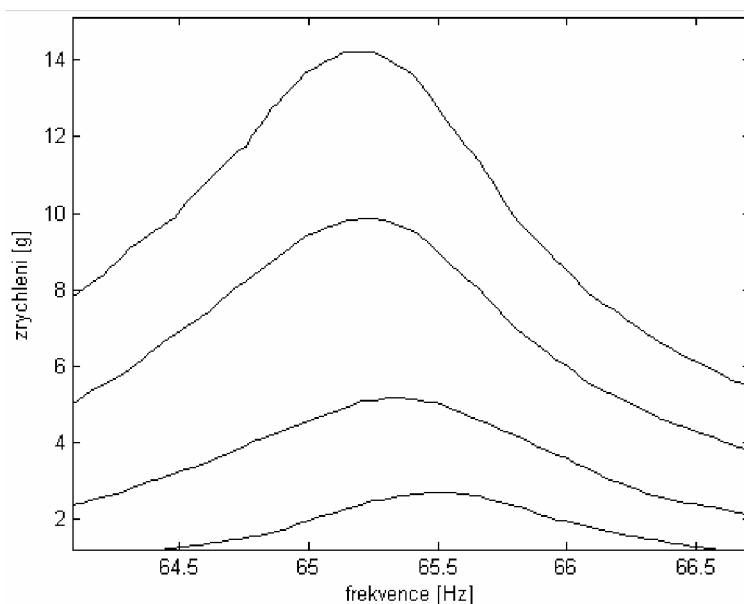
Obr. 44 Amplitudově frekvenční charakteristika rezonanční části o délce 45mm při buzení 3g



Obr. 45 Amplitudově frekvenční charakteristika rezonanční části o délce 65mm při buzení 3g



Obr.46 Amplitudově frekvenční charakteristika při buzení 0,5, 1, 2 a 3g



Obr. 47 Detail ohýbání skeletové křivky

Přípravek jsme testovali na vibrační stoličce:

DERRITRON – HASTINGS ENGLAND

Měření probíhalo na měřicí ústředně:

VR8500 – Vibration Research Corporation [34]

11.3 Impedance piezoelektrického materiálu

Piezokeramika má díky struktuře materiálu vysoký vnitřní odpor. Impedance je důležitá z pohledu výstupního proudu, a tím i výkonu piezo generátoru. Čím vyšší im-

pedance piezokeramiky, tím menší je dodávaný výkon. Impedanci keramiky ovlivňuje složení, ale zejména rozměry keramiky. S rostoucí plochou impedance klesá, ale hlavní vliv na impedanci má tloušťka piezokeramiky. Menší tloušťka piezokeramiky klade menší odpor průchodu proudu a impedance klesá.

11.3.1 Numerický výpočet impedance

Vyšli jsme z modelového příkladu vm176 uvedeného v dokumentaci programu ANSYS. Po namodelování tvaru generátoru jsme provedli coupling nodů na plochách elektrod piezokeramiky. Na horní plochu jsme zadali napětí $U = -1V$, na spodní plochu jsme zadali napětí $U = 0V$. Hledali jsme řešení harmonické analýzy, kde zadané napětí slouží jako buzení v řešených frekvencích.

Nastavení couplingu uzlů:

NSEL,S,LOC,Z,zpa2	!vyber nodu na horni plose pieza
NSEL,R,LOC,X,xpa1,xpa2	!vyber nodu
NSEL,R,LOC,Y,ypa1,ypa2	!vyber nodu
CP,1,VOLT,ALL	!coupling voltu
*GET,HEH,NODE,,NUM,MIN	!horni elektroda - HEH oznaceni
D,HEH,VOLT,-1	!zadano napeti na elektrode HEH
ALLSEL,ALL	!vyber vseh entit

Nastavení harmonické analýzy:

/SOLU	
EQSLV,SPARSE	!resic ridkych matic
ANTYPE,HARMIC	!volba harmonicke analyzy
OUTPR,ALL,ALL,	!ukladani vsech vysledku
HARFRQ,0,200,	!rozsah frekvenci
NSUBST,20	!20 kroku - po 10 Hz
KBC,1	!zatizeni po krocich
SOLVE	!spusteni reseni
FINISH	
/POST26	!casovy postprocesor
RFORCE,2,HEH,AMPS	!zjisteni naboje prosleho elektrodou

Zde je nutno uvést dvě poznámky k výpočtu impedance. Nejdříve je třeba upozornit na nastavení pomocí příkazu KBC. Tento příkaz nastavuje zadávání zatížení jako rampu nebo kroky. Pro správný výpočet je nutno zadat KBC,1, tedy zadávání po krocích, aby zadané zatížení proběhlo celé v každém substepu. Druhá poznámka se týká výpočtu impedance z hodnoty náboje prošlého plochou elektrod.

Příkaz RFORCE:

RFORCE, 2, HEH, AMPS

RFORCE – reakční síla

2 – pořadí proměnné

HEH – symbolické označení elektrody

AMPS – prošlý náboj

Pomocí příkazu RFORCE zjistíme hodnotu náboje prošlého elektrodou. Celkový proud se vypočítává podle vzorce [30], jako suma nábojů:

$$i = j\omega \sum Q_i \quad (41)$$

kde:

$$j = \sqrt{-1}$$

$$\omega = 2\pi f$$

Q_i prošlý náboj

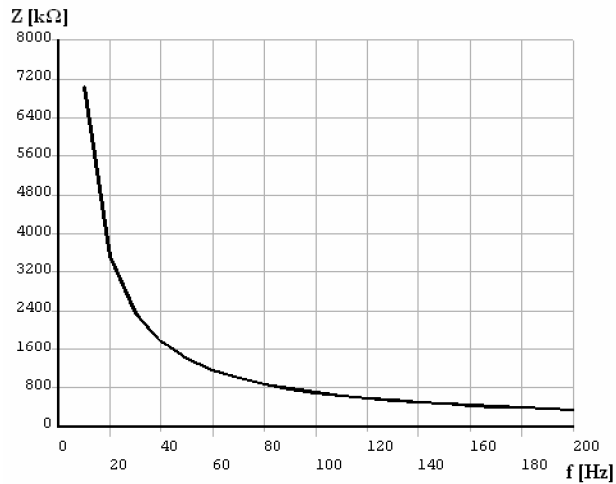
Impedance je tedy:

$$Z = \frac{u}{i} = \frac{u}{j\omega \sum Q_i} \quad (42)$$

V modelovém příkladu vm176 z dokumentace programu ANSYS je počítána admitance, kdež to nás zajímá impedance. Musíme tedy vypočtené hodnoty přepočítat podle vztahu (0.8). V USA se často místo jednotky vodivosti G (Y) udává doslova převrácená hodnota odporu R (Z), jako přesmyčka jednotky Ohm a tedy:

$$1 \text{ siemens } [S] = 1 \text{ mho } [\text{mho}]$$

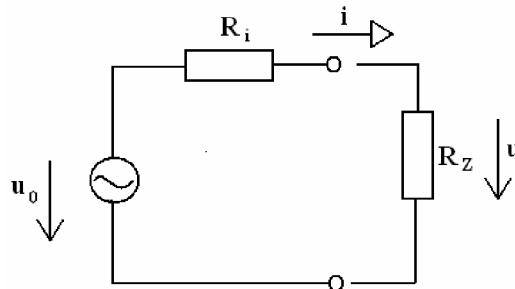
Při numerických výpočtech v programu ANSYS jsme opět otestovali hodnoty vypočtené při různé hodnotě sítě. Tentokrát jsme mimo značného prodloužení výpočetní doby v případě použití husté sítě nezjistili žádné rozdíly ve vypočtené hodnotě impedance oproti použití hrubé sítě. Je tedy výhodnější použít hrubou síť, vzhledem k rychlejšímu výpočtu úlohy



Obr. 47 Průběh impedance piezokeramiky v závislosti na frekvenci

11.3.2 Měření vnitřního odporu:

K piezoelektrickému generátoru jsme připojili osciloskop a měřili napětí generované piezokeramikou. Rezonanční část jsme vybudili pomocí předpětí, které jsme následně uvolnili. Z naměřených hodnot jsme poté vypočítali hodnotu vnitřního odporu.



Obr. 48 Schéma zapojení

kde:

u_0 napětí naprázdno

R_i vnitřní odpor

R_Z zatěžovací odpor

Pokud popíšeme obvod pomocí II. Kirchofova zákona, dostaneme rovnici:

$$-u_0 + R_i \cdot i + u = 0 \quad (43)$$

kde:

$$i = \frac{u}{R_Z} \quad (44)$$

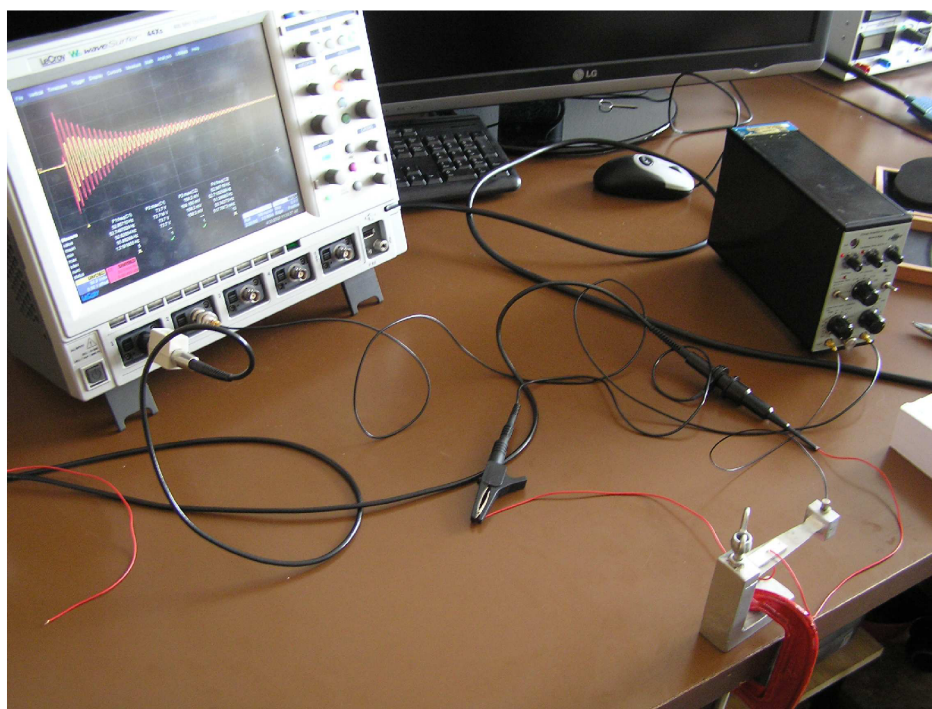
potom:

$$R_i = \frac{R_Z \cdot (u_0 - u)}{u} \quad (45)$$

Tabulka 7 Hodnoty vnitřního odporu pro jednotlivé prvky piezokeramiky

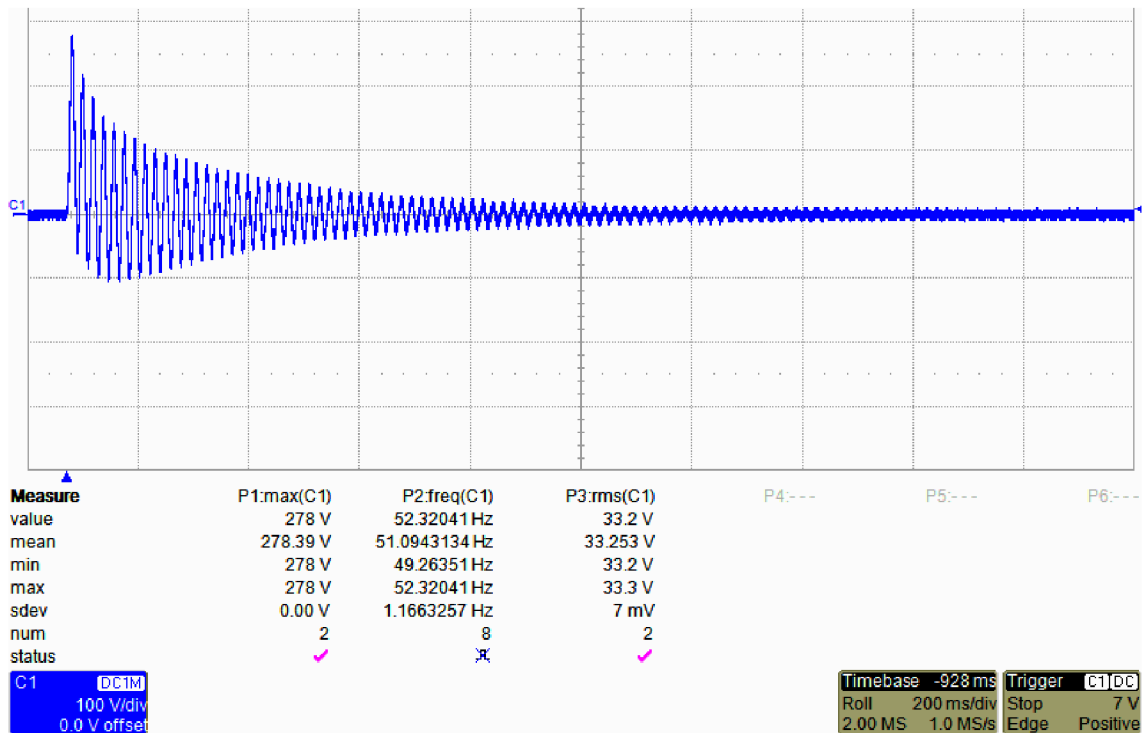
Rozměry piezokeramiky [mm]	Napětí naprázdno [V]	Napětí při zatížení R=100,1 kΩ	Simulovaná impedance [kΩ]	Vnitřní odpor [kΩ]
10x28x2,03	278	22	1 409	1 164,8
			1 409	
20x20x0.49	237	74	238054	220,490
			238054	

Z měření vyplývá vliv šířky piezokeramického plátku na hodnotu impedance. Slabější piezokeramika má zřetelně nižší hodnotu vnitřního odporu oproti piezokeramice s větší tloušťkou.

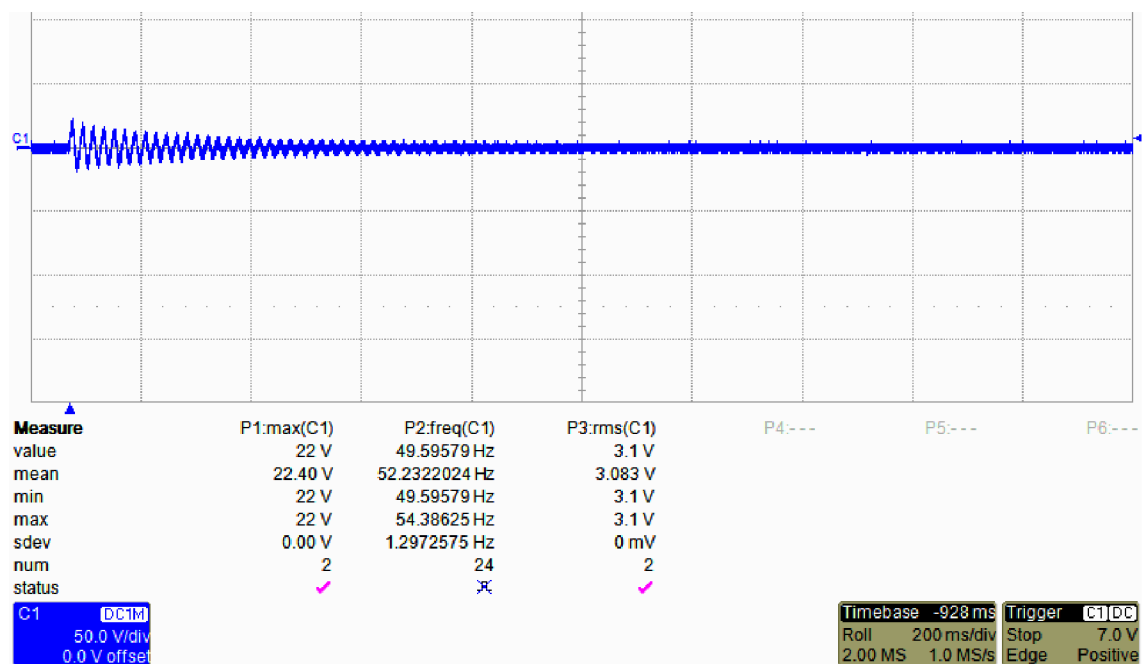


Obr. 49 Měřicí pracoviště

Jak vyplývá z následujících obrázků 50 a 51, při vzrůstajícím zatížení klesá vlastní frekvence generátoru, podobně jako výstupní napětí. Proud protékající piezokeramikou vyvolává účinky působící proti ohybu piezokeramiky a tedy proti kmitům generátoru. Omezením výchylek klesá mechanické napětí piezokeramiky, a proto klesá i generované elektrické napětí.



Obr. 50 Napětí naprázdno při použití piezokeramiky 10x28x0,49 mm



Obr. 51 Napětí na zátěži 100,1 kΩ při použití piezokeramiky 10x28x0,49 mm

11.4 Napěťová odezva na mechanické buzení

Doprostřed horní plochy seismické hmoty generátoru jsme umístili akcelerometr, pomocí kterého jsme měřili pohyby rezonanční části. Druhý akcelerometr jsme umístili na měřicí stůl, abychom měřili kmitání budících sil. Generátor jsme budili a zjišťovali napěťovou odezvu. Toto měření proběhlo bez zátěže, a tedy hodnoty napětí jsou změřeny naprázdno. Modrou barvou je vyznačeno měřené napětí. Zelenou barvou je vyznačeno měřené zrychlení.

Abychom získali přibližnou představu generovaného napětí, použili jsme program ANSYS pro výpočet napětí na piezokeramice, při zadané amplitudě vibrací. Využili jsme možnosti výpočtu transientní analýzy. Na základnu nosníku jsme zadali posuvy jako časově závislou funkci, a opět jsme provedli coupling nodů elektrod. Transientní analýza umí pracovat s tlumením zadaným pomocí příkazu :

```
MPDATA ,DAMP
```

nebylo tedy nutné přepočítávat tlumení materiálu. Použití přechodové analýzy s piezoelektrickým materiálem však vyžaduje zadání přechodových integračních parametrů ALPHA, DELTA, THETA pomocí příkazu TINTP: [30]

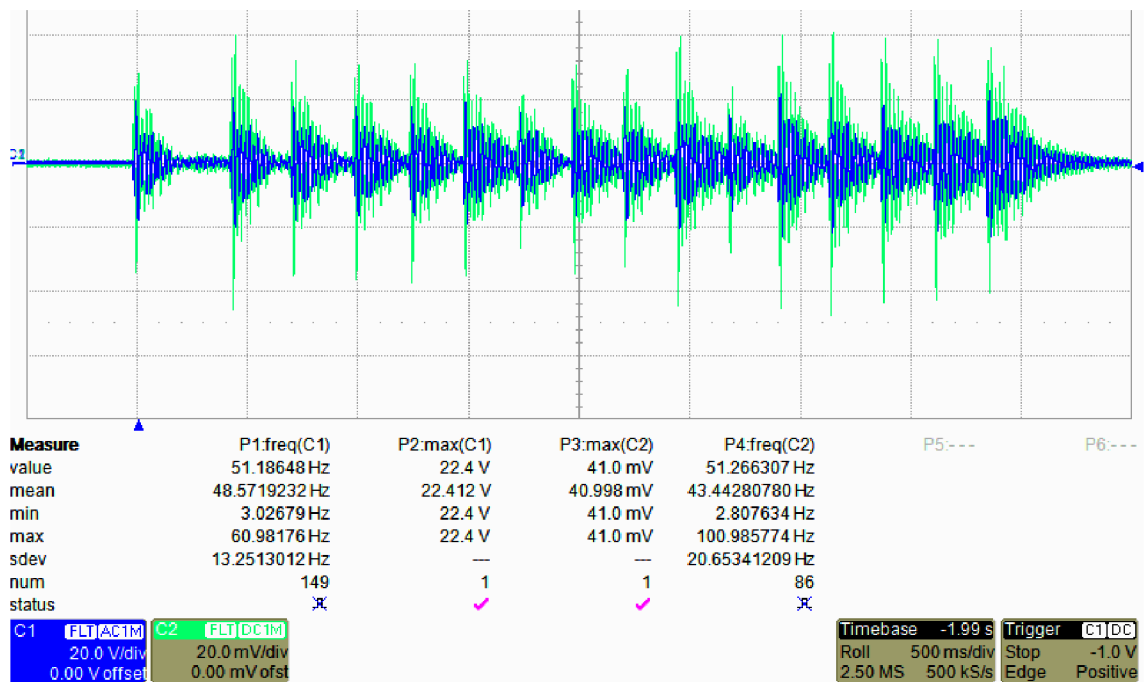
```
TINTP , ,0.25,0.5,0.5
```

Zároveň musí být první parametr GAMMA prázdný. Pokud nezadáme přesně tyto hodnoty, výpočet transientní analýzy se vůbec nespustí,

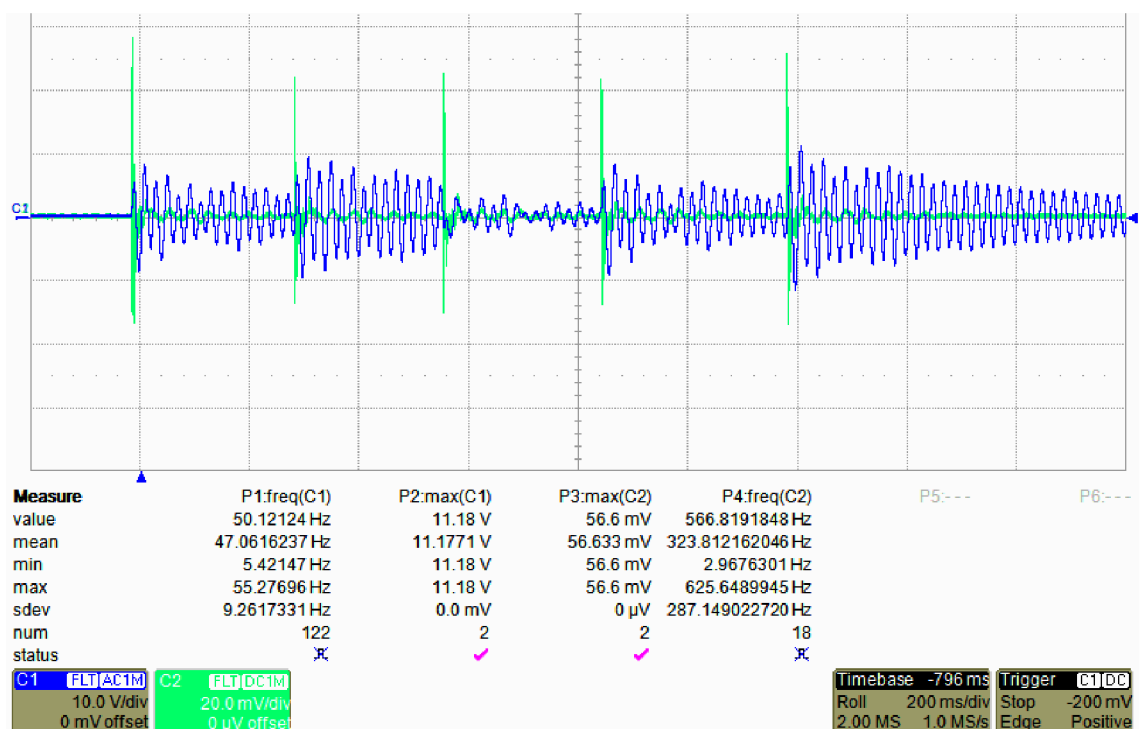
Při použití programu ANSYS jsme dostali výsledky blížící se hodnotám napětí, které jsme změřili na reálné soustavě. Vzhledem k idealizovaným parametrům numerického modelu a nelinearitám skutečného vzorku je rozdíl výsledků přijatelný.

Tabulka 8 Napětí piezokeramiky při buzení

Buzení	Napěťová odezva [V]	Výpočet pomocí programu ANSYS [V]
2,8 m/s ²	6,8	7,1
9,3 m/s ²	17,6	20



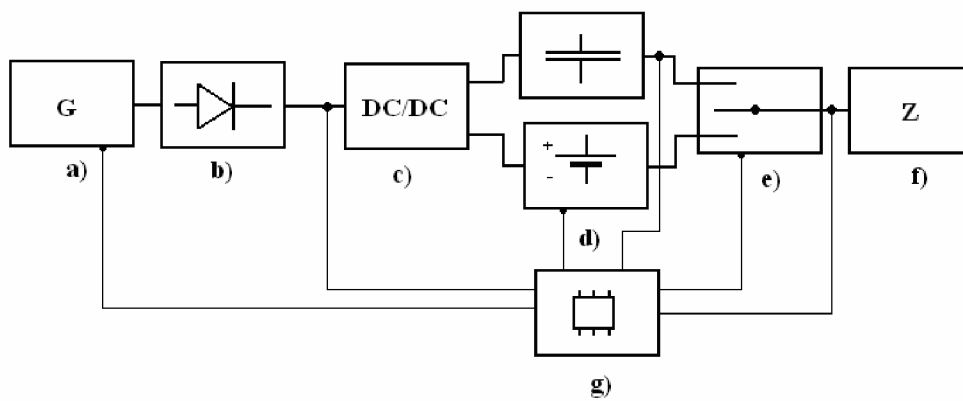
Obr. 52 Odezva na zaklepání - napětí a vibrace generátoru



Obr. 53 Odezva na zaklepání - napětí piezokeramiky a vibrace měřícího stolu

11.5 Návrh blokového schéma řízení odběru výkonu

Při generování elektrické energie dochází k průhybům nosníku na obě dvě strany od podélné osy nosníku. Průběh generovaného napětí nabývá půl periody kladnou hodnotu, druhou polovinu periody zápornou hodnotu. Velikost napětí je proměnlivá podle amplitudy budících vibrací, přesto předpokládáme generování vyššího napětí, než požadujeme. Proto bude nutno umístit na výstup generátoru elektrický obvod, který bude zpracovávat elektrickou energii. Nejdříve se střídavé napětí usměrní, poté se pomocí DC/DC měniče převede na požadovanou hodnotu. Energie se bude skladovat v dobíjitelné baterii a superkapacitoru, podle potřeby rychlosti výměny energie mezi zdrojem a spotřebičem. Na celý provoz bude dohlížet řídicí jednotka.



Obr. 54 Blokové schéma a) výstup generátoru b) usměrňovač c) DC/DC snižující převodník d) superkapacitor a dobíjitelná baterie e) ovládání výstupu f) zátěž g) řízení

12 Zhodnocení dosažených výsledků

Mimo testování v laboratoři jsme navrhovaný rezonanční obvod generátoru testovali na traktoru New Holland. Na rezonanční plochu generátoru jsme přilepili piezoelektrický měnič a celý generátor připevnili na konstrukci traktoru. Následně jsme si ověřovali velikost generovaného napětí. Vlastní frekvence našeho generátoru se blíží síťovému kmitočtu 50 Hz, tedy přibližně 3000 ot^{-1} . Přibližně při otáčkách motoru $n = 1500 \text{ ot}^{-1}$ jsme pomocí druhé harmonické velmi významně vybudili rezonanční obvod a pozorovali jsme výrazný nárůst napětí. Při měření amplitudově-frekvenční charakteristiky jsme pozorovali ohýbání skeletové křivky. Podobně jsme pozorovali změnu frekvence při připojené zátěži. S tímto problémem se tedy musí v budoucnu počítat již při návrhu, a správně navrhnout naladění generátoru. Zjistili jsme, že pro účely generování energie jsou vhodné piezokeramické plátky s menší tloušťkou, vzhledem k nižší hodnotě impedance.

13 Závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem piezoelektrického vibračního generátoru. Pomocí programu ANSYS 10.0 jsme navrhli mechanickou část generátoru a simulovali její chování. Také jsme pomocí tohoto programu simulovali chování piezokeramického materiálu ve spojení s mechanickou částí tak, abychom dosáhli vhodných vlastností piezoelektrického generátoru. Dále jsme při testování prokázali možnost generování elektrické energie na skutečné soustavě, kdy při testování vyplynula podmínka vhodného použití generátoru. Touto podmínkou je skutečnost, že vibrační generátor vyžaduje pro svůj optimální provoz stejnoměrné, frekvenčně stálé vibrace. Při volbě použití tohoto generátoru v mechatronické soustavě, však musíme generátor vhodně přizpůsobit zdroji vibrací. Jako zdroj vibrací mohou nejlépe posloužit případy, kdy elektromotory, případně spalovací motory běží v konstantním otáčkovém režimu. V těchto případech jsou dostupné konstantní vibrace, vhodné pro naladění generátoru. Námi testovaný generátor je opatřen plátkem piezokeramiky, který kryje pouze část povrchu nosníku. Dochází tak ke ztrátám vlivem vzniku lokálních koncentrací napětí. Pro dosažení plné účinnosti generátoru, je vhodné opatřit piezokeramikou celou plochu nosníku, případně využít obě strany. Celkové rozměry navrhovaného generátoru jsou uvedeny v tabulce 9.

Další rozvoj této technologie spočívá ve využití moderní elektroniky při řízení odebíraného výkonu a skladování získané energie. Také budoucí použití nové generace flexibilních piezoelektrických materiálů zřejmě povede ke zvýšení výkonu piezoelektrických generátorů při současném zmenšování rozměrů. Námi vytvořené generátory mohou sloužit jako výukové pomůcky, demonstrující použití piezoelektrických materiálů. V případě osazení elektronikou mohou sloužit jako zdroje elektrické energie.

Tabulka 9 Navržené rozměry generátoru

Prvek	Délka [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	
Nosník	40	1	20	10
Seismická hmota	10	20	20	
Základna	20	20	20	

14 Použitá literatura

- [1] *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. APC, Ltd. American piezo, [cit. 16.5.09], URL: < http://www.americanpiezo.com/products_services/book.html >
- [2] Půlpán, P., Erhart, J.: *Parametry piezoelektrických bimorfů*. Elektro, č.3, 2002, str.4 až 7, [cit. 16.5.09], URL: < www.odbornecasopisy.cz/download/el030204.pdf >
- [3] Ferroperm Piezoceramics, [online], [cit. 16.5.09], URL: < <http://www.ferroperm-piezo.com/> >
- [4] Erhart, J.: *Piezoelektrické chytré materiály pro elektrotechniku*. Elektro, č.11, 2002, str.4, až 7, [cit. 16.5.09], URL: < www.odbornecasopisy.cz/download/el110204.pdf >
- [5] Půlpán, P., Erhart, J.: *Parametry piezoelektrických unimorfů*. Elektro, č.1, 2005, str.4 až 6, [cit. 16.5.09], URL: < www.odbornecasopisy.cz/download/el010504.pdf >
- [6] Paradiso, J. A., Starner T.: *Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics*. Published by the IEEE CS and IEEE ComSoc. 2005 IEEE. 1536-1268/05
- [7] Hadaš, Z.: *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Disertace, VUT IUM
- [8] Beerstecher, R., Kuchler, G.: *ITS – The Tyre Information System of the Future*. ATZautotechnology ,01-02, 2008 Volume 8, str. 44 až 49, [cit. 16.5.09], URL: < <http://www.atzonline.com/index.php?do=show/site=a4e/sid=3795045744a0eb02ca2b0a171635719/alloc=3/id=7235> >
- [9] Keio University URL: < <http://www.keio.ac.jp/> >
- [10] Sustainable Dance Club ,[online], [cit. 16.5.09], URL: < <http://www.sustainabledanceclub.com/> >
- [11] Kevan, T.: *Shipboard Machine Monitoring for Predictive Maintenance*. [online], 1.2.2006, [cit.16.5.09], URL: < <http://www.sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=314716> >
- [12] Loch Ranoch, [online], [cit. 16.5.09], URL: < www.bp.com/liveassets/bp_internet/shipping/STAGING/home_assets/download_s_pdfs/l/loch_rannoch.pdf >
- [13] Ferroperm. [cit. 16.5.09], URL: < www.ferroperm-piezo.com/ >
- [14] Piezokeramika. [cit. 16.5.09], URL: < <http://www.piezo.com/> >

- [15] Noliac [cit. 16.5.09], URL: < <http://www.noliac.com> >
- [16] Piezoelectricity. Wikipedia [online] [cit. 16.5.09],
URL: < <http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity> >
- [17] Rudolf Bálek *ÚVOD DO AKUSTIKY – Ultrazvuk , Texty k přednáškám – 2007*,
Fakulta elektrotechnická, ČVUT
- [18] Anthony, F. V., Rafael B.: *Smart Piezoelectric Film Sensore for Structural Control*
IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL.
53, NO. 2, APRIL 2004
- [19] Malenovský, E.: Počítačové metody mechaniky v dynamice [online], [cit. 16.5.09],
URL:< http://www.umt.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/pmm_dyn/opora.html >
URL:< http://www.umt.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/pmm_dyn/down.html >
- [20] Šiňor, M.: *Modelování a vizualizace šíření elastických vln v obecném nehomogen-
ním prostředí*. [online], Habilitační práce, České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Praha 2005, [cit. 16.5.09],
URL: < <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~sinor/r/lisa/h2005/h-ms-html/node12.html> >
- [21] Pacák A., Matoušková K., Tajč L.: *POMĚRNÝ ÚTLUM JEDNODUCHÉHO TĚ-
LESA V PROUDU VZDUCHU*. Colloquium FLUID DYNAMICS 2007, Praha, 24. -
27. 10. 2007
- [22] Beran, R.: *Základy teorie lepení*. [online] ABC Lepidla [cit. 16.5.09],
URL:< <http://www.abclepidla.cz/> >
- [23] Brožek, M.: *Technologické vlastnosti sekundových lepidel*. [cit. 16.5.09],
URL:< <http://josef.posta.sweb.cz/KONF/Brozek.doc> >
- [24] Sterken, T, Altena, G., Fiorini, P.: *Characterisation of an Electrostatic Vibration
Harvester*. EDA Publishing/DTIP, 2007, ISBN: 978-2-35500-000-3
- [25] Minazara, E., Vasic, D., Costa, F.: *Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrati-
ons Energy to Supply Portable Device*. Université de Cergy-Pontoise, IUFM Paris, [cit.
16.5.09], URL: < www.icrepq.com/icrepq-08/344-minazara.pdf >
- [26] Agent-Mediated Electronic Commerce (AMEC): *AMEC-5 Lecture on Energy Har-
vesting from Piezoelectric Composites*. [cit. 16.5.09],
URL:< http://www2.mtec.or.th/th/seminar/amec5/images/Manuscript_pdf.pdf >
- [27] Pelamis wave power, [cit. 16.5.09], URL :< <http://www.pelamiswave.com/> >
- [28] Red Dot Awards URL, [online], [cit. 16.5.09], URL:< <http://www.red-dot.de/> >

- [29] Tenghsien, L, Chanhan, H., Chingfu, T.: *Design and Fabrication of Acoustic Wave Actuated Microgenerator for Portable Electronic Device*. Feng Chia University, Taiwan. ISBN: 978-2-35500-006-5
- [30] Dokumentace programu Ansys 10.0
- [31] Rosen, C. Z., Hiremath, B. V., Newnham, R. E. *Piezoelectricity*. 1992
- [32] Tailor, G. W.: *Piezoelectricity*. 1985
- [33] Farrar, C. R., Park, G.: *Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Network*. Los Alamos National Laboratory, February 2007, LA-14314-MS
- [34] Vibration Research Corporation, [online], [cit. 16.5.09],
URL: < <http://www.vibrationresearch.com/> >
- [35] Roundy, J. S.: *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*, Ph.D Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley CA, 2003.