



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Model piezoelektrického generátoru

Model of the piezoelectric generator

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika
Studijní obor: Aplikovaná elektronika
Vedoucí práce: Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Michal Lánský
Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lánský** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **435010**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Model piezoelektrického generátoru

Název bakalářské práce anglicky:

Model of the Piezoelectric Generator

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu poznatků řešení piezoelektrických generátorů elektrické energie s výstupními výkony řádově jednotky až desítky μW .
2. Navrhněte a realizujte jednoduchý model piezoelektrického generátoru, k realizaci struktury ve formě makromodelu zvolte vhodné dostupné materiály a mechanismus mechanické deformace, např. využitím vibrací nebo pohybu lidského těla.
3. Změňte a zhodnoťte dosažené elektrické parametry (výstupní napětí, výstupní proud, výstupní výkon v závislosti na zatěžovacím odporu a frekvenci mechanického buzení, stanovení optimálního zatěžovacího odporu pro největší výstupní výkon a proud, stanovení optimální budicí mechanické frekvence apod.), navrhněte možná vylepšení účinnosti systému
4. Navrhněte koncepci dalšího možného pokračování řešení práce.

Seznam doporučené literatury:

1. Neumann, P., Uhlíř, J.: Elektronické obvody a funkční bloky I, II, ČVUT.
2. Husák, M., Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem, DPS, 9-10/2013, str. 2, ISSN 1805-5044
3. Husák, M., Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem - II, DPS, 11-12/2013, str. 2, ISSN 1805-5044
4. Husák, M., Piezoelektrické mikro- a nanogenerátory, DPS, 1-2/2014, str. 2, ISSN 1805-5044

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Miroslav Husák CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato práce se zabývá získáváním elektrické energie pomocí piezomateriálů. V první části je popsána teorie piezoelektrického jevu a současný stav tohoto odvětví. Druhá část řeší praktický návrh piezo-generátoru z dostupných součástí na trhu. Následně je práce zakončena proměřením charakteristik daného generátoru.

Klíčová slova

Sběr energie z okolí, piezoelektrický jev, generátor, vibrace, piezokeramika, vibrační generátor, mechanická energie, získávání elektrické energie.

Abstract

This thesis is deals with the generation of electric energy using piezoelectric materials. The first part describes the theory of piezoelectric phenomenon and the current state of the branch. In the second part is solved the practical design of the piezoelectric generator from the available components on the market. Subsequently, work is completed by measuring the characteristics of the generator.

Keywords

Energy harvesting, piezoelectric effect, generator, vibration, piezoceramic, vibration generator, mechanical energy, energy scavenging.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci model piezoelektrického generátoru vypracoval samostatně a použil k tomu pouze literaturu, kterou uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám námitky proti půjčování, zveřejnění a dalšímu využití práce, pokud s tím bude souhlasit katedra mikroelektroniky.

V Praze dne

.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Miroslavu Husákovi za čas, který mi věnoval při vypracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, spolužákům a kamarádům za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod	9
1. Současný stav problému.....	10
1.1 Energy harvesting	10
1.1.1 Druhy okolní energie	10
1.2 Kinetická energie.....	11
1.2.1 Energie lidského těla.....	11
1.2.2 Energie průmyslové výroby.....	12
1.2.3 Energie transportu	13
1.2.4 Energie struktur budov	13
1.3 Vibrační generátory	14
1.4 Piezoelektřina	17
1.4.1 Historie piezoelektřiny.....	17
1.4.2 Piezoelektrický jev	18
1.4.3 Piezo-materiály	20
1.4.4 Materiálové vlastnosti.....	23
2. Návrh piezoelektrického generátoru.....	27
2.1 Vetknutý nosník.....	27
2.2 Piezo-keramika	28
2.3 Návrh obvodu	29
2.3.1 Funkce LTC3588-1.....	30
2.3.2 Výběr diskrétních součástek.....	30
2.4. Propojení.....	32
2.5. Návrh obvodu v programu Eagle.....	33
3. Dosažené výsledky	35
3.1 Testování piezo-keramiky	35
3.1.1 Výstupní napětí piezo-keramiky	35
3.1.3. Vnitřní odpor piezo-keramiky.....	37
3.2 Testování piezo-keramiky s obvodem.....	37
3.2.1 Výstupní napětí generátoru.....	37
Závěr.....	39
Seznam obrázků	40
Seznam zkratk a symbolů	41
Seznam tabulek	42
Literatura	43

Úvod

V současnosti je modernizace a miniaturizace elektronických zařízení již na vysoké úrovni. Nová zařízení jsou menší, odolnější a potřebují méně energie pro svůj provoz. A proto je dobré se zamyslet nad tím, zda neexistuje lepší způsob napájení než používání baterií. Většina baterií je tvořena chemickými látkami, které nejsou pro lidský organismus vhodné. Také nemají příliš dlouhou životnost a po určité době je nutná jejich výměna, která může být v určitých lokalitách velmi nákladná ne-li nemožná. Z těchto důvodů se rozvíjí zkoumání zdrojů obnovitelné energie.

Již poměrně dlouho se využívají solární, větrné a vodní elektrárny. Nyní se ovšem rozvíjí výzkum dalších obnovitelných zdrojů elektrické energie, které svou energii získávají z okolního prostředí. Velice perspektivní se jeví možnost využití vibrací ke generování elektrické energie. Tento princip využívá piezoelektrického materiálu jako měniče mezi mechanickou a elektrickou energií. I když energie produkovaná těmito zdroji není příliš velká, dá se pomocí ní napájet drobné sensory, či prodloužit životnost baterií.

Tato práce se zabývá popisem a tvorbou takového piezoelektrického generátoru z dostupných součástí na trhu.

1. Současný stav problému

1.1 Energy harvesting

Pod tímto anglickým termínem, dále jen EH, se rozumí získávání energie z okolního prostředí. V našem okolí se nachází spousta energetických zdrojů, které vznikají jako druhotný efekt některé primární činnosti, a často bývají opomíjeni. Patří mezi ně například světlo, teplo, zvuky, pohyb, vibrace. EH technologie se zaměřují na tyto často parazitní projevy a převádí je na elektrickou energii.

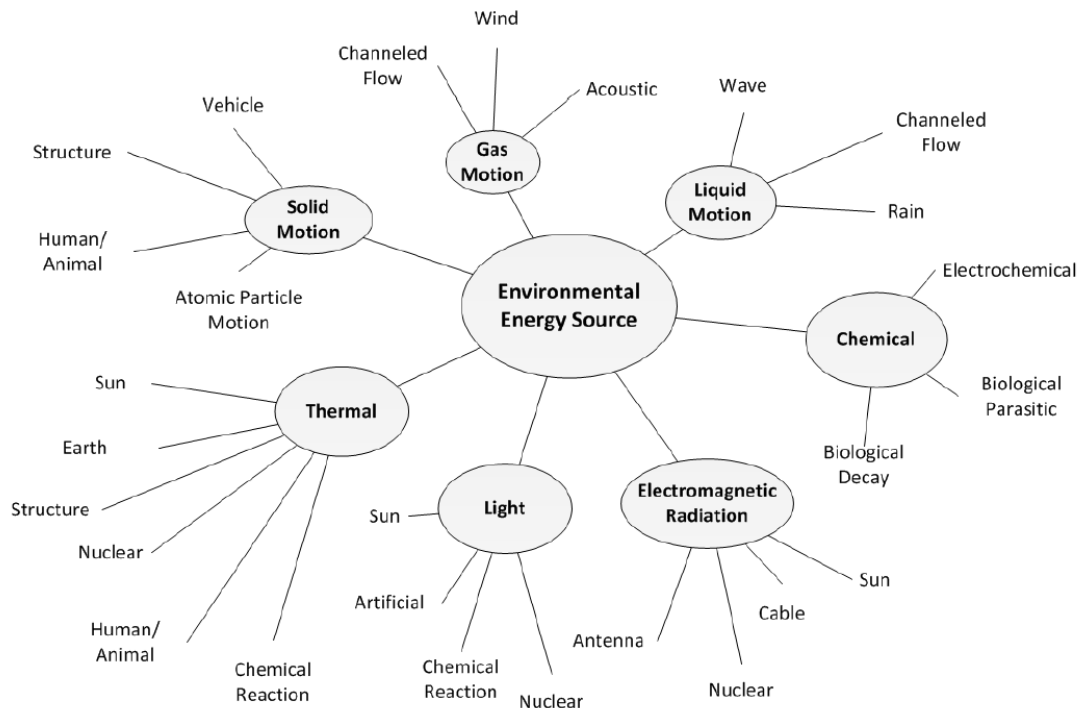
V dnešní době se na trhu zvyšuje poptávka po EH technologiích, a to z mnoha důvodů. Přínosem technopřístrojů je, že nepoškozují životní prostředí. Dále se dají užívat v různých, buď v miniaturní provedení jako MEMS technologie, nebo jako větší zařízení. Jejich výhodou je také to, že se dají kombinovat jednotlivé zdroje energie. V okolním prostředí většinou působí více zdrojů energie najednou. Největší nevýhodou EH zařízení je, že jejich výkon je závislý na okolním prostředí, tudíž jejich produkce nemusí být vždy kontinuální. Dále je problém že generátory, které využívají EH musejí mít specifickou konstrukci navrhnoutou přesně pro prostředí, ve kterém budou pracovat. To je především kvůli výstupní energii, která je konstrukcí generátoru ovlivněna.

EH technologie většinou neprodukují příliš mnoho energie, ale se zvyšujícím se stupněm integrace současné techniky a snižujícími se nároky na napájecí energii, se objevují nové možnosti jejich využití. Velice zajímavý a dosti zkoumaný, je potenciál nahradit současné baterie. Tím pádem by odpadl problém s výměnou baterií. Druhou možností jejich využití je napájení menších zařízení jako například autonomních systémů, bezdrátových senzorů, mobilních zařízení, snímačů a zařízení MEMS. V současné době se EH poměrně dosti rozvíjí i přes svou vyšší cenu na trhu. [1] [2] [3]

1.1.1 Druhy okolní energie

Pro danou aplikaci existuje spousta zdrojů energie, které se dají použít. Je vhodné vybrat tu, která v daném prostředí dokáže produkovat nejvíce energie. Mezi zdroje energie patří: tepelná, světelná, vodní, větrná, chemická a vibrační. V literatuře se vyskytuje mnoho různých dělení. Já jsem si vybral rozdělení podle obrázku 1 a dále uvedl příklady těch nejrozšířenějších. Ve své práci využívám mechanickou energii, a proto se jí budu nadále věnovat podrobněji. [1] [2]

- Kinetická energie - Otřesy a pohyby vyvolané různými stroji nebo lidmi.
- Tepelná energie - Teplo promrhané v pecích, topných těles a energie z tření.
- Světelná energie - Především sluneční záření, nebo světlo z místností v domech.
- Elektromagnetická e. - Energie z tlumivek, cívek a transformátorů.
- Pohybová energie - Především vlivem proudění větru a vody.
- Chemická energie - Chemické a biologické zdroje.



Obr. 1 Schéma energetických zdrojů v okolním prostředí [1]

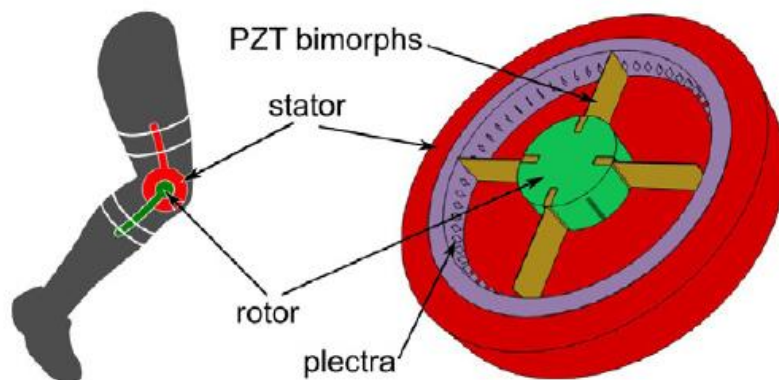
1.2 Kinetická energie

V mnoha prostředích dochází k produkování kinetické energie, která je druhotným projevem některé jiné činnosti a je považována za parazitní. Tutu energii lze zachytit a dále ji využívat. Jednotlivé zdroje kinetické energie se dají rozdělit do několika kategorií. Jedná se o energii z lidského těla, průmyslové výroby, transportu a ze struktur budov. [3]

1.2.1 Energie lidského těla

„Pohyb lidského těla je charakterizován velkou amplitudou pohybu na nízké frekvenci a dopadem na patu nohy při chůzi.“ [3] Průměrný člověk s váhou 68 kg vyprodukuje 67 W energie na patě boty. Během Evropského výzkumného projektu Vibration Energy Scavenging VIBES, proběhlo měření zrychlení jednotlivých částí lidského těla. Pokus probíhal na člověku, který běžel rychlostí 5 km/h. Snímali se ruce, kotník, hrud', zápěstí, a hlava. Zjistilo se, že člověk dosahuje největšího zrychlení na kotníku ve směru běhu a to 100 m/s^2 s frekvencí 1.2 Hz. Frekvence ostatních částí těla byla téměř konstantní. [3]

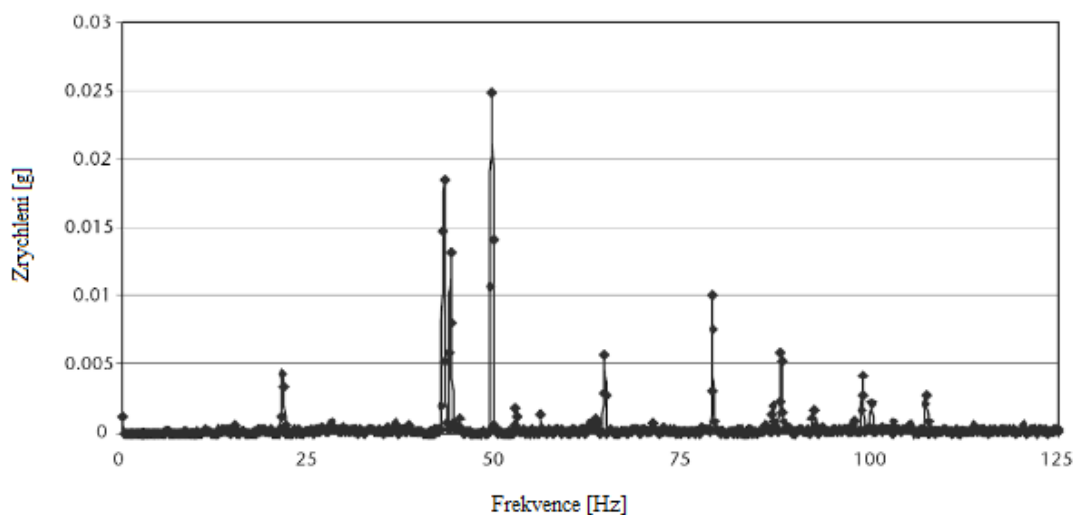
O generátoru připojeném ke kolennímu kloubu se píše v [4]. Zařízení využívá statorovou a rotorovou část, jak je vyznačeno na obrázku 2. Rotor s piezo-keramickými destičkami se vlivem chůze otáčí a způsobuje narážení keramiky do zářezů statoru. Tím dochází k deformaci keramiky a produkování energie.



Obr. 2 Kolenní generátor využívající lidský pohyb [4]

1.2.2 Energie průmyslové výroby

V průmyslových centrech a manufakturách se v současné době využívají pokročilá zařízení a stroje, které při svém provozu vytvářejí vibrace. Na obrázku 3 je frekvenční spektrum kompresoru napájeného ze sítě. Na obrázku je vidět razantní vrchol při 50 Hz. Velikost vibrací je v grafu znázorněna zrychlením, které je vztažené na g, přičemž $1 \text{ g} = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Tato vibrace by vyvolala pohyb o vzdálenosti $2,5 \mu\text{m}$. To je velice málo v porovnání s pohybem lidského těla, ale i tak není zanedbatelná. Nejlepší vibrace generují zařízení napájené ze sítě, protože lze využívat frekvence vyšších harmonických. Pro zařízení, které nejsou napájeny ze sítě jsou frekvence vibrací v rozmezí 20-200 Hz. [3]



Obr. 3 Frekvenční spektrum kompresoru napájeného ze sítě. [3]

1.2.3 Energie transportu

Do této skupiny se řadí především dopravní prostředky. Jedná se o auta, vlaky, letadla a lodě. Frekvence těchto prostředků mohou být docela různé. Velice důležité je umístění vibračního generátoru na vozidle a rychlost, kterou se vozidlo pohybuje.

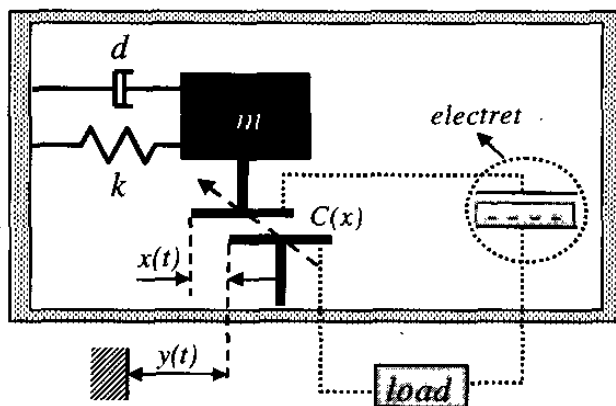
1.2.4 Energie struktur budov

Tato skupina získává energii z pohybu budov a mostů. Jedná se o vibrace vyvolané například: seismickou aktivitou, projíždějícím metrem, pohybem výtahu nebo narážením větru. Tyto vibrace jsou velice malé ve frekvenčním rozsahu 10-12,5 Hz. Mosty vytvářejí vibrace podle konstrukce, počtu projíždějících aut.

1.3 Vibrační generátory

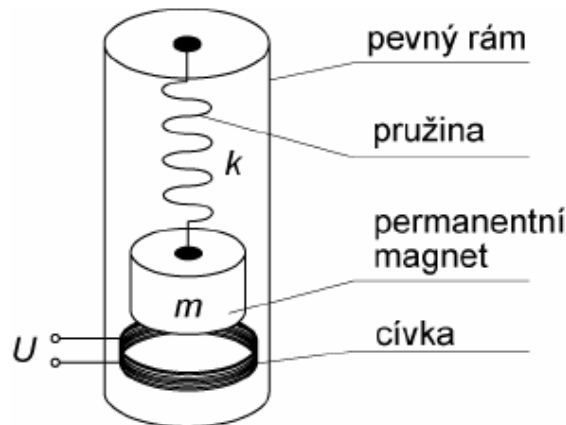
Pro získávání energie z vibrací je potřeba převést mechanickou energii na elektrickou. K této činnosti slouží zařízení, kterému se říká generátor, převodník či měnič. Důležitou vlastností vibračních generátorů je to, že maximální výkon dodávají jen tehdy, pokud je vlastní frekvence generátoru naladěna na frekvenci budících vibrací. Podle principu přeměny energie se v současné době využívají 3 druhy generátorů. Patří mezi ně elektrostatický, elektromagnetický a v neposlední řadě piezoelektrický.

Elektrostatický generátor ke své činnosti využívá dielektrický kondenzátor s pohyblivou a fixní elektrodou. Mezi těmito deskami se nachází buďto vzduch nebo vakuum. K pohyblivé elektrodě je připojena seismická hmota, která ji rozkmitává, a tím způsobuje změnu kapacity. Polarizace dielektrika je zajištěna jako elektret, a to fixním dodáním náboje do dielektrického materiálu. Elektrostatický generátor je vhodný pro aplikaci v MEMS technologiích. [3] [5]



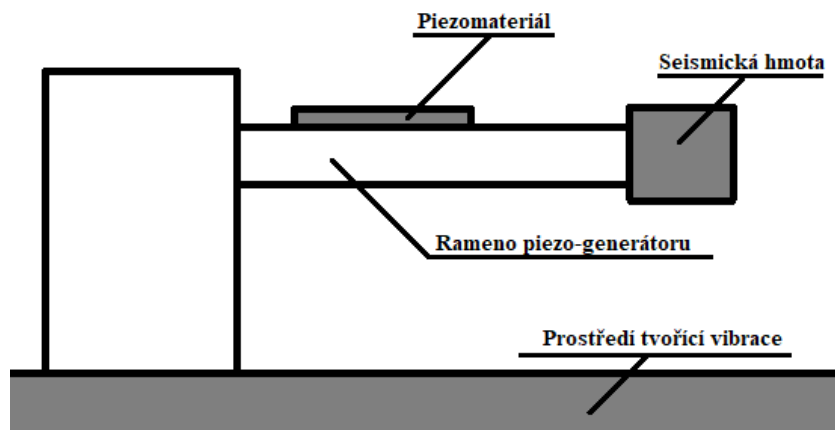
Obr. 4 Schéma elektrostatického generátoru [5]

Elektromagnetický generátor ke své činnosti využívá Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Generátor se obvykle skládá z permanentního magnetu a cívky. „Pokud je vodič umístěn v magnetickém poli pohybujícího se permanentního magnetu, indukuje se v něm napětí. Konstrukce generátoru může být i opačná, kdy se vodič pohybuje vůči magnetickému poli permanentního magnetu. První zmíněná konstrukce generátoru má tu výhodu, že cívka je pevně spojena s rámem generátoru a odpadá problémy s připojením pohybujícího se vodiče k elektrickému obvodu.“ [6]



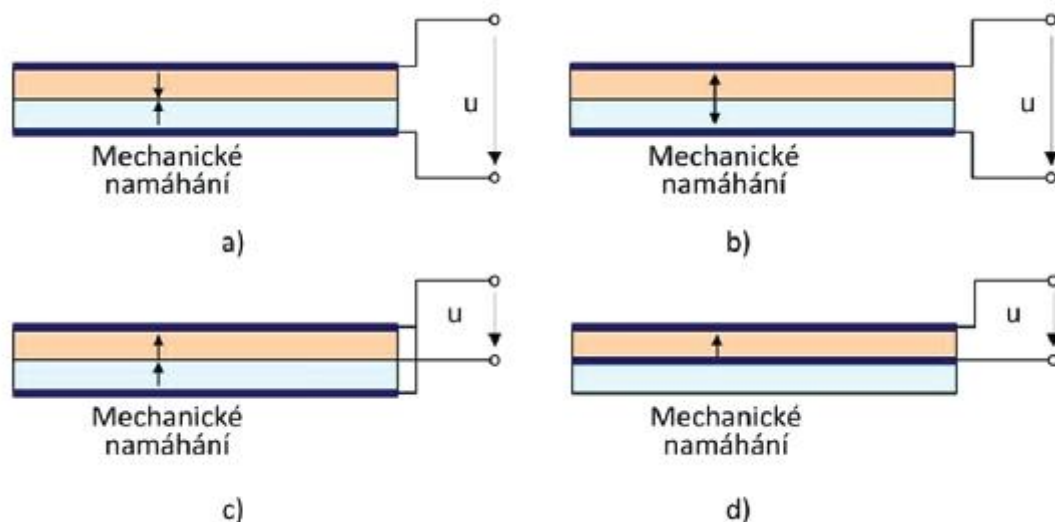
Obr. 5 Schéma elektromagnetického generátoru [6]

Piezoelektrický generátor ke své činnosti využívá aktivní materiál, který je ovlivněn piezoelektrickým jevem. Při mechanickém namáhání piezo-materiálu dochází k tvorbě elektrické energie. Piezoelektrické materiály se v současné době komerčně využívají v senzorech, aktuátorech, a energy harvesting aplikacích. Tyto generátory mají tři různé možnosti provedení. První typ se využívá u akcelerometrů. Generátor obsahuje seismickou hmotu, která je vlivem vibrací rozpořbována. Tím dochází k periodickému stlačování a roztahování piezoelementu, který následně produkuje elektrický náboj. Druhým typem je generátor používající piezo-materiál ve tvaru válečků. Namáhání materiálu je prováděno torzními kmity. Třetím a posledním typem je generátor se strukturou vetknutého nosníku. Nosníky tvoří několik vrstev piezo-materiálu a ty jsou namáhané ohybem. K podpoře ohybu se využívá seismická hmota umístěná na konci nosníku. Tento generátor pracuje v módu d_{31} , který je dále popsán v kapitole 1.4.4. Piezo-generátory produkují vyšší napětí, ale menší měrný výkon. Tyto generátory mají výhodu, že dokáží pocítit i velmi nízké hladiny vibrací. [3] [6]



Obr. 6 Schéma nosníkového piezoelektrického generátoru

Nosníkové generátory lze dále specifikovat podle počtu piezoelektrických vrstev. Struktura s jednou vrstvou se nazývá unimorfní, s dvěma vrstvami bimorfní a s více polymorfní. Pokud se propojí výstupy více vrstev, nastane zvýšení výstupního napětí, ale i zvýšení výstupní impedance. Škodlivý vliv impedance lze omezit paralelním zapojením. [7]



Obr. 7 Elektrické připojení k vetknutému nosníku s jednou (unimorfní) a se dvěma vrstvami (bimorfní), a), b) sériové bimorfní struktury, c) paralelní spojení bimorfní struktury, d) zapojení unimorfní struktury [8]

Tab. 1 Porovnání principů vibračních generátorů [6]

Princip	Charakteristika
Elektrostatický	<ul style="list-style-type: none"> + Velký potenciál pro integraci do MEMS struktur (frekvence vibrací několik kHz). - Vyžaduje samostatný zdroj napětí pro inicializaci přeměny energie. - Nízký výkon. - Použití mechanického dorazu.
Piezoelektrický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný pro zdroj energie pro frekvence vibrací větší než 100 Hz až několik kHz. + Vysoké generované napětí. - Vysoký vnitřní odpor, malý proud.
Elektromagnetický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný zdroj energie pro frekvence do 50 až 100 Hz. + Dostatečné generované napětí a výkon při rozměrově neomezeném generátoru. - Obecně nízké napětí.

1.4 Piezoelektrina

1.4.1 Historie piezoelektriny

Přímý piezoelektrický jev objevili bratři Jacques a Pierr Curieové v roce 1880. O rok později experimentálně prokázali i nepřímý piezoelektrický jev, který předpověděl G. Lippmann. Svůj název si však piezoelektrina získala až o několik let později podle řeckého slova *piezō*, v překladu tlačit. Bratři pozorovali tvorbu elektrického náboje působením tlaku na krystaly určitých nerostů. Zpočátku využívaly turmalín, a poté také křemen. Při svých pokusech zjistili, že vzniklý elektrický náboj je přímo úměrný působícímu tlaku, velikosti plochy, a že nezávisí na velikosti krystalu. [9]

Piezoelektrický jev byl považován za velký objev, i když se v té době spíše prosazoval elektromagnetický jev. Ten se pozvolna začínal využívat v praxi. Piezoelektrickým jevem se v následujících letech zabývali pouze vědci v laboratořích. První teorii piezo-elektriny, která se opírá o zákony termodynamiky, formuloval Waldemar Voigt v roce 1890. Pro popis piezomateriálů vytvořil tenzorový počet. První přístroj využívající piezoelektrinu byl elektrometr. Další používaný přístroj vytvořil za první světové války Paul Langevin. Byl to ultrazvukový sonar využívající piezoelektrický princip.

Zkoumání piezoelektriny pokračovalo několik desítek let dále a roku 1921 byla Josephem Valaskem objevena feroelektrina na piezoelektrickém krystalu Seignetteovy soli. Tento krystal v elektrickém poli vykazoval hysterezní smyčku. [9] [10]



Obr. 8 Pierre Curie (1859-1906) [10]

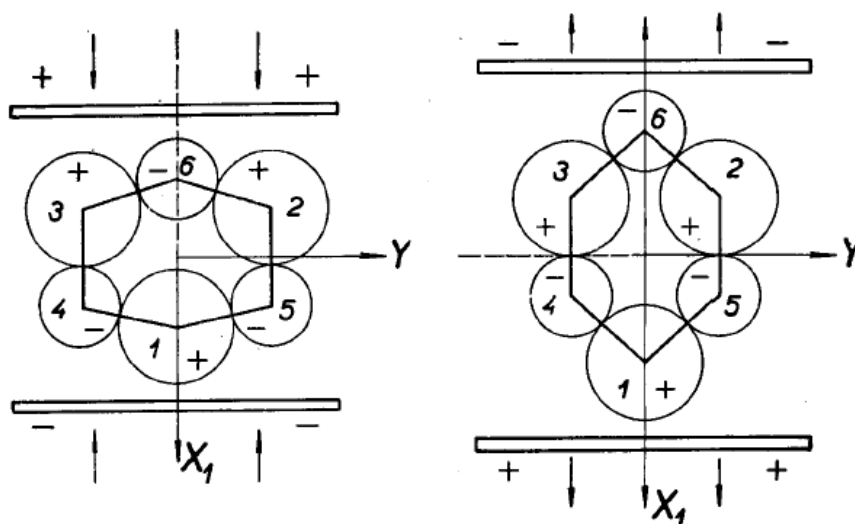


Obr. 9 Paul-Jacques Curie (1859-1906) [10]

1.4.2 Piezoelektrický jev

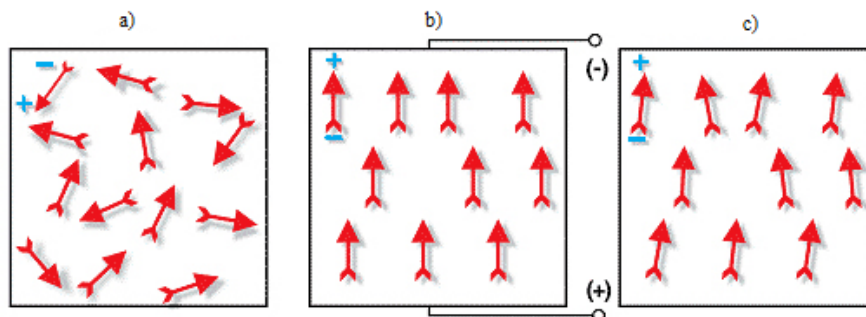
Piezomateriály jsou zvláštním typem dielektrik, které jsou při normálním stavu elektricky neutrální. Krystalová mřížka je tvořena pravidelně umístěnými kladnými a zápornými ionty, které se vzájemně vyrušují. Vlivem mechanického namáhání se krystal deformuje, a tím dochází ke změně poloh jednotlivých iontů a ke vzniku dipólů. V tomto okamžiku je již vnitřní nábojová rovnováha narušena a na povrchu materiálu se tvoří náboj. Na jedné straně materiálu se objeví kladný náboj a na opačné straně náboj záporný. Tento proces lze pojmenovat jako polarizace. Při působení polarizace se vytváří elektrické pole, které ovlivňuje uspořádání volných nosičů náboje. Po připojení elektrod a vodičů k piezo-materiálu, začne skrz ně proudit tok nosičů náboje. Tento tok bude probíhat tak dlouho, dokud nenastane neutralizace polarizace. Jakmile přestane působit na piezo-materiál mechanický tlak, polarizace vyprchá, a materiál se vrátí do původního elektricky neutrálního stavu. [9] [11]

Piezo-materiál můžeme stlačovat nebo také natahovat. Při natahování má výsledný elektrický náboj opačnou polaritu než při stlačování. To je způsobeno pohybem opačných iontů.



Obr. 10 Vznik nábojů při stlačení (vlevo) a při natáhnutí (vpravo) [10]

Vedle přímého piezoelektrického jevu existuje také obrácený jev, tak zvaný nepřímý piezoelektrický jev. Působením elektrického napětí na piezo-element dochází ke vzniku elektrického pole, které následně posouvá volné ionty. Ty se uspořádají ve směru daného elektrického pole a tím dojde k deformaci piezo-materiálu. Tato deformace je silnější u obráceného piezoelektrického jevu než u přímého. Po přerušení napájecího napětí lze u materiálů zaznamenat zbytkovou polarizaci. Při deformaci krystalické mřížky vlivem vnější síly nastává také změna měrného elektrického odporu. Tomuto jevu se říká piezorezistivní jev. [11]



Obr. 11 Polarizace piezoelektrického materiálu. Náhodná polarizace dipólů a), polarizace určena elektrickým polem b), zbytková polarizace po odebrání elektrického pole. [11]

Důležitým rysem obou piezoelektrických jevů je závislost na směru přiloženého napětí, či směru působení elektrického pole. Podle těchto kritérií se jevy dále dělí na podélný a příčný. **Podélný piezoelektrický jev** nastává, působí-li rovnoměrně rozložená síla F_x ve směru osy x na plochu piezomateriálu S_x . Vektor polarizace P působí rovnoběžně s osou x . Vektor polarizace, náboj vznikající na stranách krystalu a napětí na elektrodách se vypočítají pomocí rovnic 1.1–1.3. Z uvedených rovnic vyplývá, že při podélném namáhání je velikost náboje na elektrodách závislá pouze na působícím tlaku, nikoli na geometrických rozměrech piezo-materiálu. [7]

$$P = k_p p_x(t) = k_p \frac{F_x(t)}{S_x} \quad (1.1)$$

$$q_x(t) = P(t)S_x = k_p F_x(t) \quad (1.2)$$

$$u_x(t) = \frac{q_x(t)}{C} = \frac{k_p}{C} F_x(t) = k_u F_x(t) \quad (1.3)$$

Příčný piezoelektrický jev způsobuje síla F_y působící ve směru osy y na plochu piezo-materiálu S_y . Vektor polarizace P působí rovnoběžně s osou x , avšak v opačném směru. Vektor polarizace, náboj na stranách krystalu a napětí na elektrodách se u příčného jevu vypočítají pomocí rovnic 1.4–1.6. Z uvedených rovnic vyplývá, že při příčném namáhání je velikost náboje na elektrodách závislá jak na působícím tlaku, tak i na geometrických rozměrech piezo-materiálu. [7]

$$P = k_p p_y(t) = -k_p \frac{F_y(t)}{S_y} \quad (1.4)$$

$$q_x(t) = P(t)S_x = -k_p \frac{F_y(t)S_x}{S_y} = -k_p \frac{b}{a} F_y(t) \quad (1.5)$$

$$u_x(t) = \frac{q_x(t)}{C} = -\frac{k_p b}{C a} F_y(t) = k_u \frac{b}{a} F_y(t) \quad (1.6)$$

k_p piezoelektrická konstanta

k_u napěťová citlivost piezoelektrického elementu

1.4.3 Piezo-materiály

Materiálů, které mají piezoelektrické vlastnosti existuje mnoho. Základní dělení je podle struktury, ze které jsou tvořeny. Piezoelektrické materiály se používají v různých aplikacích jako například senzory, oscilátory, aktuátory, regulační technika.

Krystalické piezo-materiály

V počátcích zkoumání piezoelektriny se využívaly pouze přírodní látky, ovšem s postupem času se objevil nedostatek těchto látek, a tak se začaly vyrábět umělé krystaly. Prvním používaným piezo-krystalem byl křemen SiO_2 , který je stále využíván především díky své jednoduché struktuře a chemické odolnosti. Křemen je základem převodníků mechanických veličin a měřicích zařízení.

V 60. letech 20. století byly objeveny krystaly lithium niobát LiNbO_3 a lithium tantalát LiTaO_3 . Ty vykazují vysokou hodnotu Curieovy teploty. Používají se především v optice pro aplikace s lasery a jako materiály pro rezonátory. [9]

Mezi krystaly s perovskitovou strukturou patří titaničitan olovnatý PbTiO_3 , titaničitan barnatý BaTiO_3 . Krystaly využívané pro tenkovrstvé formy jsou především galium arsenid GaAs , galium fosfid GaP a sulfid zinečnatý ZnS . [9]

Keramické piezo-materiály

Keramika je polykrystalická piezoelektrická látka, která patří do skupiny feroelektrických materiálů. Uměle vyrobené keramiky jsou tvořeny obrovským množstvím mikroskopických zrn. Tyto zrna jsou zpočátku orientovány náhodně. Jejich směr určuje polarizace, která se provádí silným elektrickým polem. Bez provedení polarizace by materiál zůstal izotropní a neměl žádné piezoelektrické vlastnosti.



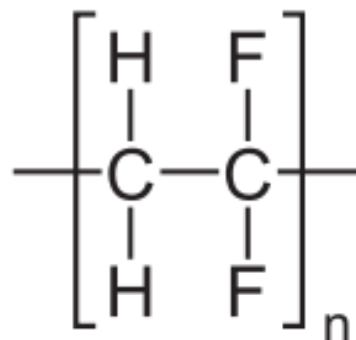
Obr. 12 Různé tvary piezo-keramik [12]

První používanou keramikou byl roztok BaTiO₃, měl své uplatnění na konci druhé světové války. Používal se především v aplikacích zabývajících se ultrazvukovými převodníky. V polovině 20. století, se rozšířilo používání titaničitanu olovnatého PbTiO₃, a zirkoničitanu olovnatého PbZrO₃, kterému se také říká PZT. V současné době je právě PZT nejvíce užívanou keramikou. Podle příměsí se keramika PZT dále dělí na tvrdou a měkkou.

Keramiky se hojně využívají díky mnoha výhodám např.: nízká cena v porovnání s krystaly, dostupnost, snadné tvarování. Na trhu se využívají především plátové, diskové, koulové a trubicové keramiky. Různé piezo-keramiky jsou vidět na obrázku č.12. Na druhou stranu mají keramiky i své nevýhody. Jejich pracovní oblast je silně limitována Curieho teplotou a celkově nemají příliš velkou teplotní stabilitu. [9]

Polymery

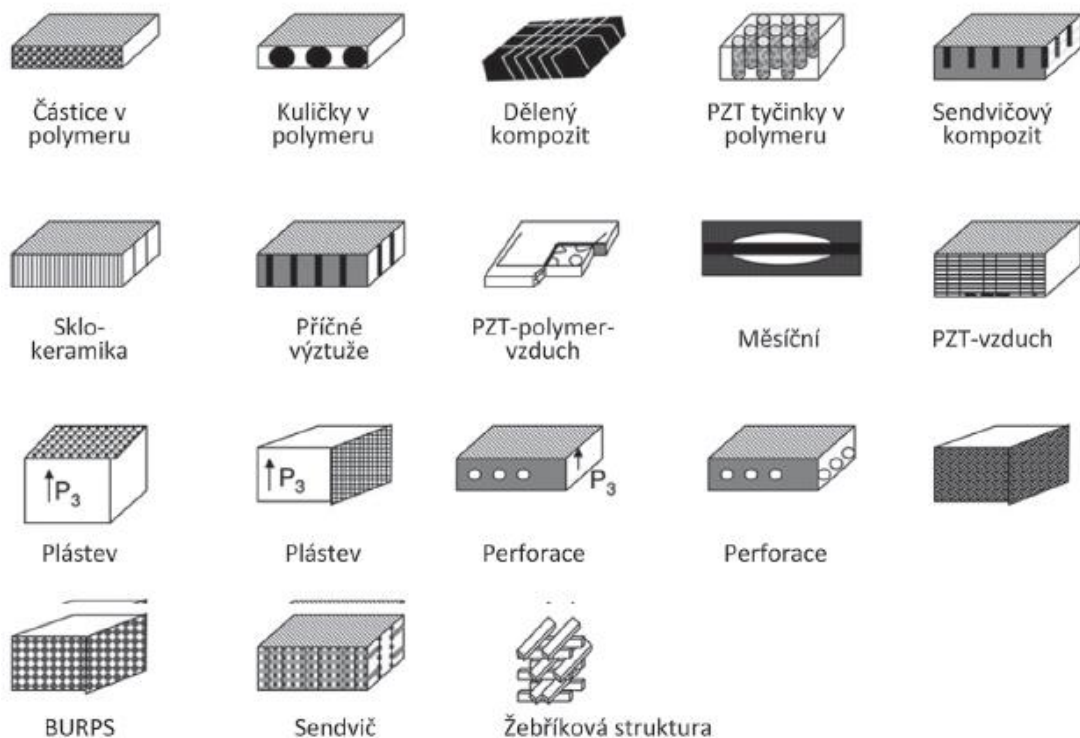
V roce 1969 bylo objeveno, že také polymerní látky prokazují piezoelektrické vlastnosti. Onou testovanou látkou byl Polyvinylidenefluorid PVDF. K piezoelektrickému jevu ve polymerních látkách dochází přesunem molekul flóru a vodíku na uhlíkovém řetězci. Tím se v molekule začne hromadit potenciál, který následně vytváří elektrický náboj. Dalšími piezoelektrickými polymery jsou polyvinylchlorid PVC, polyvinylfluorid PVF. Výhoda piezoelektrických polymerů spočívá v dobré tvarovatelnosti, snadné výrobě a nízké ceně. Generují však malý náboj, a proto se nehodí pro EH aplikace. Polymery se používají například jako membrány pro mikrofony. [13]



Obr. 13 Chemický vzorec PVDF [14]

Kompozity

Kompozity jsou materiály tvořené kombinací různých materiálů. Jedna složka tvoří matici a ostatní materiály ztužují a zpevňují daný kompozit. „Kompozitní piezoelektrické materiály jsou vytvořeny kombinací piezoelektrické keramiky a polymerových piezoelektrických materiálů.“ [7] Existuje spousta různých kompozitních struktur lišící se podle vnitřního spojení jednotlivých vrstev. Některé jsou uvedené na obrázku 13. Mezi nejrozšířenější struktury patří PZT tyčinky a vláknové kompozity. [7]



Obr. 14 Příklady typických piezoelektrických kompozitních struktur [7]

Relaxory

Na rozdíl od ostatních materiálů, relaxory neztrácí piezoelektrické vlastnosti při určité teplotě, ale v nějakém rozmezí. Kromě relativní necitlivosti na teplotu, vykazují jednotlivé krystaly některých relaxorů velký elektromechanický vazební koeficient. Jedná se o hodnoty větší než 0,9. V porovnání s piezo-keramikou PZT, která dosahuje hodnot 0,7 – 0,8, se jedná o velký rozdíl. Díky těmto vlastnostem se relaxory používají pro pohony, měniče a další aplikace. [11]

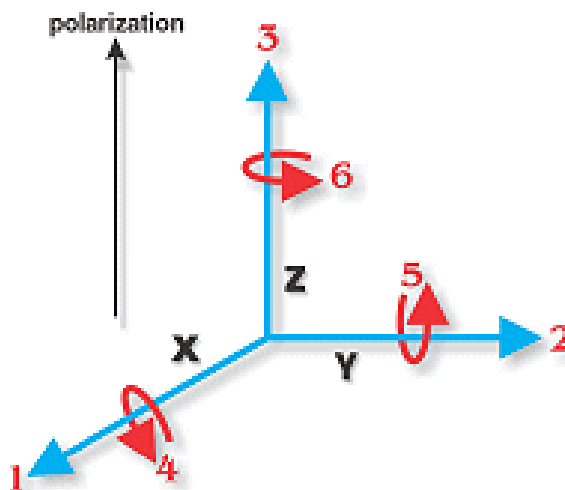
1.4.4 Materiálové vlastnosti

Piezelektrický jev popisují následující rovnice, které uvádím ve tvaru užívaném v zahraniční literatuře.

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1.4)$$

$$S = s \cdot T \quad (1.5)$$

Piezelektrické materiály jsou anizotropního charakteru. To znamená, že materiál má v jednotlivých osách odlišné parametry, a proto je nutné uvést vždy danou vlastnost ve všech směrech. K popisu jednotlivých vlastností slouží piezelektrické konstanty, které využívají dvou indexů. Tyto indexy nám dávají informaci buď o orientaci piezo-elementu, směru měření nebo směru působení mechanického namáhání. Indexy nabývají hodnot podle jednotlivých os kartézského souřadnicového systému. [11]



Obr. 15 Vyznačená orientace pomocí os [11]

Piezelektrická nábojová konstanta d_{ij}

Tato konstanta má dvě možné interpretace podle toho, zda se jedná o přímý či nepřímý piezelektrický jev. Při přímém jevu nám dává informaci o tom, jak velký náboj se vygeneruje vzhledem k působícímu mechanickému napětí. Při nepřímém jevu, nám dává informaci o tom, jak velké bude mechanické přetvoření způsobené daným elektrickým polem. Index i určuje směr polarizace generované materiálem, nebo směr vnějšího elektrického pole. Index j určuje osu působícího mechanického napětí nebo způsobené přetvoření. [11]

$$d = \frac{\text{generovaný náboj}}{\text{mechanické napětí}} = \frac{\text{mechanické přetvoření}}{\text{intenzita elektrického pole}} \quad (1.6)$$

$$d = k\sqrt{\varepsilon^T s^E} \text{ [mV}^{-1}\text{] nebo [CN}^{-1}\text{]} \quad (1.7)$$

d_{33} - udává velikost generovaného náboje polarizovaného ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 3. Nebo velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 3.

d_{31} - udává velikost generovaného náboje polarizovaného ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 1. Nebo velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

d_{15} - udává velikost generovaného náboje polarizovaného ve směru 1 působením mechanického napětí ve směru 2. Nebo velikost přetvoření ve směru 2 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

Piezelektrická napěťová konstanta g_{ij}

Stejně jako nábojová má i napěťová konstanta dvě platné definice podle toho, zda se jedná o přímý či nepřímý piezelektrický jev. Vyjadřuje buď velikost intenzity elektrického pole vygenerovaného působením mechanického napětí, nebo mechanické přetvoření způsobené vnějším elektrickým polem. Index i ukazuje směr polarizace generované materiálem nebo směr polarizace vnějšího elektrického pole. Index j vyznačuje osu působícího mechanického napětí nebo způsobeného přetvoření. [11]

$$g = \frac{\text{intenzita elektrického pole}}{\text{mechanické napětí}} = \frac{\text{mechanické přetvoření}}{\text{intenzita elektrického pole}} \quad (1.8)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \text{ [Vm} \cdot \text{N}^{-1}\text{]} \quad (1.9)$$

g_{33} - udává velikost elektrického pole orientované ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 3. Nebo velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 3.

g_{31} - udává velikost elektrického pole orientované ve směru 3 působením mechanického napětí ve směru 1. Nebo velikost přetvoření ve směru 3 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

g_{15} - udává velikost elektrického pole orientované ve směru 1 působením mechanického napětí ve směru 2. Nebo velikost přetvoření ve směru 2 vyvolané přiloženým elektrickým polem ve směru 1.

Permitivita ε_{ij}

Permitivita je dielektrická konstanta, která se značí symbolem ε . Tato konstanta popisuje změnu dielektrika při působení elektrického pole. Permitivita je vyjádřena součinem relativní permitivity ε_r a permitivity vakua ε_0 .

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1.10)$$

U piezo-materiálů se ovšem permitivita dále dělí na ε^T a ε^S . Pokud je piezo-materiál konstantně vystaven mechanickému napětí, používá se ε^T . Pokud na daný materiál působí konstantní přetvoření, uvádí se ε^S . Tyto konstanty také využívají indexů. [11]

ε_{11}^T - udává velikost permitivity při působení elektrického pole ve směru 1, při působení konstantního mechanického napětí.

ε_{33}^S - udává velikost permitivity při působení elektrického pole ve směru 3, při konstantním mechanickém přetvoření.

Youngův modul pružnosti Y

Je to veličina popisující pružnost materiálu. Značí se Y a jedná se o poměr mechanického napětí působícího na materiál, ku vzniklé deformaci.

$$Y = \frac{\text{mechanické napětí}}{\text{mechanická deformace}} \quad [\text{Pa}] \quad (1.11)$$

Elektromechanický vazební koeficient k_{ij}

Tento koeficient popisuje efektivitu převodu mezi mechanickou energií a elektrickou energií, pro daný materiál v určitém směru. Koeficient je definován v následující rovnici 1.12.

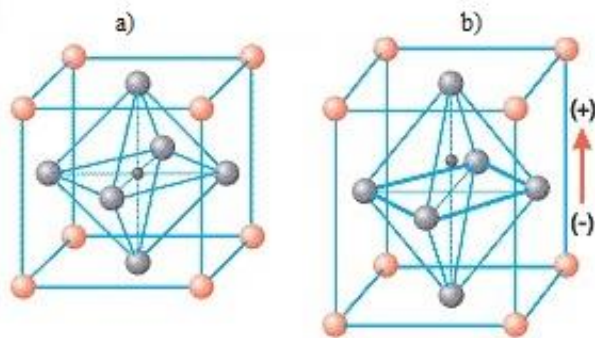
$$k_{ij} = \sqrt{\frac{W_i^e}{W_j^m}} \quad (1.12)$$

- W_i^e – výstupní elektrická energie v ose i [J]
- W_j^m – vstupní mechanická energie v ose j [J]

Index i u konstanty k_{ij} popisuje směr uspořádání elektrod a index j vyznačuje směr, ve kterém mechanická energie působí, nebo vzniká.

Curieova teplota T_C

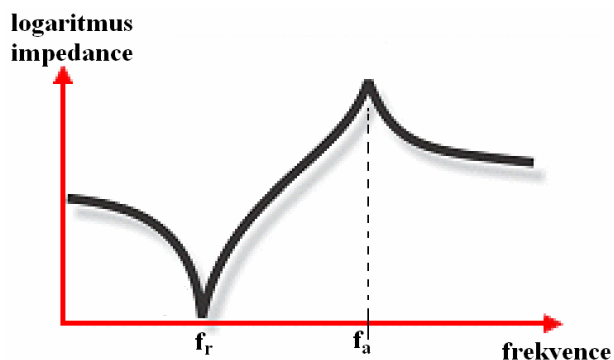
Velice důležitým parametrem piezoelektrických materiálů je Curieova teplota. Piezo-materiály mají nesymetrickou strukturu, která je podstatná pro piezoelektrické jevy. Po překročení Curieovy teploty dojde ke změně krystalické struktury na symetrickou. Vlivem toho materiál ztrácí své piezoelektrické vlastnosti. Tento proces je vidět na obrázku 16.



Obr. 16 Vliv Curieovy teploty na krystalovou strukturu piezo-materiálu, a) struktura nad Curieovou teplotou, b) struktura pod Curieovou teplotou [11]

Rezonanční a antirezonanční frekvence

Piezoelektrické materiály jsou také velmi závislé na frekvenci. Tento parametr hodně ovlivňuje účinnost přeměny elektrické a mechanické energie. Každý piezo-materiál má svou rezonanční frekvenci. To je frekvence, při které je impedance piezoelektrického prvku nejmenší. Při této frekvenci je mechanické kmitání nejbližší elektrickému a prvek produkuje největší energii. Opačný stav, kdy impedance nabývá největších hodnot, nastává při antirezonanční frekvenci. Rezonanční frekvence f_r a antirezonanční frekvence f_a slouží k výpočtu vazebního koeficientu.



Obr. 17 Průběh impedance v závislosti na frekvenci [11]

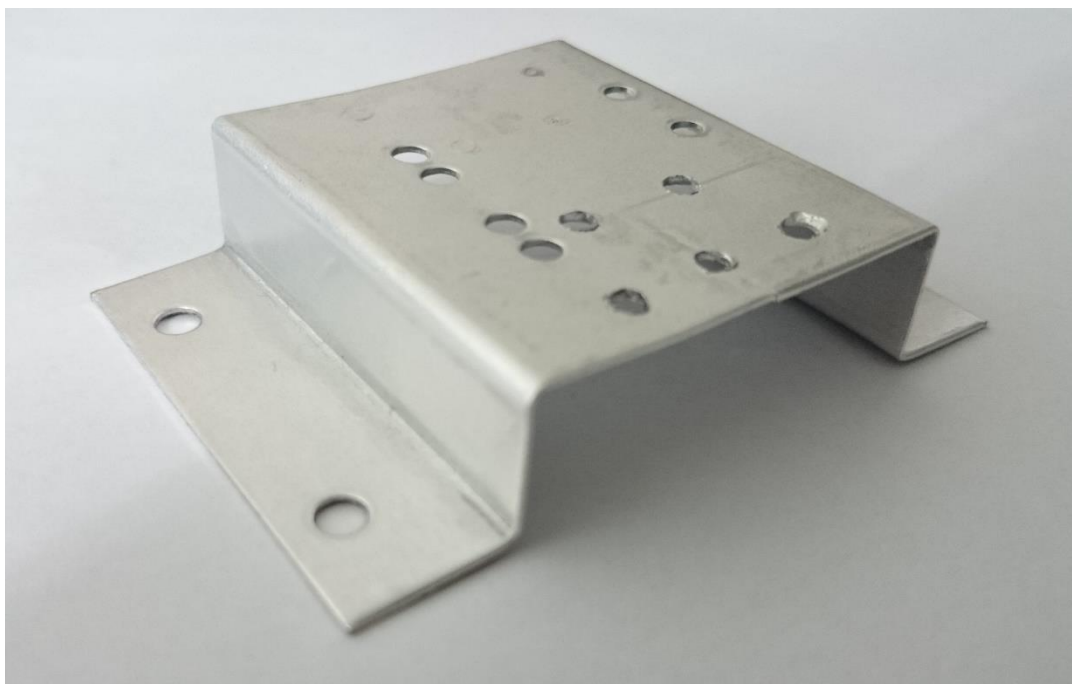
2. Návrh piezoelektrického generátoru

V této práci jsem si dal za cíl, sestrojít makromodel piezoelektrického generátoru z komerčně dostupných součástek na trhu. Základním požadavkem byla jednoduchost a schopnost zařízení generovat výstupní výkony v řádech jednotek až desítek μW . Svůj návrh modelu jsem rozdělil do tří částí, na kterých jsem postupně pracoval.

2.1 Vetknutý nosník

Prvním krokem při návrhu bylo zvolení správného principu namáhání piezo-elementu. Já zvolil strukturu vetknutého nosníku, který jako svůj zdroj mechanické energie využívá vibrace z okolí. Převod vibrací na elektrickou energii je u této metody efektivnější než u ostatních. Při analýze trhu, jsem také zjistil, že tento princip je nejrozšířenější. Řada firem nabízí své piezo-elementy uzpůsobené přesně pro tuto metodu.

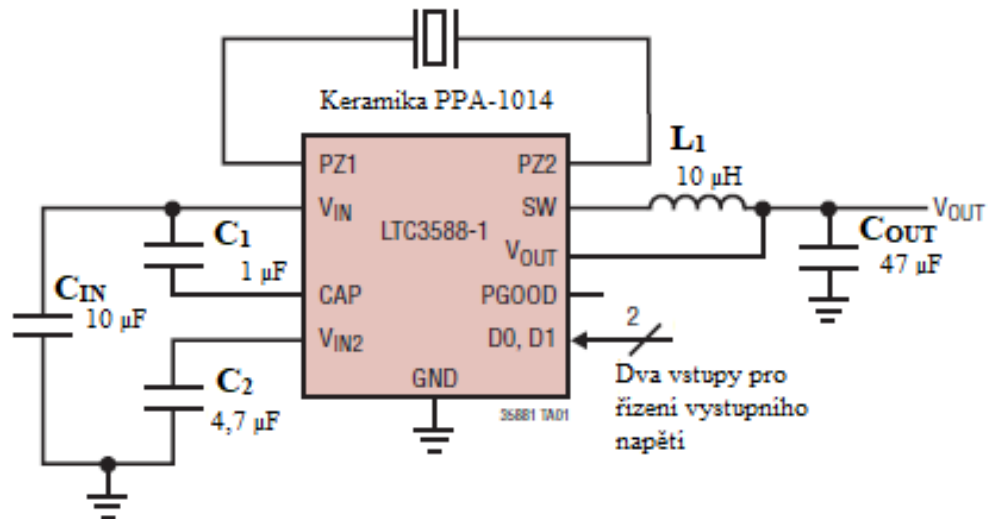
Svůj nosník jsem vytvořil z kusu hliněného plechu. Vytvaroval jsem ho do příslušného tvaru a velikosti, aby se poté dalo pohodlně měřit. Na vrchní části bylo vyvrtáno několik děr pro připojení piezo-keramiky pomocí šroubů. Nevýhodou tohoto nosníku je především jeho materiál. Hliník je poměrně slušný vodič, proto je důležité, aby elektrody keramiky nebyly v přímém kontaktu s konstrukcí nosníku. Nakonec jsem musel nalakovat celý nosník, abych ho izoloval. Hotový můstek je na obrázku 18.



Obr. 18 Fotografie vytvořeného vetknutého hliníkového nosníku

2.3.1 Funkce LTC3588-1

Na vstupy PZ1 a PZ2 je přiveden střídavý proud z piezo-keramiky. Následně proud prochází skrz speciální nízko ztrátový můstkový usměrňovač. Energie se dočasně uchovává ve vstupním kondenzátoru, který je připojen ke svorce V_{IN} . Také se zde nachází ochranná dioda v závěrném směru spojená se zemí. Pokud se na vstupu objeví 20 V, dojde k jejímu proražení a uzemnění celého obvodu. Výstup usměrňovače je dále spojen se vstupem DC/DC měniče a s blokem UVLO. Ten neustále kontroluje napětí na vstupním kondenzátoru C_{IN} a podle jeho hodnoty zapíná či vypíná funkci spínaného DC/DC měniče. Pokud je tato funkce v provozu, dochází k pulsnímu přenosu energie ze vstupního kondenzátoru na svorku SW, kde se nachází LC filtr. Řídící logika měniče nakonec podle napětí na výstupním kondenzátoru mění frekvenci spínání a tím snižuje energetickou spotřebu celého integrovaného obvodu. Napěťové výstupy se dají nastavit podle logických hodnot na vstupech D1 a D0. [16]



Obr. 21 Schéma zapojení LTC3588 [16]

2.3.2 Výběr diskretních součástek

Pro správné fungování napájecího čipu je nutné zvolit okolní součástky a jejich zapojení. Jedná se především o vstupní a výstupní kondenzátor a o cívku výstupního filtru.

Velikost výstupního a vstupního kondenzátoru se může u každého generátoru lišit. Jejich hodnota se vybírá podle toho, kolik energie mají uchovat. Dále je důležitým parametrem jmenovité napětí stejnosměrného proudu. Je vhodné vybrat větší napětí, aby nedošlo k poškození obvodu.

Vstupní kondenzátor C_{IN} by měl být dimenzován pro uložení dostatečného množství energie. Já jsem vybral aluminiový elektrolytický kondenzátor o velikosti 10 μF od firmy United Chemi-Noc.

Výstupní kondenzátor C_{OUT} spolu se zátěžovým proudem ovlivňují především dobu, po kterou je DC/DC měnič ve fázi spánku. Doba spánku se snižuje s rostoucím proudem zátěže nebo se snižující se velikostí kondenzátoru. Doba spánku je určena podle rovnice 1. Ta však platí

$$t_s = C_{OUT} \frac{24mV}{I_{Zátěže}} \quad (2.1)$$

pro kondenzátory o velikostech větších než 100 μF . Pokud nastavíme kondenzátor na velikost 10 μF , může dojít ke zpoždění doby spánku a zvýšení zvlnění výstupního napětí. Kondenzátor menší než 10 μF se již kvůli těmto důvodům nepoužívá. Je v hodné tento kondenzátor dimenzovat větší, jelikož se v něm ukládá veškerá energie. Já jsem ve svém modelu použil keramický kondenzátor 12066D476MAT2A o velikosti 47 μF od firmy AVX.

Kondenzátory C_1 a C_2 mají výrobci předem definovanou velikost a zapojení pro správnou funkčnost napájecího zdroje. Kondenzátor C_1 má velikost 1 μF a je připojen mezi svorky V_{IN} a CAP. Kondenzátor C_2 má velikost 4,7 μF a je připojen mezi svorkou V_{IN2} a zemí. Jako C_1 jsem zvolil keramický kondenzátor VJ1206Y105KCXAT od firmy Vishay a pro C_2 jsem vybral keramický kondenzátor 0402ZD475MAT2A od firmy AVX.

Cívka L_1 se nachází na výstupu obvodu a spolu s kondenzátorem C_{out} tvoří LC filtr. Mnou vybraný napájecí obvod je uzpůsobený pro cívku v rozsahu 10 až 20 μH , přičemž doporučená hodnota je 10 μH . Cívky s větší indukčností mají výhody ve vysoko napěťových aplikacích, kde redukuje ztráty. Důležitým faktorem ovlivňující funkčnost cívky je stejnosměrný odpor, který má vliv na efektivitu. Já si zvolil cívku EPL3015-103MLB s hodnotou 10 μH od firmy Coilcraft.

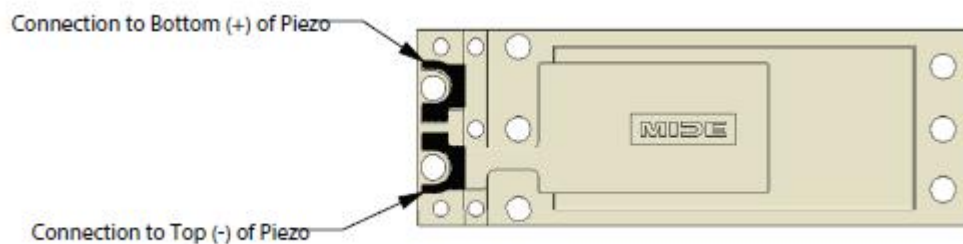
Spínače SW – Jak již bylo řečeno v kapitole 2.3.1, LTC3588 má dva své vstupy D1 a D0 pomocí nichž se nastavuje výchozí napětí. Lze si vybrat ze 4 variant podle logických úrovní těchto dvou vstupů. Jejich kombinace spolu s výstupním napětím a klidovými proudy jsou uvedeny v tabulce. Jako logickou úroveň 1 používám výstup V_{IN2} a logickou úroveň 0 beru ze společné země. Přepínání mezi těmito dvěma stavy zajišťuje jednopólový posuvný spínač SS-12F30-G od firmy Wealth Metal.

Tab. 2 Výběr výstupního napětí pomocí logických hodnot [16]

D0	D1	\underline{U}_{out}	I klidový
logické hodnoty		[V]	[nA]
0	0	1,8	44
0	1	2,5	62
1	0	3,3	81
1	1	3,6	89

2.4. Propojení

Důležitým krokem při návrhu bylo vybrat vhodné propojení nosníku s plošným spojem. Cílem bylo použít nějaký propojovací prvek, který by netlumil kmity keramiky. Piezoměnič má dvě elektrody, na kterých se shromažďuje elektrický proud z piezo-keramiky. Jednou možností bylo přivést na tyto elektrody vodič a zalepit ho pomocí epoxidu. Tato varianta se mi jevila příliš trvalá a znemožňovala by možné modifikace přípravku. Navíc by lepidlo mohlo mít negativní vliv na přenos energie. Jak je vidět na obrázku 22, elektrody produktů PPA jsou příhodně umístěny poblíž dvou otvorů. Já se rozhodl použít externí elektrody s číselným označením 165295 od firmy TE Connectivity. Jedná se o prstencové elektrody, které jsem upevnil pomocí šroubů. Ke každé této elektrodě jsem připevnil vodič.



Obr. 22 Umístění elektrod na produktech PPA [15]



Obr. 23 Elektroda 165295 od firmy TE Connectivity [17]

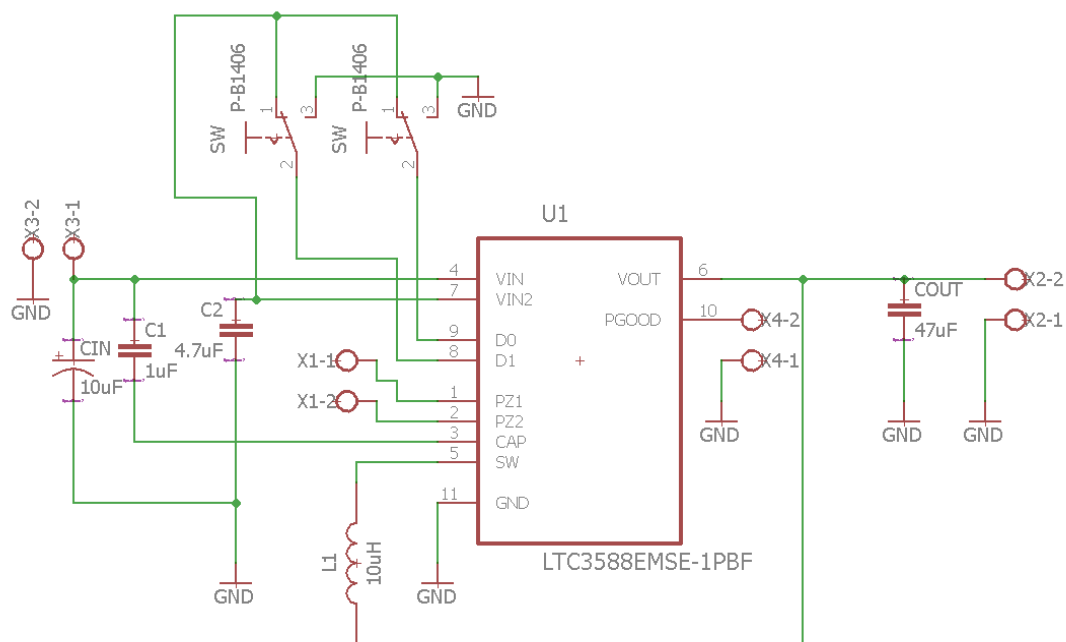
Na druhém konci vodiče se nachází již plošný spoj s napájecím obvodem. Připojení vodiče k DPS je pomocí dvoukontaktní šroubovacích svorkovnice. Ve svém obvodu využívám 4 tyto svorkovnice, postupně rozmístěny na vstupu a výstupu obvodu. Dále u vstupního kondenzátoru a u výstupu svorky PGOOD.

2.5. Návrh obvodu v programu Eagle

Svůj návrh obvodu jsem sestavoval v programu Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor). Jedná se o program pro návrh a editaci elektrických schémat a plošných spojů. Zvolil jsem tuto možnost, jelikož jsem doposud v žádném nepracoval v tomto programu jsem našel rozsáhlou knihovnu součástek.

Schéma obvodu

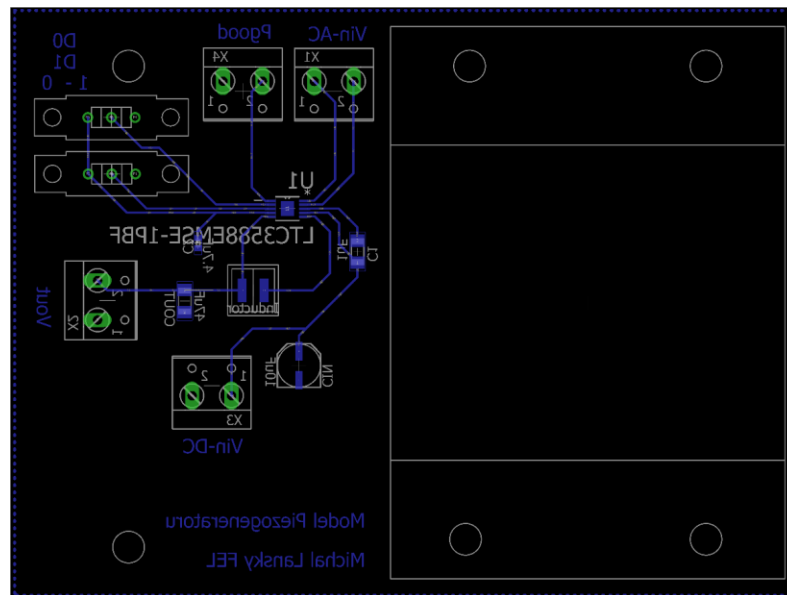
V programu Eagle jsem nejprve vytvořil svůj obvod ve schématickém editoru. Pro každou součástku, kterou jsem uvedl v kapitole 2.3, jsem vybral schématickou značku a umístil ji do obvodu. Přitom se vyskytl problém, že v knihovnách Eagle nebyly symboly a obaly pro všechny součástky, a tak bylo potřeba je dokreslit. Všechny názvy součástek vyznačené ve schématu se shodují s označením ve zmíněné kapitole 2.3.



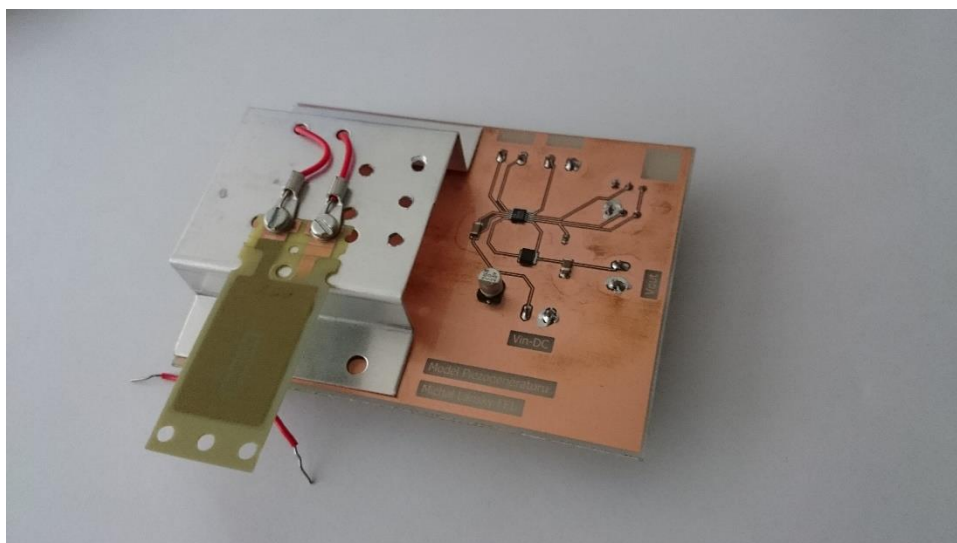
Obr. 24 Schéma mého obvodu ve schématickém editoru programu Eagle

PCB

Poté co jsem vytvořil schéma mého obvodu, následoval editor plošných spojů PCB. Eagle si z knihoven našel rozměry jednotlivých součástek, které jsem vybral pro můj obvod, a nahrál je do editoru PCB. Nastavil jsem si velikost pracovní plochy podle zakoupené cuprexitové desky a následně rozmístil všechny součástky. Půlku desky jsem vyčlenil pro můj nosník, jak je vidět na obrázku 25. Následně jsem zrcadlil všechny součástky, abych mohl vyrobit jen jednovrstvý plošný spoj, a nakonec jsem přes celou vrstvu vytvořil polygon a nastavil ho jako zem.



Obr. 25 Schéma mého plošného spoje ve PCB editoru programu Eagle



Obr. 26 Fotografie vytvořeného piezoelektrického generátoru

3. Dosažené výsledky

Tato kapitola se zabývá praktickým proměřením mého vytvořeného piezoelektrického generátoru. Měření jsem rozdělil na dvě části. V první části měřím pouze piezo-keramiku bez mého plošného spoje. V druhé části proměřuji plošný spoj spolu s piezo-keramikou. Původním plánem bylo při měření využít přímého piezoelektrického jevu. Budil bych můj piezo-element pomocí třesadla, které mi mělo být zapůjčeno na katedře mikroelektroniky. Pomocí třesadla bych vytvářel vibrace o předem definované frekvenci. Chtěl jsem zjistit rezonanční frekvenci, tím bych docílil maximální výstupní energie pro můj obvod. Tento plán se nepodařilo zrealizovat kvůli absenci zmíněného třesadla, které bylo dlouhodobě vypůjčeno. Jako náhrada za třesadlo mi bylo zapůjčeno malé vibrační zařízení napájené ze střídavého zdroje. Bohužel toto zařízení dokázalo vytvářet vibrace v omezené frekvenční oblasti, tudíž jsem nebyl schopen vyhledat rezonanční frekvenci piezo-keramiky.

3.1 Testování piezo-keramiky

Nejprve jsem se rozhodl proměřit parametry piezo-keramiky, abych ověřil, že vůbec dokáže produkovat dostatek energie pro napájení mého plošného spoje. Mezi parametry piezo-keramiky jsem zařadil výstupní napětí, vnitřní odpor a frekvenci vlastního kmitu při produkci maximální energie.

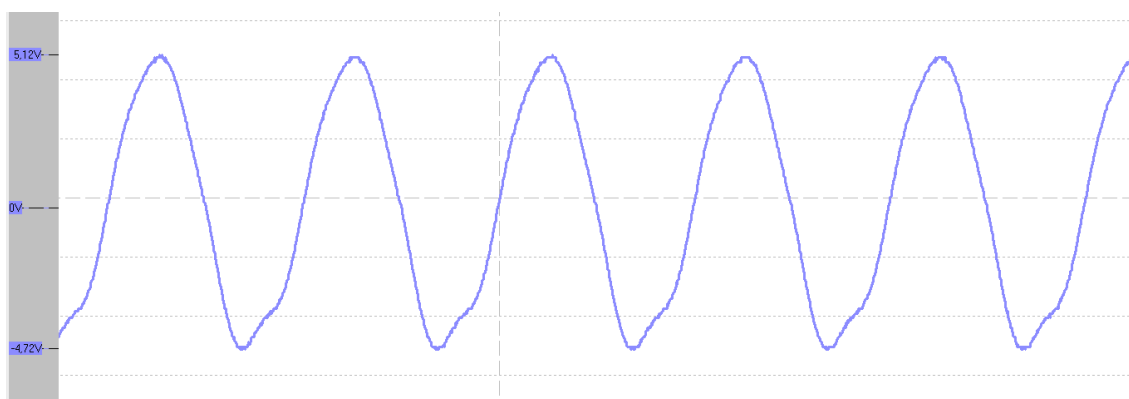
3.1.1 Výstupní napětí piezo-keramiky

K měření jsem použil zařízení zmíněné v úvodu 3. kapitoly, které můžeme vidět na obrázku 27. Připevnil jsem k němu piezo-keramiku a na střídavém generátoru nastavil frekvenci, na které přístroj vibroval. To způsobilo namáhání piezo-keramiky a následné generování střídavého napětí. Při prvním měření osciloskop nezaznamenal žádný výrazný nárůst napětí. Problémem bylo to, že se keramika spíše pohybovala, nežli ohýbala. Při druhém měření jsem na volný konec keramiky připevnil závaží o hmotnosti 10 g, abych napomohl ohybu. Při tomto pokusu již docházelo k produkování střídavého napětí 5 V, které je vidět na obrázku 26. Z tohoto průběhu lze také vypočítat frekvenci vlastních kmitů. Ta se vypočítá podle vzorce 3.1. Maximální amplitudu střídavého napětí na výstupu jsem zaznamenal při zátěži o velikosti 47 kΩ.

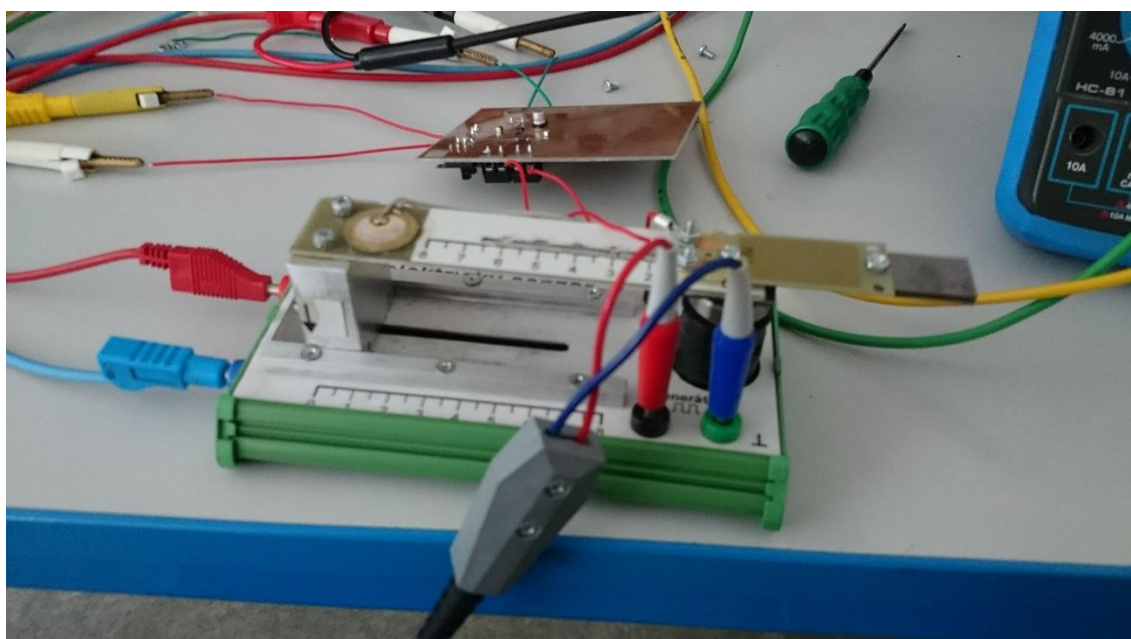
$$f_g = \frac{1}{T} = \frac{1}{52,8 \cdot 10^{-9}} = 18,9 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

f_g frekvence vlastních kmitů [Hz]

T perioda kmitu piezo-generátoru [s]



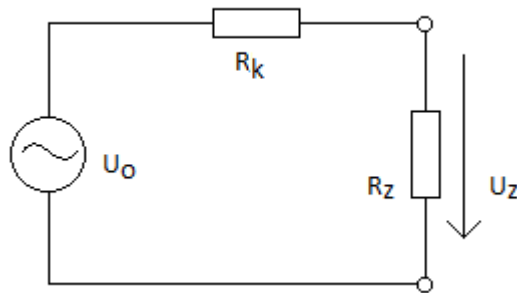
Obr. 27 Průběh napětí na výstupu keramiky



Obr. 28 Fotografie keramiky se zapůjčeným vibračním přístrojem

3.1.3. Vnitřní odpor piezo-keramiky

Vnitřní odpor jsem měřil podle zapojení na obrázku 28. Změřil jsem napětí generátoru na prázdko a následně se zátěží. Vnitřní odpor jsem pak spočítal podle rovnice 3.2.



Obr. 29 Obvod pro měření vnitřního odporu

$$R_k = \frac{U_0 - U_z}{I} = \frac{4,8 - 1,25}{2,66 \cdot 10^{-5}} = 133,48 \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

R_k odpor piezokeramiky [Ω]
R_z odpor zátěže [Ω]
U_0 napětí generátoru naprázdno [V]
U_z napětí na zátěži [V]
I proud [A]

3.2 Testování piezo-keramiky s obvodem

Další krokem bylo provést měření celého generátoru, tudíž keramiky spolu s navrženým plošným spojem. Cílem měření bylo změřit výstupní napětí a závislost proudu na zátěži a určit generovaný výkon.

3.2.1 Výstupní napětí generátoru

Toto měření jsem měřil stejně jako v kapitole 3.1.1, akorát jsem napětí z piezo-keramiky odváděl do mého navrženého obvodu pro sběr energie. Zcela okamžitě se na vstupním kondenzátoru začalo hromadit napětí a během pár vteřin byl výstupní kondenzátor nabit na očekávanou úroveň. Otestoval jsem všechny 4 výstupní napěťové hodnoty, které uvádím v kapitole 2.3.2. Toto měření probíhalo nejprve bez zátěže, při kterém se podařilo nabít výstupní kondenzátor na požadované hodnoty. Tím jsem ověřil funkčnost spínačů a schopnost LTC-3588 regulovat výstupní napětí.

Dalším krokem bylo otestovat zatížitelnost výstupu. Cílem bylo zjistit, jaký výkon dokáže generátor produkovat a zda dokáže udržet stabilně požadované výstupní napětí. Nejprve jsem si vybral několik odporů, pomocí kterých jsem měřil zatěžovací proud a následně dopočítal výkon. Pro každý rezistor jsem přepínal spínačem napěťové výstupy a testoval, zda dokáže udržet napětí. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3 a 4. Měření jsem začal provádět s odpory většími než

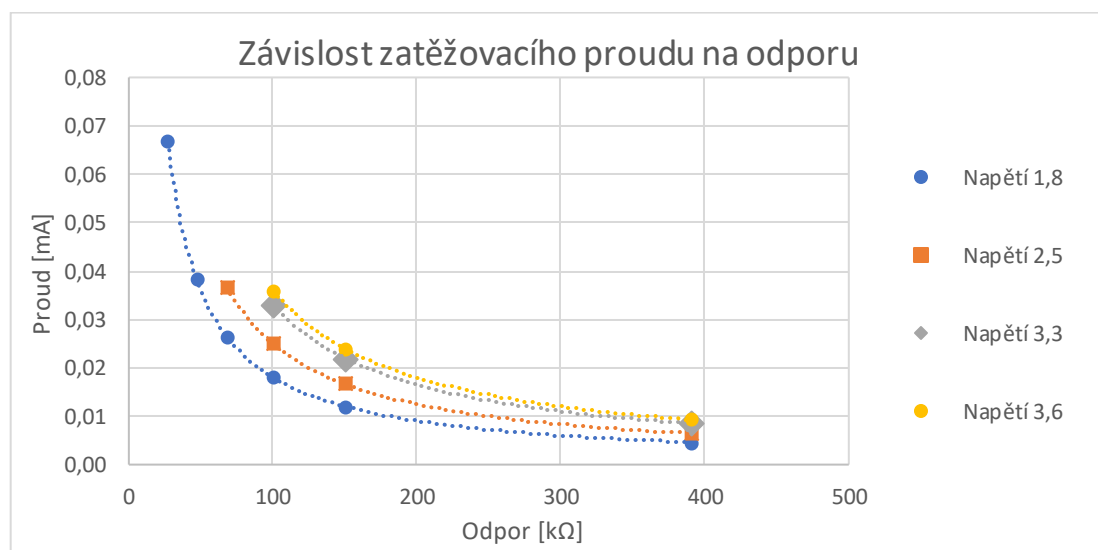
300k Ω . Při této hodnotě kondenzátor dokázal držet své výstupní napětí a dodávat přitom proud do zátěže. Při měření s odporem 68 k Ω již nedokázal kondenzátor udržet výstupní napětí 3,3 a 3,6. Napětí klesalo a rostlo v rozmezí 1,9-2,5 V. To vedlo i k poklesu zatěžovacího proudu na hodnotu příliš malou. Pro malé odpory byl proud téměř neměřitelný, a proto jsem v tabulce uvedl často zaokrouhlenou hodnotu proudu 0 mA. Při hodnotě 47 k Ω již fungoval jen napěťový výstup 1,8 V. Kondenzátor zajišťoval tuto hodnotu napětí až k zátěži o velikosti 27 k Ω . Jak vyplývá z tabulky 3, čím větší byla zátěž, tím lépe dokázal kondenzátor udržet své napětí, ale naopak docházelo k menšímu průtoku proudu. Největší zatěžovací proud byl naměřen při výstupním napětí 1,8 V na odporu 27 k Ω . Při tomto měření bylo generováno 120 μ W. Nejvíce energie bylo generováno při měření 100 k Ω při napětí 3,6 V, kdy se vygenerovalo 129,6 μ W výkonu. Lze předpokládat, že pokud by měření proběhlo při rezonanční frekvenci a byla by propočítána optimální hmotnostní zátěž pro nosník, generátor by produkoval ještě více energie.

Tab. 3 Naměřené hodnoty zatěžovacího proudu

	U_{out} [V]			
	1,8	2,5	3,3	3,6
$Odpor$ [k Ω]	$Proud$ [mA]			
19	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,07	0,00	0,00	0,00
47	0,04	0,00	0,00	0,00
68	0,03	0,04	0,00	0,00
100	0,02	0,03	0,03	0,04
150	0,01	0,02	0,02	0,02
390	0,00	0,01	0,01	0,01

Tab. 4 Vypočtený výkon závislý na zatěžovacím proudu

	U_{out} [V]			
	1,8	2,5	3,3	3,6
$Odpor$ [k Ω]	$Výkon$ [μ W]			
19	0,00	0,00	0,00	0,00
27	120,00	0,00	0,00	0,00
47	68,94	0,00	0,00	0,00
68	47,65	91,91	0,00	0,00
100	32,40	62,50	108,90	129,60
150	21,60	41,67	72,60	86,40
390	8,31	16,03	27,92	33,23



Obr. 30 Závislost zatěžovacího proudu na odporu

Závěr

Bakalářská práce se zabývá studiem piezoelektrického jevu a návrhem piezoelektrického generátoru. Cílem bylo vytvořit model, který by byl schopen generovat výstupní výkony v řádu desítek μW . Nejprve proběhl schématický návrh obvodu v programu Eagle a následně byl zkonstruován a proměřen. Finální produkt je tvořen piezo-keramikou, nosníkem a obvodem pro efektivní sběr a uložení energie.

Měření prokázalo, že je generátor schopen produkovat požadované množství energie. Při zátěži $100\text{ k}\Omega$ a výstupním napětí $3,6\text{ V}$ produkoval výkon o velikost až $129,6\text{ }\mu\text{W}$. Potřebné vibrace k produkování takovéto energie jsou ovšem velké a je třeba pro praktické využití najít správný zdroj vibrací. Bohužel jeden z hlavních parametrů rezonanční frekvence nebyla změřena kvůli absenci měřicího přístroje.

Zavedení piezo-generátorů v budoucnosti je určitě možné. Generátor využitelný v praxi by musel být navrhnut přesně na míru podle množství potřebné energie a podle vibrací v daném prostředí. Následně by se podle těchto dvou parametrů vytvořila piezo-keramika a obvod na míru.

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma energetických zdrojů v okolním prostředí [1]	11
Obr. 2 Kolenní generátor využívající lidský pohyb [4]	12
Obr. 3 Frekvenční spektrum kompresoru napájeného ze sítě. [3]	12
Obr. 4 Schéma elektrostatického generátoru [5]	14
Obr. 5 Schéma elektromagnetického generátoru [6]	15
Obr. 6 Schéma nosíkového piezoelektrického generátoru	15
Obr. 7 Elektrické připojení k vetknutému nosníku s jednou (unimorfní) a se dvěma vrstvami (bimorfní), a), b) sériové bimorfní struktury, c) paralelní spojení bimorfní struktury, d) zapojení unimorfní struktury [8]	16
Obr. 8 Pierre Curie (1859-1906) [10]	17
Obr. 9 Paul-Jacques Curie (1859-1906) [10]	17
Obr. 10 Vznik nábojů při stlačení (vlevo) a při natáhnutí (vpravo) [10]	18
Obr. 11 Polarizace piezoelektrického materiálu. Náhodná polarizace dipólů a), polarizace určena elektrickým polem b), zbytková polarizace po odebrání elektrického pole. [11].....	19
Obr. 12 Různé tvary piezo-keramik [12].....	20
Obr. 13 Chemický vzorec PVDF [14]	21
Obr. 14 Příklady typických piezoelektrických kompozitních struktur [7]	22
Obr. 15 Vyznačená orientace pomocí os [11].....	23
Obr. 16 Vliv Curieovy teploty na krystalovou strukturu piezo-materiálu,.....	26
Obr. 17 Průběh impedance v závislosti na frekvenci [11].....	26
Obr. 18 Fotografie vytvořeného vetknutého hliníkového nosníku	27
Obr. 19 Rozměry piezomeniče ppa-1014 [mm] [15].....	28
Obr. 20 Blokové schéma integrovaného obvodu LTC3588-1 [16]	29
Obr. 21 Schéma zapojení LTC3588 [16]	30
Obr. 22 Umístění elektrod na produktech PPA [15].....	32
Obr. 23 Elektroda 165295 od firmy TE Connectivity [17]	32
Obr. 24 Schéma mého obvodu ve schématickém editoru programu Eagle.....	33
Obr. 25 Schéma mého plošného spoje ve PCB editoru programu Eagle	34
Obr. 26 Fotografie vytvořeného piezoelektrického generátoru	34
Obr. 27 Průběh napětí na výstupu keramiky	36
Obr. 28 Fotografie keramiky se zapůjčeným vibračním přístrojem	36
Obr. 29 Obvod pro měření vnitřního odporu	37
Obr. 30 Závislost zatěžovacího proudu na odporu	38

Seznam zkratek a symbolů

ε	Absolutní permitivita [$F \cdot m^{-1}$]
ε_0	Permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$]
ε_r	Relativní permitivita [-]
ε^T	permitivita udávaná při stálém mechanickém napětí [$F \cdot m^{-1}$]
ε^S	permitivita udávaná při stálém mechanickém přetvoření [$F \cdot m^{-1}$]
U	Elektrické napětí [V]
I	Elektrický proud [A]
R	Odpor [Ω]
T	Perioda [s]
\mathbf{P}	Vektor polarizace
T_c	Curieho teplota [$^{\circ}C$]
q	Elektrický náboj [C]
k	Vazební koeficient
k_p	Piezoelektrická konstanta
k_u	Napětřová citlivost piezoelektrického element
f_a	Antirezonanční frekvence [Hz]
f_r	Rezonanční frekvence [Hz]
f	Frekvence [Hz]
f_g	Frekvence vlastních kmitů generátoru [Hz]
g	gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
g	Piezoelektrická napětřová konstanta [$V \cdot m \cdot N^{-1}$]
d	Piezoelektrická nábojová konstanta [$C \cdot N^{-1}$], [$m \cdot V^{-1}$]
D	hustota elektrického náboje [$C \cdot m^{-2}$]
S	Mechanické přetvoření [-]
s	Elastická podajnost [$m^2 \cdot N$]
E	Intenziva elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
F	Síla [N]
Y	Youngův modul pružnosti [Pa] [$N \cdot m^{-2}$]
PZT	Olovo-zirkon-titanat
PVDF	Polyvinylidenefluorid
PVF	Polyvinylfluorid
PVC	Polyvinylchlorid
PbTiO ₃	Titaničitan olovnatý
PbZrO ₃	Zirkoničitan olovnatý
BaTiO ₃	Titaničitan barnatý
LiTaO ₃	Lithium tantalát
LiNbO ₃	Lithium niobát
ZnS	Sulfid zinečnatý
GaAs	Galium arsenid
GaP	Galium fosfid
SiO ₂	Oxid křemičitý, Křemen
EH	Energy harvesting
MEMS	Mikro-Elektrický-Mechanický-System
DC	Stejnsměrný proud
AC	Střídavý proud
UVLO	Under voltage lockout
PCB	Printed circuit board, Deska plošného spoje
Eagle	Easily Applicable Graphival Layout Editor

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání principů vibračních generátorů [6]	16
Tab. 2 Výběr výstupního napětí pomocí logických hodnot [16]	31
Tab. 3 Naměřené hodnoty zatěžovacího proudu	38
Tab. 4 Vypočtený výkon závislý na zatěžovacím proudu	38

Literatura

- [1] E. Dierks, J. Weaver, K. Wood, K. Crider a D. Jensen, „Energy Harvesting for Engineering Educators,“ v *Trends in Mechanical Engineering II*, 2011.
- [2] S. J. R. Roundy, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, Disertační práce*, Berkeley, 2003.
- [3] S. Beeby a N. White, *Energy Harvesting for Autonomous Systems*, Norwood: Artech House, 2010.
- [4] M. Pozzi a M. Zhu, „Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modelling and experimental,“ 6 4 2011. [Online]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/5/055007/meta;jsessionid=3DEA9C43B162CB0AF628C311B575D6AC.ip-10-40-1-105#references>. [Přístup získán 10 5 2017].
- [5] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, Puers.R a G. Borghs, „An electret-based electrostatic μ -generator,“ v *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Boston USA, 2003.
- [6] Z. Ing. Hadaš, „Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava,“ 2007.
- [7] Prof. Ing. M. Husák, „Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem - I,“ *DPS*, pp. 12-16, září-říjen 2013.
- [8] Prof. Ing. M. Husák, „Autonomní mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem - II,“ *DPS*, pp. 20-25, Listopad-Prosinec 2013.
- [9] D. S. Antonio Arnau, *Piezoelectric Transducers and Applications*, Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [10] Doc. Mgr. J. Erhart, „Základy piezoelektřiny,“ [Online]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf.
- [11] „APC International,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>.
- [12] „CeramTec The Ceramic Experts,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/applications/piezo-applications/sensor-technology/>.
- [13] „Piezoelektrické jevy,“ 10. 2. 2015. [Online]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf. [Přístup získán 10. 5. 2017].
- [14] „Wikipedia,“ [Online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidene_fluoride.
- [15] „www.mide.cz,“ [Online]. Dostupné z: http://cta-service-cms2.hubspot.com/ctas/v2/public/cs/c/?cta_guid=8b655dfb-a489-4b33-9a15-e1c5c381bb78&placement_guid=b40269b7-eb42-4234-a7ae-d6b9bfa6f122&portal_id=637862&redirect_url=APefjpG9HRMfO9oHgl_TsR5iwrTGhGb2WjEjEpjniZpywjSQE_6k-Hy818fZoVAJdR_DyF. [Přístup získán 14. 5. 2017].
- [16] „Linear Technology,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.linear.com/docs/28909>. [Přístup získán 14. 5. 2017].

- [17] „Mouser,“ [Online]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity/165295/?qs=HjC056NR38GG9cAP6S3MBw%3d%3d>. [Přístup získán 17. 3. 2017].
- [18] J. Tichý, J. Erhart, E. Kittinger a J. Přivratská, Fundamentals of Piezoelectric Sensorics, Berlín: Springer-Verlag, 2010.