

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

Piezoelektrický jev a jeho využití

Arkadiy Lachkov

© 2023 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Arkadiy Lachkov

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Piezelektrický jev a jeho využití

Název anglicky

Piezoelectric effect and its application

Cíle práce

Popsat princip piezelektrického jevu (přímý, obrácený) a vypracovat přehled všech materiálů, ve kterých se tento jev vyskytuje, včetně důležitých pojmů, pomocí kterých se piezelektrický jev charakterizuje. Provést analýzu současného stavu využití strojů a prvků, založených na principu piezelektrického jevu (piezelektrické motory, senzory, aktuátory atd.), zhodnotit jejich výhody a nevýhody včetně jejich ekonomické účelnosti. Na závěr práce uvést detailní rozbor vybraného zařízení, využívajícího piezelektrický jev, a zhodnotit ekonomickou stránku jeho provozu.

Metodika

1. Úvodní kapitola – seznámení s řešenou problematikou piezelektrických jevů, zdůvodnění volby tématu a vymezení cílů bakalářské práce. Na základě studia dostupných materiálů zpracovat přehledovou studii piezelektrického jevu (přímý, obrácený), popsat druhy piezelektrických látek (piezelektrická keramika, krystalické piezelektrické látky, piezelektrické polymery atd.).
2. Provést analýzu současného stavu využití piezelektrického jevu z odborných informačních zdrojů. Popsat strukturu (základní části) přístrojů, využívajících piezelektrický jev. Citovat veškerou použitou literaturu.
3. Analýza provozní a ekonomické stránky vybraného zařízení, využívajícího piezelektrický jev.
4. Závěrečná kapitola – zhodnocení svých výsledků vzhledem k vytyčeným cílům, zhodnocení jejich praktického přínosu a případně naznačení podnětů pro další zkoumání.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Piezoelektrický jev, piezoelektrické rezonátory, piezokeramika, piezokrystaly

Doporučené zdroje informací

Erhart, J., „Základy piezoelektřiny pro aplikace. Učební texty k semináři“, Technická univerzita v Liberci, 2011.

Hiršl, J., Černošl, D., Stefan, O., Čermák, F.: Keramická piezoelektrika, Praha, 1970.

http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf

Petržlka V., Slavík J., Šolc I., Taraba O., Tichý J., Zelenka J.: Piezoelektřina a její technické použití, NČAV, Praha, 1960.

Richard Regazzo, Marcela Regazzová: Ultrazvuk – základy ultrazvukové defektoskopie. BEN – technická literatura, Praha, 2013, 292 s.

Setter, N.: Piezoelectric Materials in Devices. Ceramics Laboratory, EPFL Lausanne, 2002.

Uchino, K.: Ferroelectric Devices. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 2000.

Zelenka, J.: Piezoelektrické rezonátory a jejich použití, Academia, 1983.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Vladimír Ryženko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 28.1.2022

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23.2.2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 20.03.2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Piezoelektrický jev a jeho využití" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.03.2023_____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Vladimírovi Ryženko, Ph.D. za podporu a konzultace během psaní této bakalářské práce. Také děkuji rodině a blízkým lidem za podporu při psaní této bakalářské práce.

Piezelektrický jev a jeho využití

Abstrakt

Tato bakalářská práce obsahuje popis principu piezelektrického jevu, materiálů a zařízení, které ho využívají, a jejich aplikace. Informace, na základě kterých je napsána tato bakalářská práce, pocházejí z odborné literatury a publikací, zaměřené na konkrétní body dané práce. Bakalářská práce se skládá ze tří částí. V první je popsán princip piezelektrického jevu a přehled nejpopulárnějších materiálů, které se používají v dané oblasti. Ve druhé části je uveden přehled zařízení, jak existujících, tak i nově navržených, využívající piezelektrický jev a piezelektrické materiály. V závěrečné části je ekonomický rozbor dlaždic pro generaci elektrické energie pomocí piezelektrických elementů.

Klíčová slova: Piezelektrický jev, piezelektrické rezonátory, piezokeramika, piezokrystaly

Piezoelectric effect and its application

Abstract

This bachelor thesis contains a description of the principle of the piezoelectric effect, the materials and devices that use it, and its applications. The review featured in the thesis originates from academic literature, such as the scientific reviews, articles, studies and handbooks, focused on specific points of the thesis. The bachelor thesis consists of three parts. The first covers the principle of the piezoelectric phenomenon and a review of the most popular materials used in the field. The second part gives an overview of devices, both existing and newly designed, using the piezoelectric effect and piezoelectric materials. The final section is an economic analysis of power-generating tiles elaborated on the piezoelectric elements.

Keywords: Piezoelectric effect, piezoelectric resonators, piezoceramics, piezocrystals

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
3 Piezoelektrický jev	3
3.1 Definice	3
3.2 Stručná historie vývoje piezoelektrického jevu	3
3.3 Princip piezoelektrického jevu	4
4 Piezoelektrické materiály	6
4.1 Krystalické piezoelektrické materiály	7
4.2 Polykrystalické piezoelektrické materiály (piezokeramika)	8
4.3 Kompozity	11
5 Stroje a přístroje, využívající piezoelektrický jev	12
5.1 Sensory	13
5.2 Generátory	18
5.3 Piezoelektrické motory a aktuátory	20
5.4 Zvuková a ultrazvuková zařízení	24
6 Ekonomické hodnocení piezoelektrických dlaždic.....	30
6.1 Rozbor piezoelektrických dlaždic	31
6.2 Případová studie	32
7 Závěr.....	35
8 Seznam použitých zdrojů	36

1 Úvod

Piezoelektrický jev je znám už dávno, ale i v dnešní době stále probíhá výzkum a vědci se snaží objevit nové možnosti aplikace tohoto jevu v praxi, objevit nové látky s piezoelektrickými vlastnostmi a optimalizovat existující zařízení a materiály. Během posledních let dochází k rychlému nárůstu počtu publikací v této oblasti, v porovnání s elektrostatickým a elektromagnetickým jevem. Díky svým unikátním vlastnostem, nelze zcela nahradit piezoelektrické materiály v některých aplikacích bez nežádoucích kompromisů.

Hlavní podstatou piezoelektrických materiálů a piezoelektrického jevu je přeměna mechanické energie na elektrickou a obráceně. Nejedná se o velké mechanické posuvy nebo generace velkého množství elektrické energie, většinou se pohybujeme v řadě stovek nanometrů a desítek mikrowattů, ale i tyto relativně malé hodnoty mají uplatnění v mnoha oblastech, jak je následně uvedeno.

Velkou část bakalářské práce tvoří rozbor konkrétních zařízení, už uplatněných v praxi a nově navržených zařízení včetně způsobů jejich aplikací. Příkladem mohou být aktuátory, generátory, senzory, reproduktory a nově navržené materiály, které jsou ve fázi vývoje, ale během následujících let se mohou stát běžnou součástí našeho života.

V poslední části této bakalářské práce je uvedena ekonomická analýza dlaždic s piezoelektrickým elementem pro generace elektrické energie. Pozornost je zaměřena na základní ekonomické ukazatele s posouzením rentability těchto dlaždic.

2 Cíl práce a metodika

Popsat princip piezoelektrického jevu (přímý, obrácený) a vypracovat přehled všech materiálů, ve kterých se tento jev vyskytuje, včetně důležitých pojmů, pomocí kterých se piezoelektrický jev charakterizuje. Provést analýzu současného stavu využití strojů a prvků, založených na principu piezoelektrického jevu (piezoelektrické motory, senzory, aktuátory atd.), zhodnotit jejich výhody a nevýhody včetně jejich ekonomické účelnosti. Na závěr práce uvést detailní rozbor vybraného zařízení, využívajícího piezoelektrický jev, a zhodnotit ekonomickou stránku jeho provozu.

1. Úvodní kapitola – seznámení s řešenou problematikou piezoelektrických jevů, zdůvodnění volby tématu a vymezení cílů bakalářské práce. Na základě studia dostupných materiálů zpracovat přehledovou studii piezoelektrického jevu (přímý, obrácený), popsat druhy piezoelektrických látek (piezoelektrická keramika, krystalické piezoelektrické látky, piezoelektrické polymery atd.).
2. Provést analýzu současného stavu využití piezoelektrického jevu z odborných informačních zdrojů. Popsat strukturu (základní části) přístrojů, využívajících piezoelektrický jev. Citovat veškerou použitou literaturu.
3. Analýza provozní a ekonomické stránky vybraného zařízení, využívajícího piezoelektrický jev.
4. Závěrečná kapitola – zhodnocení svých výsledků vzhledem k vytyčeným cílům, zhodnocení jejich praktického přínosu a případně naznačení podnětů pro další zkoumání.

3 Piezoelektrický jev

3.1 Definice

Piezoelectricita je lineární jev, který je vázán na mikroskopickou strukturu materiálu. Některé piezoelektrické materiály se stávají elektricky polarizované (na povrchu látky se objevují nabitě částice pod vlivem vnějšího mechanického namáhání (tlak, tah, krut, smyk, ohyb). Tento reverzibilní jev se nazývá *přímý piezoelektrický jev*. Tento jev se vyskytuje pouze u materiálu bez středu symetrie. Spolu s přímým piezoelektrickým jevem se vždy vyskytuje i *obrácený piezoelektrický jev*, který představuje vznik mechanického napětí v látce, pod vlivem vnějšího elektrického napětí. [3]

3.2 Stručná historie vývoje piezoelektrického jevu

Piezoelektrinu poprvé objevili francouzští vědci Jacques a Pierre Curieovi v roce 1880, když pozorovali, jak mechanický tlak na některé krystaly, například křemen a turmalín, vytváří elektrické náboje. Tento objev vedl na počátku 20. století k vývoji prvních piezoelektrických zařízení, jako jsou sonary a ultrazvukové snímače. [3]

V polovině 20. století byla vyvinuta keramika s titaničitanem olovnatým (PZT), která měla mnohem vyšší piezoelektrický koeficient a byla mnohem praktičtější pro použití ve snímačích a dalších zařízeních. PZT je dodnes jedním z nejpoužívanějších piezoelektrických materiálů. [3]

V posledních letech se výzkum nových piezoelektrických materiálů zaměřuje na hledání materiálů s vyššími piezoelektrickými koeficienty, větší trvanlivostí a menším dopadem na životní prostředí. Mezi nadějně materiály patří niobát lithia, nitrid hliníku a různé materiály na bázi polymerů.

Postup vývoje piezoelektrických materiálů by mohl zahrnovat několik klíčových kroků:

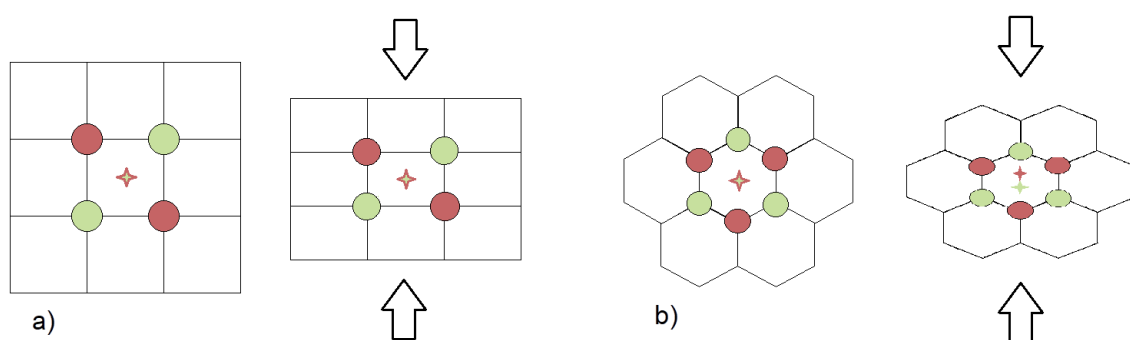
- Pochopení základních fyzikálních vlastností piezoelektrických materiálů, včetně krystalické struktury, rozložení náboje a mechanických vlastností.
- Vývoj nových materiálů s vysokými piezoelektrickými koeficienty, větší trvanlivostí a nižším dopadem na životní prostředí prostřednictvím syntézy a charakterizace materiálů.
- Optimalizace zpracování a výroby piezoelektrických materiálů pro dosažení požadovaných vlastností a výkonu.

- Vývoj nových aplikací a zařízení založených na piezoelektrických materiálech, jako jsou zařízení pro sběr energie, vysoce výkonné senzory, aktuátory a biomedicínská zařízení.
 - Neustálé zlepšování a zdokonalování piezoelektrických materiálů a zařízení, na základě zpětné vazby z reálných aplikací a probíhajícího výzkumu.
 - Celkově má vývoj piezoelektrických materiálů dlouhou a bohatou historii a probíhající výzkum a vývoj se zaměřuje na hledání nových a inovativních způsobů využití jedinečných vlastností těchto materiálů pro širokou škálu aplikací.
- [3]

3.3 Princip piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev závisí na mikrostruktuře materiálu, zejména na symetrii jeho krystalové mřížky. Krystal obsahuje ionty uspořádané v pravidelném vzoru, který se opakuje v elementárních buňkách. Krystal musí mít nesymetrickou buňku bez středu symetrie, aby mohl vykazovat piezoelektrické vlastnosti. Při vnějším mechanickém namáhání se ionty v takové buňce přesouvají a vytvářejí elektrický dipól, což je základem piezoelektrického jevu. Naopak, krystal s buňkou se středem symetrie není piezoelektrický, protože v této buňce nevzniká elektrický dipól.

Obr. 1: Vnější síla působící na iontový krystal se středem symetrie (a) a bez něj (b)



Zdroj: [7]

Krystal má schopnost vytvářet elektrické napětí při deformaci, což nazýváme piezoelektrickým jevem. Tento jev může fungovat i obráceně, kdy na krystal přivedeme elektrické napětí a tím se deformuje. Rozlišujeme přímý a nepřímý piezoelektrický jev, který závisí na vzájemné poloze krystalografických os látky a směru přiloženého pole. V klidovém stavu jsou polohy kladných a záporných nábojů, po vystředění přes objem buňky, shodné a materiál nevykazuje žádné elektrické projevy. Mechanická síla, jako je tlak, tah, ohyb nebo

střih, posouvá polohy nábojů, čímž se elektrická těžiště záporných a kladných iontů rozdělí a na určitých plochách krystalu se objeví náboj. S deformací krystalické mřížky působením vnější síly se mění i měrný elektrický odpor, což je piezorezistivní jev. Krystal má tři osy – elektrickou, mechanickou a optickou, působí-li síla kolmo na osu optickou, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na osu elektrickou se objeví elektrický náboj. Pokud působí rozložená síla rovnoměrně ve směru elektrické osy, jedná se o *podélný piezoelektrický jev*.

Princip piezoelektrického jevu zahrnuje dočasné vytvoření dipólových momentů v látkách, během mechanického působení na ně. Bez tohoto působení jsou látky elektricky neutrální. Existuje také opačný jev, kdy se krystal deformuje po přiložení elektrického pole a poté se vrátí, po odstranění pole, do své původní podoby. Nicméně, mnoho krystalických látek, u kterých byl prokázán piezoelektrický jev, nelze v praxi použít kvůli technickým omezením.

Piezoelektrika jsou citlivá na vysoké teploty, při kterých může dojít k narušení uspořádání iontů a ztrátě piezoelektrických vlastností. Tento přechod je skokový a bod, ve kterém materiál ztrácí piezoelektrické vlastnosti, se nazývá Curierova teplota. Tato teplota je charakteristická pro daný konkrétní materiál a může dosáhnout hodnot od 100°C do 1000°C a výše. V současné době jsou piezoelektrické materiály už z výroby navrženy tak, aby Curierova teplota byla co nejvyšší.[1]-[5]

4 Piezoelektrické materiály

Mezi nejběžnější piezoelektrické materiály patří křemen, olovo-zirkon-titanát (PZT) a polyvinylidenfluorid (PVDF). Křemen je přírodní piezoelektrický materiál s vynikající stabilitou a přesností, takže je ideální pro použití v oscilátorech, senzorech a filtrech. PZT je syntetický materiál, který vykazuje vysoké piezoelektrické koeficienty, takže je vhodný pro použití ve vysoce výkonných aktuátorech a senzorech. PVDF je pružný polymer, který lze snadno tvarovat do různých forem, takže je užitečný v aplikacích, které vyžadují pružný a lehký materiál, jako sběrače energií a senzory.

Mezi hlavní charakteristické vlastnosti piezoelektrických materiálů patří jejich piezoelektrické koeficienty (hlavně d_{33}), které určují sílu jejich piezoelektrického účinku. Dále jejich dielektrické konstanty (ϵ_r), mechanické vlastnosti (Modul pružnosti E), které ovlivňují jejich schopnost odolávat napětí a deformaci, a také Curieova teplota (T_c), která určuje maximální teplotu, kdy materiál ztrácí své piezoelektrické vlastnosti. Pochopení těchto vlastností je zásadní pro návrh a optimalizaci piezoelektrických zařízení pro konkrétní aplikace. [35]

Tab. 1: Přehled populárních piezoelektrických materiálů a jejich základní vlastnosti

Materiál	Piezoelektrický koeficient (d_{33})	Dielektrická konstanta (ϵ_r)	Modul pružnosti (E)	Curieova teplota (T_c)	Oblast použití
Křemen	2,3 pC/N	3,8	$9,7 \times 10^{10}$ Pa	573°C	Senzory, časovací zařízení
Olovo-zirkon-titanát (PZT)	190-300 pC/N	1200-2200	60-80 GPa	350-450°C	Aktuátory, senzory, převodníky
Polyvinylidenfluorid (PVDF)	14-22 pC/N	8-12	3 GPa	-	Senzory, sběrače energie
Titaničitan barnatý (BaTiO_3)	120 pC/N	1200	70-90 GPa	120°C	Převodníky, aktuátory
Lithium-niobát (LiNbO_3)	24 pC/N	85	70-85 GPa	1210°C	Optická zařízení, senzory
Olovo-magnezium-niobát-olovo-titanát (PMN-PT)	2000-4000 pC/N	2000-4000	40-60 GPa	-	Vysokovýkonné převodníky

Zdroj: [9]

4.1 Krystalické piezoelektrické materiály

Křemen (SiO₂) nebo *quartz*, je nejvíce používaným piezoelektrickým materiálem na světě. V historii piezoelektrických materiálů patří křemen mezi první komerčně používané materiály. Křemen je velmi rozšířený nerost v zemské kůře a může se vyskytovat v různých odrůdách, například jako křišťál, ametyst, citrín, záhněda, černý morion a růženín. Kromě svých piezoelektrických vlastností má křemen také stabilní chemické a mechanické vlastnosti a je odolný proti kyselinám i zásadám. Avšak, jeho piezoelektrické vlastnosti nejsou tak vysoké jako u jiných piezoelektrických materiálů. Některé surové křemeny v zemské kůře nejsou vhodné pro zpracování v elektrotechnickém průmyslu, protože jsou nepravidelné a mají rozmanité piezoelektrické vlastnosti. Kvalitní křemen pro elektrotechnické účely je k dispozici jen v omezeném množství. Kvůli nedostatku kvalitního přírodního křemene byl vytvořen syntetický křemen vyrobený metodou tažení z taveniny Czochralského. Umělý křemen se pěstuje ve vodném roztoku při vysoké teplotě a tlaku v ocelových autoklávech. Růst krystalů je velmi pomalý a trvá několik měsíců. Výsledný umělý křemen má shodné piezoelektrické a elastické vlastnosti jako přírodní křemen, ale může také obsahovat defektní části.

Křemen je vysoce využívaný materiál v elektrotechnice a radioelektronice, díky svým výjimečným vlastnostem. Jeho využití v těchto odvětvích má dlouhou historii. V současné době je nejvíce používaným zástupcem této skupiny a také patří k nejrozšířenějším nerostům zemské kůry.

Křemen má široké využití v různých zařízeních, jako jsou například radary, hodiny, senzory, telefony a počítače. Využívá se především jako rezonátor. Kromě toho je křemen základem převodníků mechanických veličin, jako jsou síla, zrychlení a tlak. I při relativně malé hodnotě piezoelektrického koeficientu (d_{33}), v porovnání s PZT nebo PMN-PT, se stále používá v různých piezoelektrických senzorech a jiných zařízeních.

Křemen má také další výhodné vlastnosti, které jsou ideální pro elektrotechnické a radioelektronické aplikace. Je chemicky odolný proti kyselinám i zásadám a má vysokou tvrdost, což mu umožňuje odolat vysokému mechanickému napětí. Jeho vlastnosti jsou také relativně stabilní vůči teplotě, modifikace je stálá až do 573°C (Curieova teplota). [35]

Lithium tantalát – LiTaO₃ pro výrobu jednodoménových krystalů lithiového tantalátu se obvykle používá Czochralského metoda tažení z taveniny při vysoké teplotě 1680°C. Aby se dosáhlo piezoelektrického efektu, je nutné ohřát krystal nad teplotu Curieho bodu a následně jej ochladit, při působení elektrického pole o intenzitě několika voltů

na centimetr ve směru osy Z (optická osa krystalu). Tento typ krystalu se často používá v dotykových obrazovkách, kde plní funkci vysílače i přijímače. Currieho bod této látky dosahuje teploty 610°C. [35]

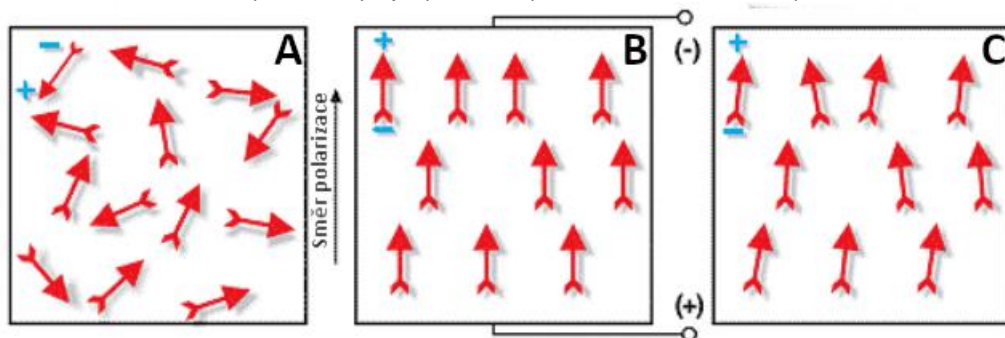
Lithium niobát – LiNbO₃ se rovněž pěstuje Czochralského metodou tažením z taveniny při teplotě 1300°C. Jeho Currieův bod se nachází okolo 1195°C. Lithium niobát je často používán v optice pro výrobu periodicky pólovaných optických struktur, které slouží ke generaci vyšších harmonických frekvencí světla. Dále se využívá jako materiál pro rezonátory na objemových (BAW) nebo povrchových vlnách (SAW). [35]

Turmalín je skupina materiálu, která se vyskytuje v přírodě v mnoha formách a modifikacích. Je to první látka, u které byl objeven piezoelektrický jev. Turmalín má podobné vlastnosti jako křemen, ale je více závislý na teplotě a kvůli tomu se využívá méně v aplikacích, kde jsou striktní požadavky na pracovní teploty. Ale i při těchto omezeních se používá například v senzorech. [35]

4.2 Polykrystalické piezoelektrické materiály (piezokeramika)

Keramika sama o sobě nemá piezoelektrické vlastnosti, ale piezokeramický prvek může být vystaven silnému stejnosměrnému elektrickému poli, což se obvykle děje při teplotě mírně pod Curieho bodem (viz obrázek 2b), aby se domény v prvku vyrovnaly. Tímto polarizačním ošetřením se domény, které jsou nejvíce zarovnané s elektrickým polem, rozšíří na úkor domén, které s polem zarovnané nejsou, což způsobí prodloužení prvku ve směru pole. Po odstranění elektrického pole zůstává většina dipólů uzamčena v konfiguraci blízké zarovnání (viz obrázek 2c). Prvek tak má trvalou polarizaci a je trvale prodloužený. Tato zůstatková orientace se nazývá remanentní polarizace. [7]

Obr. 2: Polarizace piezokeramiky. A – náhodná orientace domén před polarizací. B – polarizace ve stejnosměrném elektrickém poli. C – Zbývající polarizace po odstranění elektrického pole.



Zdroj: [4]

Stárnutí piezokeramiky je dalším problémem vyplývajícím z výrobního procesu. Sleduje logaritmický průběh s nejvyššími konstantami dosaženými krátce po polarizaci.

Výrobci obvykle zaznamenávají pokles vlastností do deseti let, přičemž normou je zhoršení o několik procent za desetiletí. U materiálu, který stárne o 1% za desetiletí, tak dojde ke ztrátě piezoelektrických vlastností o 1% za jeden den, o další 1% za deset dní atd. To je způsobeno tepelným pohybem piezokeramických molekul, které se v průběhu času odchyľují od osy polarizace. Nečinnost také zhoršuje stárnutí, protože nedochází k opětovné polarizaci materiálu z přiloženého elektrického pole. Vystavení vysokým teplotám rovněž urychluje stárnutí. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je při návrhu příslušných aplikací důležité zohlednit provozní teplotu a frekvenci používání. [7]

PZT je nejčastěji používaným keramickým materiálem pro piezoelektrické aplikace. Tato keramika se skládá z tuhých roztoků oxidu olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti), tvořících složky PbZrO_3 (označované jako PZ) a PbTiO_3 (označované jako PT). Tyto materiály jsou známé od 50. let dvacátého století a jsou v současnosti jedny z nejvýznamnějších průmyslově vyráběných ferroelektrických keramik. Proces výroby PZT keramiky začíná mletím surovin oxidů PbO , ZrO_2 a TiO_2 ve stechiometrickém poměru v kulových mlýnech. Chemické složení keramiky se upravuje přidávkou malého množství dopujících příměsí, které ovlivňují materiálové vlastnosti. Významné příměsi zahrnují atomy lanthanu (La), které tvoří speciální typ keramiky označovaný jako PLZT, který má průhlednou strukturu a množství procházejícího světla se řídí elektrickým polem. Výrobní proces PZT keramiky zahrnuje další kroky, jako je kalcinace, rozemletí na zrna o velikosti 1 μm až 10 μm , přidání organického pojiva, lisování a extrudování, vypalování, a nakonec aplikaci elektrod. Makroskopické piezoelektrické vlastnosti se získávají polarizací v oleji při pokojové nebo zvýšené teplotě. Výrobky z PZT keramiky mají obvykle tvar disků, desek, tyčinek, válečků, trubiček, polokouli a další speciální tvary podle požadavků zákazníka.

Přidáním akceptoru (prvky, které mají o jeden elektron v obalu atomu méně než směs) do směsi vzniká tvrdá keramika. Hlavní výhodou tvrdé keramiky je vyšší odolnost na depolarizaci, vyšší napěťová konstanta, vyšší činitel jakosti, nižší ztrátový činitel a celková stabilita vlastností. Tento materiál je nejvhodnější pro vysokofrekvenční aplikace a aplikace s vysokým mechanickým a elektrickým napětím.

Když do směsi přidáme donory (prvky, které mají o jeden elektron v obalu atomu více než směs), vznikne měkká keramika, která má vyšší nábojovou konstantu a vyšší permitivitu. Obecně dokáže dosáhnout větších mechanických posuvů než tvrdá keramika, a proto se využívá v senzorech a aktuátorech. Odolnost na depolarizaci může být problémem u daného materiálu, proto není vhodný pro vysokonapěťové aplikace. [35]

Bezolovnatý PZT je třída piezoelektrických materiálů, které neobsahují olovo. Tradiční materiály PZT jsou často založeny na olovu, které představuje problém pro životní prostředí a zdraví. Bezolovnaté materiály PZT nabízejí alternativu, která je šetrnější k životnímu prostředí a potenciálně bezpečnější pro práci s nimi.

Bezolovnaté materiály PZT mohou být založeny na různých alternativních prvcích, jako je vizmut, sodík a draslík, které jsou netoxické. Tyto materiály vykazují podobné piezoelektrické vlastnosti jako tradiční materiály PZT, např. vysoké koeficienty elektromechanické vazby, vysoké dielektrické konstanty a vysoké piezoelektrické konstanty.

Jedním z příkladů bezolovnatého materiálu PZT je titaničitan bismutito-sodný (BNT), který byl intenzivně zkoumán a vyvíjen pro použití v piezoelektrických aplikacích. Materiály na bázi BNT mohou vykazovat vysoké piezoelektrické koeficienty a nízké dielektrické ztráty, díky čemuž jsou vhodné pro použití v senzorech, aktuátorech a zařízeních pro sběr energie.

Bezolovnaté materiály PZT jsou stále relativně nové a jejich provozní vlastnosti se stále studují a optimalizují. Nabízejí však slibnou alternativu k tradičním materiálům PZT a mohly by potenciálně snížit dopad piezoelektrických technologií na životní prostředí. [35]

PLZT (PbLaZrTiO₃) keramika je typ feroelektrického materiálu, který vykazuje vysoké piezoelektrické a elektrooptické vlastnosti. Vyrábí se náhradou části iontů zirkonia a titanu v keramice PZT (titaničitan olovnatý) ionty lanthanu.

Přídavek lanthanu modifikuje krystalovou strukturu materiálu, což mu umožňuje vykazovat kvalitnější znaky, jako jsou příznivější piezoelektrické vlastnosti a průhlednost ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra. Koncentrace lanthanu v PLZT se může měnit, což vede k různým vlastnostem materiálu, jako je Curieho teplota a teplotní koeficient piezoelektrického koeficientu.

Ve srovnání s keramikou PZT může keramika PLZT vykazovat vyšší piezoelektrický koeficient, což ji činí užitečnou pro různé aplikace, zejména ultrazvukové převodníky, aktuátory a senzory. Kromě toho je lze, díky jejich průhlednosti, použít v elektrooptických zařízeních, třeba vlnovody, modulátory a spínače. Výroba keramiky PLZT je však obecně dražší, než výroba keramiky PZT, kvůli dalším krokům zpracování, které jsou nutné pro dopování lanthanem. [35]

4.3 Kompozity

Piezelektrické kompozitní materiály jsou materiály, které se skládají ze dvou nebo více různých typů piezelektrických materiálů, jako je keramika nebo polymery, které jsou spojeny dohromady a vytvářejí kompozit se zlepšenými nebo jedinečnými piezelektrickými vlastnostmi.

Tyto kompozitní materiály mohou být navrženy tak, aby vykazovaly specifické mechanické, elektrické nebo tepelné vlastnosti úpravou typu, množství a uspořádání piezelektrických materiálů. Například kombinací keramického piezelektrického materiálu s polymerní matricí lze vytvořit kompozitní materiál, který vykazuje jak vysoké piezelektrické konstanty, tak pružnost.

Piezelektrické kompozitní materiály lze použít v široké škále aplikací, včetně senzorů, aktuátorů, sběračů energie a zdravotnických prostředků. Jednou z důležitých aplikací je ultrazvukové zobrazování, kde lze piezelektrické kompozitní materiály použít k vytvoření snímačů, které vytvářejí vysoce kvalitní obraz.

Piezelektrické kompozitní materiály lze také použít k tlumení vibrací a snižování hluku, kdy piezelektrické materiály mohou přeměňovat mechanickou energii na elektrickou, která může být odváděna jako teplo. Celkově piezelektrické kompozitní materiály nabízejí flexibilní a všestranný přístup k vytváření materiálů s jedinečnými a vylepšenými piezelektrickými vlastnostmi. [6]

5 Stroje a přístroje, využívající piezoelektrický jev

Piezoelektrické materiály mají řadu výhod a nevýhod, oproti alternativám převodu mechanické energie na elektrickou i naopak, které závisí na konkrétní aplikaci a podmínkách problému, který máme před sebou. V této kapitole jsou uvedeny některé nejdůležitější výhody a nevýhody piezoelektrických materiálů a reálné příklady jejich využití v praxi v posledních letech. Mezi výhody řadíme:

Vysoká přesnost:

Piezoelektrické materiály lze využít pro generování velmi přesných elektrických signálů nebo mechanických pohybů. Piezoelektrické součástky se často používají ve vědeckých přístrojích, kde je nezbytná vysoká přesnost. Velikost posunu je závislá na mnoha faktorech, ale můžeme předpokládat rozmezí 4,6 až 20 μm . [8]

Rychlá odezva:

Piezoelektrické materiály mohou generovat elektrické signály nebo mechanické pohyby s velmi vysokou rychlostí. Obecně můžeme očekávat odezvu v řadě mikrosekund. Díky tomu jsou piezoelektrické materiály užitečné v aplikacích, kde je důležitá vysoká rychlost, například v akustických převodnicích nebo při ultrazvukovém zobrazení.

Absence pohyblivých částí:

Jediná pohyblivá část v piezoelektrických přístrojích je sám piezoelektrický materiál, který se pohybuje v řadě mikrometrů. Kvůli tomu vzniká minimum mechanického opotřebení a jsou méně náchylné k mechanickému poškození. Díky tomu jsou obzvláště užitečné v aplikacích, kde je důležitá spolehlivost.

Malé rozměry:

Piezoelektrické materiály zachovávají své vlastnosti i při velmi malých rozměrech. Často dokážou vyrobit piezoelektrické součástky v řadě mikrometrů nebo dokonce nanometrů. Díky tomu jsou používány v aplikacích, kde velikostí je omezující faktor, například v mikroelektromechanických systémech nebo v biomedicíně.

Při velkém množství velmi užitečných výhod, piezoelektrické materiály mají i řadu nevýhod:

Omezený mechanický pohyb:

Piezoelektrické materiály mají velmi omezený rozsah deformací (posun), což znamená, že mohou generovat jenom malý mechanický pohyb. Kvůli tomu piezoelektrické materiály nezískaly popularitu v aplikacích, které vyžadují velké posuny nebo velkou sílu.

Omezený teplotní rozsah:

Piezoelektrické materiály mají omezený rozsah teplot, ve kterých mohou účinně a s vysokou přesností pracovat. Při velmi vysokých teplotách může dojít ke ztrátě piezoelektrických vlastností materiálu nebo k degradaci materiálu. To omezuje užívání piezoelektrických materiálů v oblastech, které mají tvrdé okolní podmínky.

Křehkost:

Piezoelektrické materiály mohou být křehké anebo náchylné k poškození, pokud jsou ovlivněny mechanickým namáháním nebo nárazům. Většinou zabráníme poškození použitím vhodného ochranného obalu, ale i při tom může být použití omezené v aplikacích, které mají velké požadavky na odolnost.

Náklady:

Některé piezoelektrické součástky, vyrobené ze vzácných nebo exotických materiálů mohou být drahé, ale i levnější materiály mají podobné nebo dokonce i lepší vlastnosti.

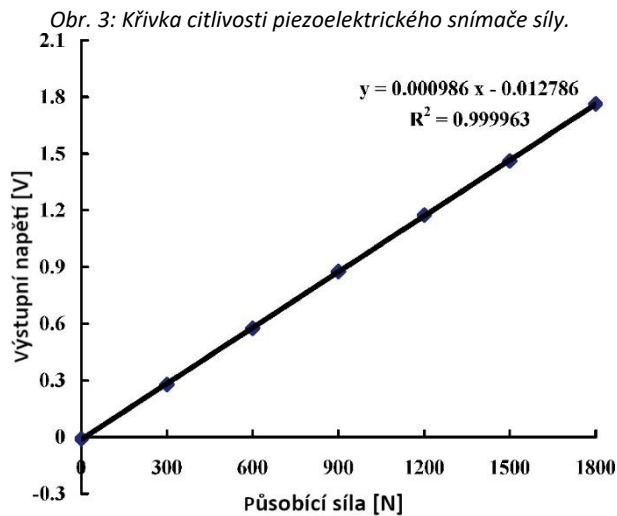
Díky svým unikátním vlastnostem a velkému množství výhod, které nelze zcela nahradit nějakou rozumnou alternativou, piezoelektrické materiály získaly uplatnění v následujících oblastech: automobilový průmysl, letectví a kosmonautika, lékařství, biomedicína, vědecký výzkum a vývoj, zemědělství, elektrotechnika, hudební nástroje a mnoho dalších. Nejpopulárnější přístroje, využívající piezoelektrické látky:

1. Aktuátory
2. Sensory
3. Generátory
4. Transformátory
5. Snímače zvuku
6. Microelectromechanické systémy (MEMS)
7. Nanoelektromechanické systémy (NEMS)[9]

5.1 Sensory

Piezoelektrické sensory se obvykle využívají v aplikacích, kde je potřeba změřit mechanickou sílu nebo tlak. Z podstaty piezoelektrického jevu, když namáháme daný materiál mechanickou silou, látka generuje malý elektrický náboj, který dokážeme změřit a podle jeho velikosti zjistit velikost aplikované síly nebo tlaku. Může se zdát, že sensory s takovou omezenou možností měření nenajdou velké rozšíření, ale piezoelektrické sensory získaly uplatnění v mnoha oblastech, díky své přesnosti, spolehlivosti a malým rozměrům. Z obr. 3 vyplývá, že velikost síly, aplikované na piezoelektrický materiál, je přímo úměrná

vyvolanému napětí na jeho povrchu. Přidáním do senzoru malých kondenzátorů dokážeme dosáhnout ještě větší linearity. Piezoelektrické sensory dokážou změřit jak konstantní, tak i variabilní hodnoty. [10]



Zdroj: [13]

Snímače tlakové síly

Obr. 4: Snímač tlaku Baumer PDRD-E002.S14.C.360.00



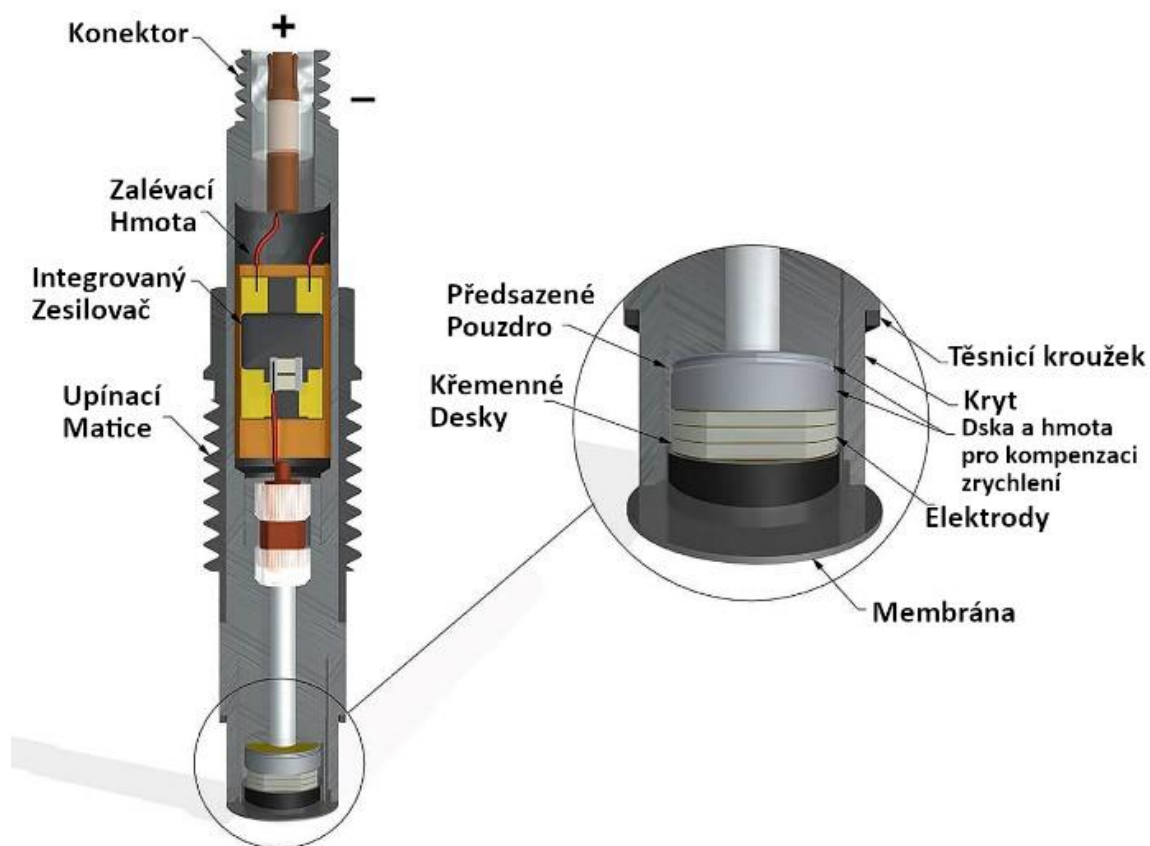
Zdroj: [14]

Snímače tlakové (tahové) síly, dokážou vyrobit v různých tvarech a konfiguracích závitu, které umožňují vhodnou montáž pro různé typy měření tlaku v konkrétních aplikacích. Většinou piezoelektrické snímače tlaku obsahují křemenné krystaly, které zajišťují stabilní provoz. Křemenné krystaly jsou obvykle předsazené v pouzdrech, aby byla zajištěna ochrana krystalu a snadná instalace a integrace do elektrického obvodu. Turmalin může být použit ve snímačích

s plošným spojením, kde je požadována objemová citlivost.

Na obrázku 5 je znázorněna konstrukce snímače tlaku s křemenným krystalem. Křemenný krystal není namáhán přímo tlakovou silou, ale přes membránu, která splňuje jak ochrannou funkci, tak napomáhá distribuovat přiložený tlak po celé ploše krystalu. Pak je napětí od piezoelektrického krystalu zesíleno integrovaným zesilovačem a postupuje dál, do analyzátorů. [11][12]

Obr. 5: Průřez křemenného snímače tlaku.



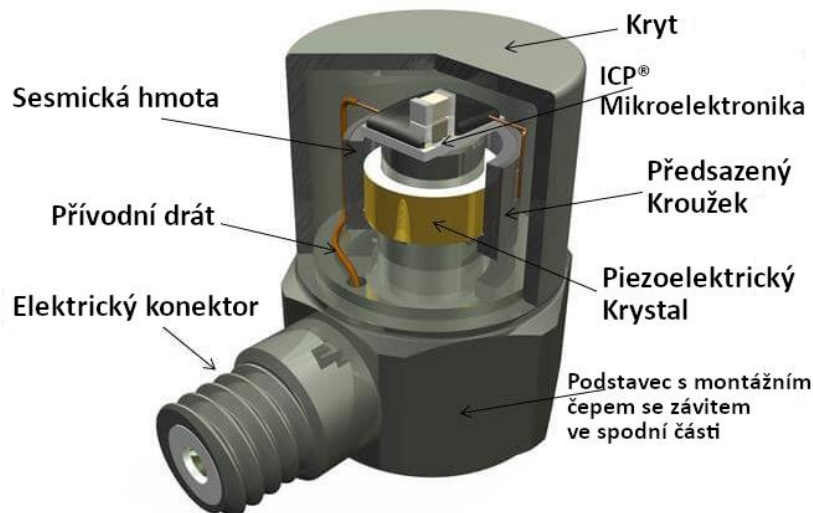
Zdroj: [15]

Snímače vibrací (Akcelerometry)

Typický snímač vibrací na bázi piezoelektrického snímače představuje sensor, který generuje malý elektrický výstup přímo úměrný zachycené vibrace nebo nárazu. Dané snímače vykazují jednoduchost v použití a přesnost ve velkém frekvenčním rozsahu, což umožňuje jejich uplatnění v širokém spektru oborů. Například piezoelektrické snímače vibrací se používají v železniční dopravě pro kontrolu průjezdů vlakových souprav nebo v různých testovacích soustavách. Hlavní výhodou je vysoká spolehlivost, citlivost, přesnost a možnost práce snímače, bez nutnosti napájení od zdroje elektrické energie. Od snímače můžeme očekávat citlivost okolo 50 mV/g. Lineární závislost mezi vibrací, působící na snímač a výstupním napětím, usnadňuje práci se zpracováním výstupních dat senzorů. Na obrázku 6 je uveden příklad vybavení snímače s piezoelektrickým krystalem. Tento příklad je jedno z nejmodernějších řešení od společnosti PCB Piezoelectronics a obsahuje zabudovaný do samotného senzoru mikroelektronický element, který převádí vysokoimpedanční signál od krystalu na použitelný nízkoimpedanční napěťový signál, který

lze snadno přenášet po běžných koaxiálních kabelech, do jakéhokoli systému sběru dat nebo čtecího zařízení. [13]

Obr. 6: Průřez křemenného snímače vibrací s piezoelektrickým krystalem



Zdroj: [16]

Ochranní otřesové detektory

Druh snímače vibrace, používaný jako prvek plošné ochrany k detekci vyřazení dveří nebo oken. Výhodou je plynulé nastavení citlivosti, umožňující použití v různých prostředích bez falešných poplachů. Nevyžadují napájení elektrického zdroje a mohou být snadno zapojeny do jakýchkoliv komplexních ochranných systémů domu.

Piezoelektrický snímač zvuku v hudebních nástrojích.

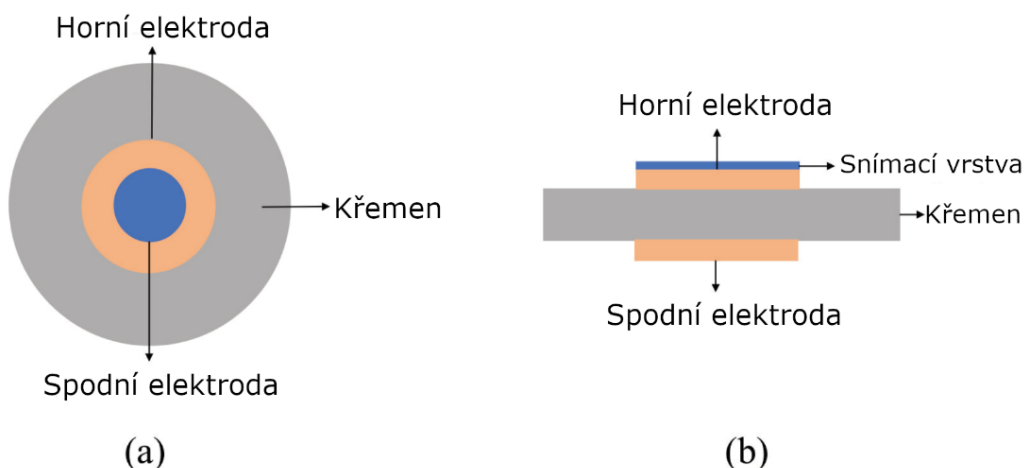
Představuje malý piezoelektrický disk, chráněný kovovou membránou a elektrodou uprostřed. Daný typ snímače se používá už dávno v akustických kytarách, ale během posledních let se objevily snímače, které se mohou nalepit prakticky na jakýkoliv hudební nástroj, který má nějaký druh rezonanční desky. Je to pasivní druh snímačů, což znamená, že nepotřebuje aktivní napájení. Kvalita zvuku, spolehlivost a jednoduchost využívání udržuje daný typ snímačů v hudebním světě i dnes.[36]

Detekce plynů (QCM)

QCM (Quartz crystal microbalance) je další způsob využití piezoelektrického jevu pro účely sensoriky. Pomocí stroje, využívajícího quartz crystal microbalance, lze změřit změnu hmotnosti na jednotku plochy měřením změny frekvence kmitání křemenného rezonátoru. Tento senzor lze využít ve vakuu, plynném, kapalném nebo pevném prostředí. Na obrázku 7 je schematicky znázorněn QCM detektor plynu. V podstatě quartz crystal microbalance

senzor je křemenný krystal, pokrytý speciální snímací vrstvou, umístěn mezi dvěma elektrodami. Snímací elektroda je umístěna na horní straně křemenného krystalu a referenční na spodní. Snímací látka je nanесena uprostřed horní snímací elektrody, která je vystavena působení analytu. QCM senzory zaznamenávají změnu hmotnosti snímací vrstvy měřením změny rezonanční frekvence křemenného krystalu. Když se na křemen prostřednictvím dvou elektrod přivede vnější elektrické pole, vznikne asymetrie v dipólových momentech krystalové struktury piezoelektrického materiálu, což vede k jeho deformaci. Kvůli tomu lze využít této vlastnosti k vytvoření vlnění mezi oběma elektrodami přivedením střídavého proudu na rezonanční frekvenci křemenného krystalu. Když se v důsledku absorpce analytu změní hmotnost na povrchu krystalu, změní se rezonanční frekvence piezoelektrické látky, což lze porovnat s vlastnostmi a koncentracemi plynu z předchozích laboratorních měření daného krystalu. Tento princip platí pouze pro pružné předměty, například kovové povlaky a oxidy kovu, které během kmitání nerozptylují energii. Naopak nepružné předměty, jako buňky, polymery a biomolekulární látky, mohou mít ztrátu energie v důsledku viskózního tlumení během kmitání krystalu na rezonanční frekvenci. Hmotnostní citlivost QCM závisí na tloušťce piezoelektrické látky. Proto potřebujeme k dosažení vysoké rezonanční frekvence QMC tenký křemenný rezonátor, abychom dosáhli nižší hodnoty rezonanční frekvence, smykové tuhosti a větší citlivosti senzoru. Avšak použití tenké vrstvy může být omezeno kvůli obtížím při výrobě a okolním podmínkám oblasti využití QCM senzoru. [15]

Obr. 7: Schematický pohled na typický QCM senzor (a) pohled shora a (b) pohled z boku.



Zdroj: [17]

5.2 Generátory

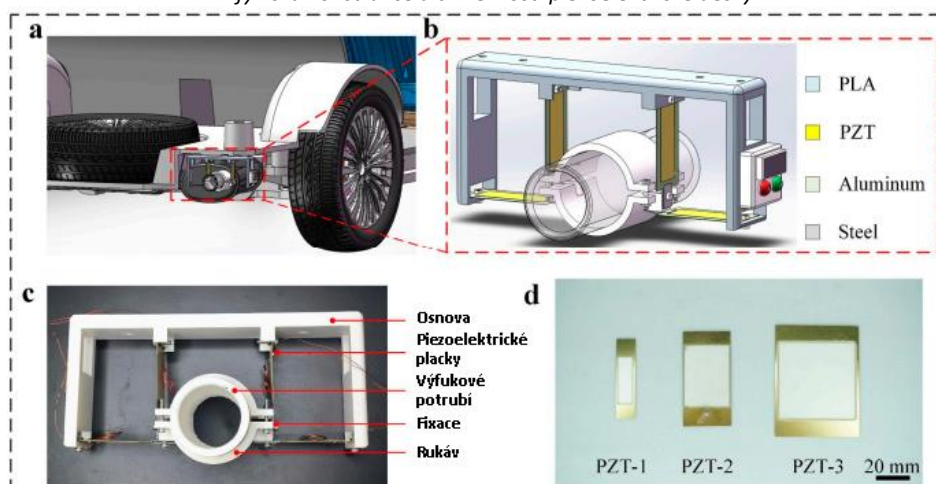
Energetická krize, v souvislosti s využíváním konečných zdrojů pro získávání elektrické energie a problémy poslední doby se znečištěným životním prostředím, například vzduchu, představuje velkou výzvu pro všechny oblasti, které využívají tyto zdroje energie. V posledních letech výzkum ohledně nových čistých zdrojů elektrické energie a způsoby zachycení ztracené (vedlejší) energie při provozu prokázal velký růst. Technologie, používané při zachycení ztracené energie a její následné použití, mohou pomoci snížit spotřebu paliva, ale nemohou úplně nahradit spalovací motor nebo elektrický generátor na elektrárně. Jsou většinou zaměřené na zvýšení energetické účinnosti u větších strojů.

Piezoelektrické generátory jsou zařízení, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou. Většinou se skládají z několika piezoelektrických elementů, které jsou mechanicky namáhané vnější silou, jako vibrací nebo tlakem. Piezoelektrický generátor je výjimečný přístroj pro velmi zvláštní aplikace než pro běžný způsob generace elektrické energie. Výstupné napětí piezoelektrického generátoru se může pohybovat od několika milivoltů až po několik set voltů, ale hlavní omezující faktor těchto generátorů je výstupní proud, který obvykle očekáváme na úrovni mikroampéru. Tento nízký výstupní proud nedovoluje používat piezoelektrické generátory na zařízeních, které mají velký výkon. Existují však metody pro zvýšení výkonu piezoelektrických generátorů, příkladně používání většího množství piezoelektrických elementů v sériovém nebo paralelním zapojení, ale toto řešení je v rozporu z jednou z hlavních výhod piezoelektrických materiálů – malý rozměr a možnost aplikace v úkonech s omezeným prostorem.

Zachycení vibrací ve výfukovém systému automobilu pomocí piezoelektrického generátoru

Konstrukce systému pro zachycení vibrací výfukového systému automobilu představuje umístění výfukového potrubí do speciálního zařízení, kterému se říká self-powered intelligent device (SPID) a je zobrazen na obrázku číslo 8. Zařízení představuje potrubí, do kterého se vkládá výfukové potrubí automobilu, ke kterému jsou připojeny 4 kovové desky s rovnoměrně rozloženým piezoelektrickým materiálem, v tomto případě titanit zirkoničnanu olovnatého (PZT). Vibrace při jízdě automobilu, a hlavně při procházení výfuku výfukovým potrubím, způsobují mechanické namáhání (tlak, tah, ohyb) na piezoelektrické desky, což vede k shromáždění nabitých částic na deskách, které schopné zachytit a dále používat. [16]

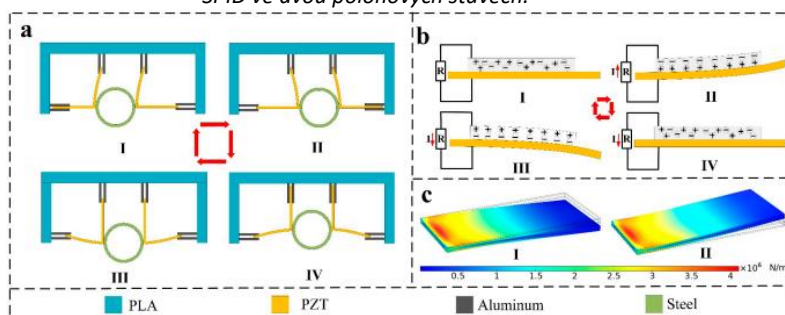
Obr. 8: Konstrukční návrh inteligentního zařízení s vlastním pohonem (SPID): (a,b) simulační sestava, a konstrukce a (c,d) fyzická konstrukce a tři velikosti piezoelektrické desky.



Zdroj: [19]

Konkrétní zařízení, které je na obrázku 8, dokáže vyprodukovat $6,6 \mu\text{W}$ elektrické energie z každé desky, což při paralelním zapojení desek dává $23,4 \mu\text{W}$ z celého zařízení. Zatím se pohybujeme v jednotkách mikrowattu, ale dané zařízení se objevilo v roce 2023, a je to pouze první prototyp daného typu zařízení. Self-powered intelligent device dokáže vyprodukovat dostatečné množství energie pro 35 LED žárovek nebo pro několik senzorů v automobilu. Teoreticky lze dané zařízení přizpůsobit nejen k výfukovému systému automobilu, ale i k zavěšení na konstrukci automobilu. [16]

Obr. 9: Princip fungování SPID: (a) schéma principu fungování inteligentního zařízení, (b) ukázka deformace a rozložení elektronů piezoelektrických destiček a (c) schéma fungování inteligentního zařízení. (c) simulované rozložení potenciálů SPID ve dvou polohových stavech.



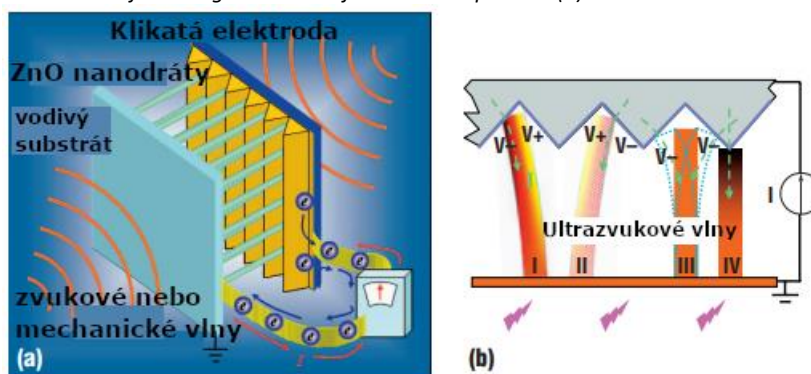
Zdroj: [19]

Piezoelektrické nanogenerátory (PENG)

Jsou jednou z nejnovějších oblastí využití piezoelektrických generátorů, ale už dokázaly generovat elektrickou energii pomocí velkého množství malých piezokrystalů umístěných mezi nanodráty. Ohyb piezokrystalů při působení vnější síly, jako vibrace nebo zvukové vlny, v souladu se spojenými poli nanodrátů dokáže generovat $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ elektrického výkonu.

Tyto piezoelektrické generátory zatím nebyly aplikovány v žádném zařízení, ale předpokládaná oblast aplikace je velmi široká, při dostatečném vývoji technologií. Autoři výzkumu předpokládají použití daného typu generace elektrické energie v různých druzích mobilních zařízení, což pomůže prodloužit dobu používání zařízení od jednoho nabití. Výhodou je možnost integrace dané látky do organických a neorganických materiálu, což představuje příležitost používat piezoelektrické nanogenerátory v biomedicinském inženýrství, jako zdroj energie pro malé senzory, integrované do lidského těla. Dlouhá životnost a malé rozměry piezoelektrických generátorů podporují tuto myšlenku. [17]

Obr. 10: (a) Schéma znázorňující nanogenerátor stejnosměrného proudu. (b) Schematické znázornění klikaté elektrody.



Zdroj: [20]

Tlakové piezogenerátory

Fungují na stejném principu přímého piezoelektrického jevu, ale používají se v případech, když potřebujeme nějaký elektrický impuls, pro řízení hlavního předmětu činnosti konkrétního zařízení. Nejběžnějším příkladem je malý tlakový piezogenerátor v zapalovači. Stisknutím tlačítka dokážeme získat jiskru pro zapálení plynu. Vědci se snaží implementovat dané piezogenerátory například do podlahy, pro sběr kinetické energie lidské činnosti, do střech budov, pro sběr kinetické energie padajících kapek deště, ale žádný významný pokrok v této oblasti během posledních let dosud nenastal.

5.3 Piezoelektrické motory a aktuátory

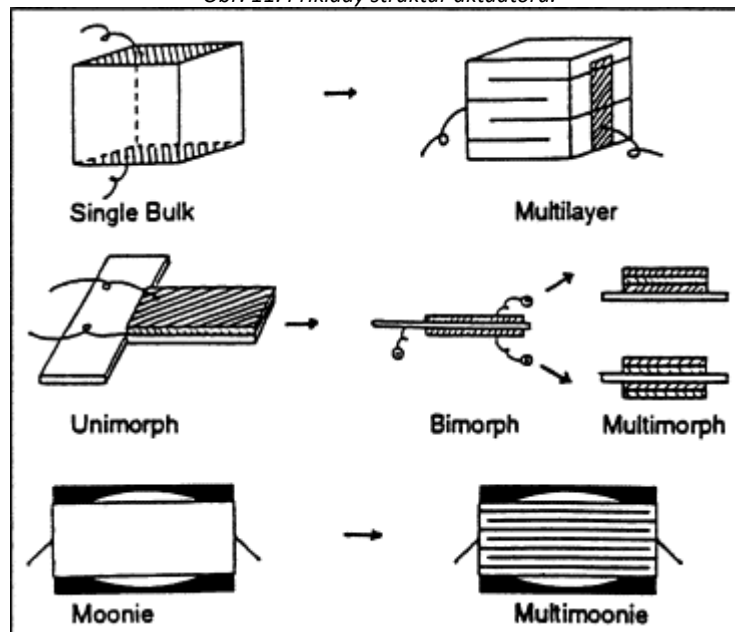
Piezoelektrické aktuátory jsou zařízení, která využívají obrácený piezoelektrický jev pro převádění elektrické energie na mechanickou. Používají se obvykle v širokém spektru aplikací, kde je požadována vysoká přesnost, rychlost odezvy, vysoká frekvence a malé rozměry.

Piezoelektrické aktuátory mohou být vyrobeny v různých formách a podobách, odpovídajících konkrétní úloze. Nejpoužívanější druhy piezoelektrických aktuátorů jsou

multivrstvové, biomorphy a unimorphy. Multivrstvový aktuátor se skládá z několika vrstev piezoelektrických materiálů, složených na sebe, umístěných mezi kovovými elektrodami. Jednotlivé vrstvy musí být umístěny v souladu se směrem, ve kterém potřebujeme vytvořit vibraci nebo mechanický posun. Biomorphy se skládají ze dvou piezoelektrických vrstev s obrácenou polarizací. Unimorphy obsahují jednu piezoelektrickou vrstvu, umístěnou na elastické kovové desce.

Piezoelektrické aktuátory mají řadu výhod oproti jiným typům aktuátorů. Hlavní výhodou je vysoká přesnost. Jsou malé, lehké a mají malý výkon. Také výhodou je vysoký frekvenční rozsah a možnost fungování při vysokých teplotách. Přes řadu výhod mohou být piezoelektrické aktuátory relativně drahé a požadují komplexní systém pro řízení, aby provazovaly s vysokou účinností. [18][19]

Obr. 11: Příklady struktur aktuátorů.



Zdroj: [21]

Piezoelektrický vstříkovač v 3D tiskárnách

Matice piezoelektrických mikroaktuátorů se používá jak v klasických barevných 2D tiskárnách, tak i v 3D tiskárnách. Obrázek 12H schématicky popisuje princip fungování vstříkovací jednotky. Každá vstříkovací jednotka v tiskárně obsahuje komoru pro toner, a multivrstvový aktuátor, umístěný vespod. Objem komory reguluje piezoelektrický aktuátor, v závislosti na velikosti přiloženého napětí. Počáteční rychlost každé kapky toneru může dosáhnout $1-5 \text{ m s}^{-1}$ a objem jednotlivých kapek 10^{-12} až 10^{-19} L . Vstříkovače v 3D tiskárnách fungují na stejném principu. Tento typ vstříkovačů se používá v tiskárnách,

protože vstřikovač dokáže vystřelit kapku přesného objemu s vysokou rychlostí vstřikování, což je vhodné pro tisk složitých 3D modelů. [21]

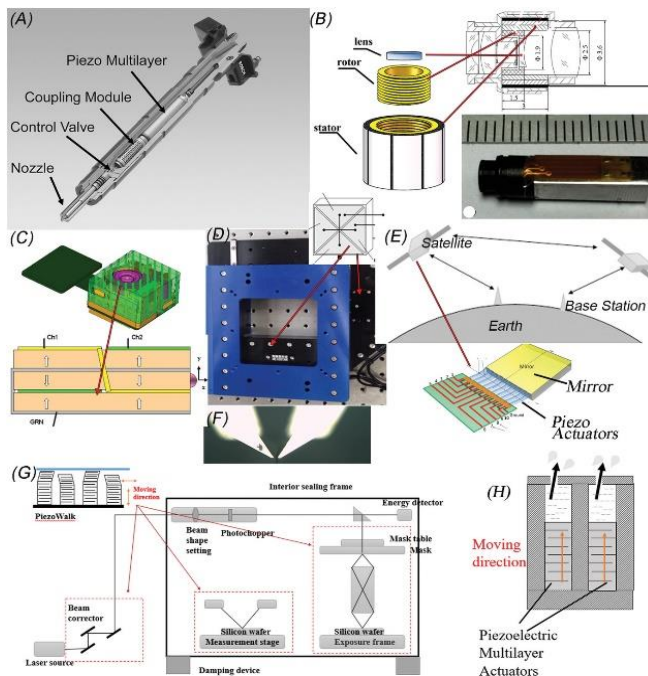
Piezelektrický vstřikovač v dieselovém motoru

Piezelektrické vstřikovače v dieselovém motoru mají řadu výhod, oproti tradičním typům vstřikovačů, běžně používaných v motorech, pro rychlé nastartování, malý hluk a zvýšenou účinnost spotřeby paliva. Piezelektrický vstřikovač se skládá ze sady multivrstvových piezoaktuátorů, spojovacího modulu, regulačního ventilu a trysky. Protože mají piezelektrické aktuátory mnohem kratší reakční dobu, mohou splnit požadavky na lokální tlak ve ventilu, pracovat na větší frekvenci vstřikování, což následně způsobuje zvýšení účinnosti využití paliva a snížení jeho spotřeby. Momentálně se v těchto vstřikovačích používá PZT keramika, ale byl vynalezen způsob používání piezelektrické keramiky PSN s příměsí BS-PT, což má velký potenciál nahradit PZT keramiku u vstřikovače a povolit jeho použití při vyšších teplotách. [21]

Piezelektrické mikromotory v medicínských endoskopech a kamerách

Piezelektrické aktuátory a motory se už nějakou dobu používají pro řízení čoček při optickém zaostřování nebo zoomování, jak v medicínských přístrojích, tak i v běžné elektronice s kamerou, jako jsou mobilní

Obr. 12: Příklady použití aktuátorů



Zdroj: [24]

elektronice s kamerou, jako jsou mobilní telefony nebo digitální kamery, kvůli jejich relativně vysoké přesnosti polohování a rychlosti polohování v omezeném prostoru samotného zařízení. Nedávno byla navržena integrovaná kompaktní čočka uvnitř piezelektrického mikromotoru o průměru 3,6 mm s lineárním pohybem po spirále v medicínském endoskopu, pro účely automatického zaostřování a automatického zoomování. Schématická struktura endoskopu s piezomotorem je na obrázku 12B. Čočka se pohybuje

přímo pomocí motoru, bez použití transmise, což zvětšuje přesnost polohování a pomáhá lékařům získávat snímky vyšší kvality.

Na obrázku 12C je zobrazen schématický nákres kamerového modulu s multivrstevným piezoelektrickým motorem uvnitř. Při testování bylo zjištěno, že byla pro automatické zoomování průměrná okamžitá spotřeba energií 65 mW. [21]

Piezoelektrický aktuátor pro digitální diagnostiku patologie.

Piezoelektrické motory a aktuátory se také používají v medicínském a bioinženýrském odvětví pro přesné operace, jako operace na buňkách nebo chirurgické zákroky s minimální invazí. Nedávno společnost Heidstar CO., LTD (Čína) vyvinula stroj pro digitální diagnostiku patologie. Samotný stroj se skládá z mikroskopu, který se může pohybovat ve 2D prostoru. Piezoelektrický aktuátor, který umožňuje pohyb po ose Z, a software pro automatické rozpoznávání snímku z mikroskopu a zpracování dat. Společnost dokázala dosáhnout rozsah snímání $100 \times 100 \text{ mm}^2$ s rozlišením kroku méně než 50 nm. [21]

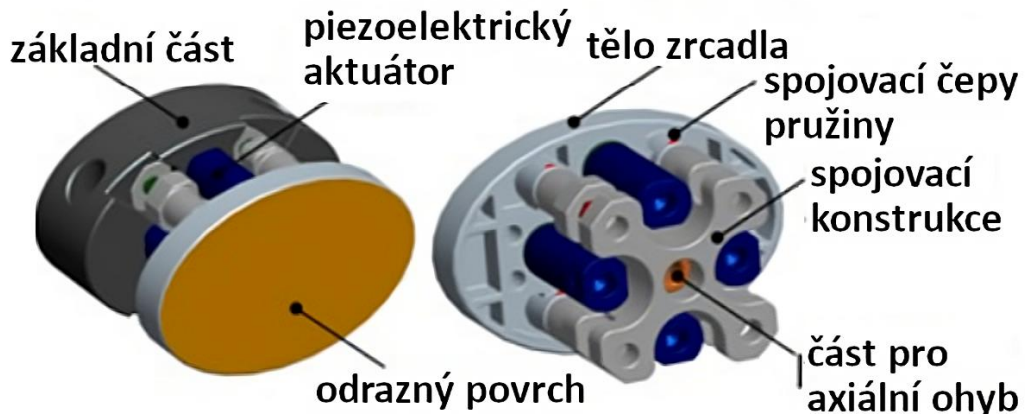
Piezoelektrický aktuátor pro optickou komunikaci mezi satelity.

Optická free-space komunikace mezi satelity je další odvětví, kde se lze využít výhody piezoelektrických materiálů a piezoelektrického jevu. Tento typ komunikace má několik výhod, proto tato oblast prochází rychlým vývojem pro: velkou vzdálenost, rychlejší přenos dat a velkou kapacitu. Na obrázku 12E je znázorněno schéma optické komunikace mezi dvěma geostacionárními družicemi nebo družicemi s nízkou oběžnou dráhou Země. Jeden z klíčových bodů ve vývoji optické free-space komunikační technologie je přesné a rychlé ovládání laserových paprsků. Například v projektu SILEX, který zahájila ESA (Evropská kosmická agentura), je požadována přesnost ovládaní laserového paprsku v řadě 6 μrad . Pro tyto účely, přesnost, vysoká frekvence pohybu a malé rozměry piezoelektrických aktuátorů, jsou dokonalé. Na obrázku 12E je zobrazen příklad možnosti ovládaní zrcadla pomocí piezoelektrického aktuátoru, působícího na rameno páky. Po přiložení napětí na piezoelektrický element lze vytvořit malý úhel odchylky, jak je vidět na obrázku 12E. V porovnání s elektromagnetickými motory, piezoelektrické aktuátory vykazují velkou převahu z hlediska objemu a hmotnosti, nízkou spotřebu energie, vysokou spolehlivost a vysokou přesnost. [20][21]

Fast steering mirror

Piezoelektrické aktuátory se používají v FSM (Fast steering mirror) soustavách. Fast steering mirror představuje zrcadlo, které je řízeno piezoelektrickými aktuátory. Zrcadlo odrazí namířený laser a díky piezoelektrickým aktuátorům dokáže posunout laser v řádu umrad a pracuje na velmi vysoké frekvenci. Soustavy s fast steering mirror se používají v automobilovém průmyslu (LiDAR, dynamické světlomety, ADAS), pro strojové vidění (rozšíření zorného pole, zoom), free-space communication (komunikace ve volném prostoru), biometrii (sledování očí), diagnostice (např. OCT, Fundus kamera), metrologii, 3D tisku. Piezoelektrické aktuátory se používají v daných systémech kvůli tomu, že mají rychlou odezvu, přesné polohování, malé rozměry, malý minimální krok posunu a práci na vysoké frekvenci, ale na úkor malého lineárního posunu nebo úhlu otáčení. [22][23]

Obr. 12: Architektura systému Fast Steering Mirror



Zdroj: [25]

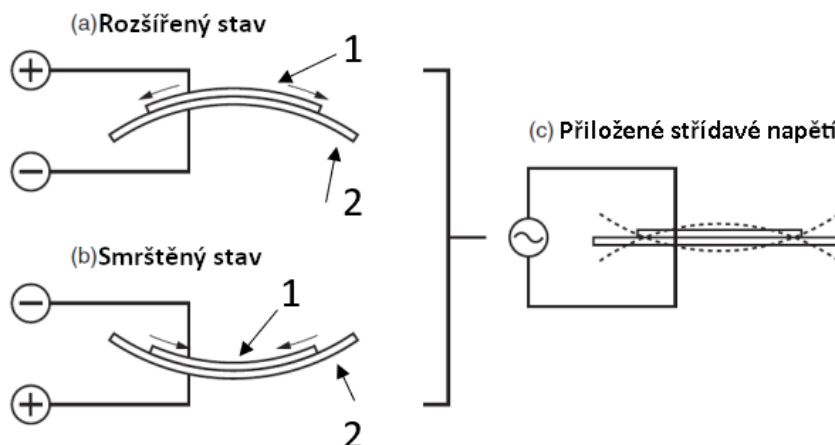
5.4 Zvuková a ultrazvuková zařízení

Piezoelektrické materiály se také používají v různých zvukových a ultrazvukových zařízeních, díky svým malým rozměrům, malé spotřebě energie a relativní jednoduchosti ovládání. Základní princip fungování piezoelektrických zvukových zařízení spočívá v předání kmitu piezoelektrického elementu na nějaký rezonátor nebo membránu, které pak produkuje zvukové vlny v okolním prostředí. Tento princip se používá v různých druzích zařízeních, jako piezoelektrické reproduktory, transduktory, tlumiče zvuku, ultrazvukové čisticí přístroje, sonary a mnoho dalších, díky základním výhodám piezoelektrických materiálu a vysokému frekvenčnímu rozsahu, od 1 do 100 kHz.

Reproduktory

Piezelektrický reproduktor je jedno z nejběžnějších zařízení, které využívá piezelektrický jev, se kterým se můžeme setkat v běžném životě. Velmi jednoduše se ovládá a funguje, má malé rozměry, a proto je velmi populární v aplikacích, kde vysoká kvalita zvuku není nutná, ale je požadována vysoká výška tónu zvuku a hlasitosti. Používají se v elektronických zařízeních, jako signalizační prvek, pro uživatele o změně stavu konkrétního zařízení nebo poruše součástky. Na obrázku 14 je schematicky znázorněn princip fungování piezelektrického reproduktoru. Piezelektrický materiál (1) se smrští při přiložení napětí a tím způsobuje ohyb membrány (2) na jednu stranu, pak při přiložení napětí opačné polarizace, se piezelektrický materiál prodlužuje. Tím způsobuje ohyb membrány v opačném směru. Řízením frekvence změny polarizace proudu lze řídit frekvenci zvuku, který vyvolává membrána. Zvuk piezelektrických reproduktorů nedosahuje dostatečné kvality poslechu hudby, bez složitých ovládacích systémů, ale pro zvuková oznámení je dostatečný. [24]

Obr. 13: Oscilace piezelektrického krystalu při přiložení napětí. 1 – piezelektrický krystal. 2 – membrána.



Zdroj: [27]

Tlumiče

Piezelektrické materiály se využívají i pro tlumení rušivého hluku nebo vibrací. V podstatě je to piezelektrický reproduktor nebo větší generátor vibrací, který produkuje zvukové vlny v opačné fázi k rušivému hluku. Tím se dokážeme zbavit rušivého hluku úplně nebo ho alespoň snížit na přijatelnou úroveň. Tento princip využití piezelektrických materiálů se především používá v elektronických zařízeních, jako jsou sluchátka nebo mikrofony. Lze ho použít i v průmyslu pro snížení vibrace strojů nebo pracovního vybavení,

za účelem prodloužení doby životnosti zařízení, výkonnosti a zlepšení pracovních podmínek pracovníků.

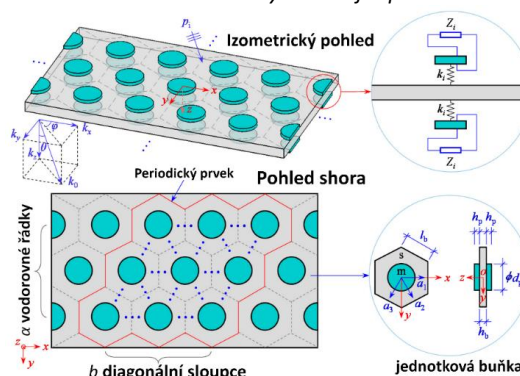
Širokopásmová zvuková izolace s piezoelektrickými rezonátory

V roce 2022 byl v Číně proveden výzkum ohledně návrhu nového metamateriálu, který obsahuje malé piezoelektrické rezonátory. Metamateriál – uměle vytvořený kompozitní materiál, obsahuje nové elektrické, magnetické a případně i optické vlastnosti, které se nevyskytují u běžných přírodních látek. Schématická struktura navrženého materiálu je znázorněna na obrázku 15. Metamateriál se skládá ze zvukově izolační vrstvy (šedě), na které jsou umístěny propojené piezoelektrické elementy (modře). Řízením piezoelektrických elementů dokážeme vyvolat kmitací vrstvy, což vyvolá potřebné zvukové vlny pro tlumení rušivého hluku. Tloušťka daného metamateriálu nepřesahuje 5 mm, což rozšiřuje oblast jeho použití. [25]

Autoři tohoto materiálu dosáhli ve své práci následujících výsledků:

- Současný metamateriál je vynikající látka pro tlumení hluku, který má ekvivalentní zápornou povrchovou hustotu (Surface Density, SD) a ekvivalentní zápornou ohybovou tuhost (Bending Swtiffness, BS).
- Špičky zvukové izolace odpovídají ekvivalentní záporné povrchové hustotě, resp. záporné ohybové tuhosti, které jsou přisuzovány střídavě rozloženým piezoelektrickým rezonátorům a rezonančním obvodům kdy multimodální rezonanční režimy rozptylu energie účinně rozšiřují horní frekvenční mez zlepšené oblasti.
- Odporové a induktivní prvky ve vnějším RL obvodu slouží pro změnu k potlačení amplitudy ekvivalentní záporné ohybové tuhosti u tohoto metamateriálu a k modulaci rezonanční frekvence tohoto obvodu, podobně jako tlumící a pružící prvky v mechanickém systému.
- Zvuková izolace tohoto metamateriálu při nízkých a středních frekvencích je lepší než u substrátu o více než 5 dB, dokonce až o 44,49 dB. [25]

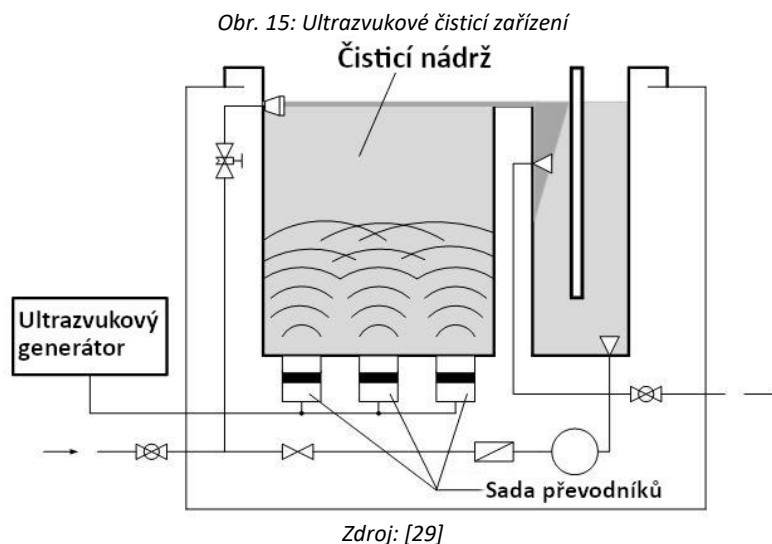
Obr. 14: Schéma metamateriálové tenké desky obsahující piezoelektrická pole s rezonančními bočníky



Zdroj: [28]

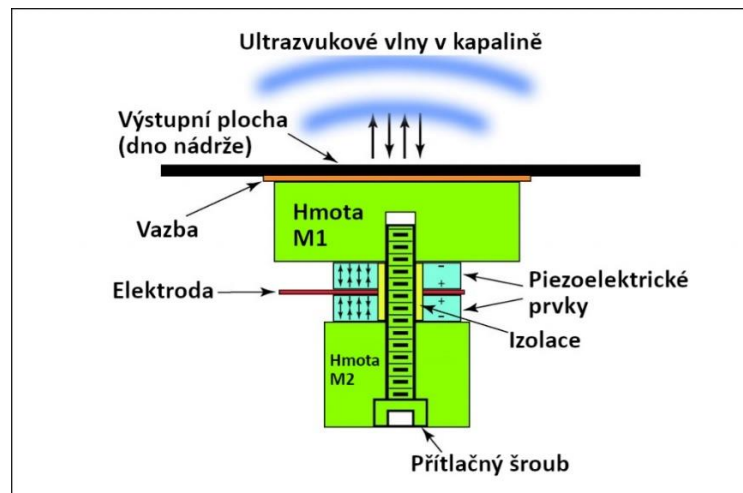
Ultrazvukové čištění v produkci ovoce a zeleniny

Čištění pomocí ultrazvuku, také nazývaná ultrazvuková terapie nebo sonikace, se používá k odstraňování nečistot a usazenin z různých materiálů a povrchů, jako jsou kovy, sklo, plast nebo keramika. Typický příklad ultrazvukového čističe je uveden na obrázku 15. Je to relativně jednoduchý, z hlediska konstrukce, přístroj. V základní variantě se skládá z ultrazvukového generátoru, kovové nebo plastové bedny a piezoelektrických transduktorů, umístěných na spodní části bedny. Ultrazvukový generátor vysílá signál na piezoelektrické transduktory, které pak vytváří ultrazvukové vlny ve vodě nebo v jiné kapalině, umístěné v bedně, a to způsobuje čištění předmětů, umístěných v bedně. Většina ultrazvukových čističů pracuje na frekvenci kolem 43 kHz. [28]



Důležitější prvek daného přístroje je piezoelektrický transduktor, který generuje ultrazvukové vlny v kapalině. Na obrázku 16 je schematicky znázorněn příklad piezoelektrického transduktoru pro generaci ultrazvukových vln v kapalině. Hlavní součástí daného transduktoru je piezoelektrický „sendvič“, umístěn mezi dvěma kovovými bloky. Kovové bloky a desky jsou spojeny jedním nebo více šrouby. Tato konstrukce má mnohem nižší vlastní rezonanční frekvenci ve srovnání se stejnou frekvencí vibračních desek, a co je důležitější, umožňuje generovat ultrazvuk vysoké intenzity. Pro ultrazvukové měniče energie je charakteristické, že pracují ve stavu mechanické rezonance. V tomto případě se tedy vlnová frekvence napájecího napětí musí rovnat vlastní frekvenci transduktoru. [28]

Obr. 16: Typický ultrazvukový převodník.



Zdroj: [30]

Toto čištění se už používá v mnoha různých oblastech, včetně průmyslového, zdravotnického a kosmetického odvětví. Nedávno (16.09.2022) byl publikován výzkum s návrhem použití ultrazvukového čištění v celém procesu zpracování ovoce a zeleniny. Navržený stroj se skládá z několika boxů, kde probíhá samotné čištění, a dopravníkového pásu, který umožňuje automatizaci celého procesu. I přes mnoho výhod ultrazvukového čištění v dané oblasti, byly objeveny i vady, jako poškození vnitra zeleniny a ovoce a hluk při čištění. V provozu by hluk ultrazvukových čističů nevedl, pokud by nedocházelo k poškození nitra ovoce a zeleniny. V důsledku dalšího budoucího výzkumu pro jemné doladění frekvence, teploty, čisticího média a všeobecně celého procesu se zdá, že se jedná o užitečný stroj pro budoucnost zpracování rostlinné produkce.

Regenerace kostí pomocí piezoelektriky

Piezoelektrické aktuátory byly zkoumány z hlediska jejich potenciálu při regeneraci kostí. Piezoelektrické materiály, jako je titaničitan olovnatý (PZT), generují elektrický náboj, když jsou vystaveny mechanickému namáhání nebo tlaku. Tento elektrický náboj může stimulovat kostní buňky, což vede k růstu a regeneraci kostí.

Při regeneraci kostí se piezoelektrické aktuátory obvykle používají v kombinaci se scaffoldem, který slouží jako šablona pro růst nové kosti. Piezoelektrické aktuátory jsou zabudovány do scaffoldu a slouží k mechanickému namáhání šablony. Toto mechanické napětí vytváří elektrický náboj, který může stimulovat kostní buňky a podpořit růst kosti.

Ve studii od Chunyu Yang na téma „Aplikace piezoelektrických materiálů a zařízení pro regeneraci kostí“ byl navržen model piezoelektrického nanovlákná pro regeneraci kostí. Piezoelektrické nanovlákná (v roli aktuátoru) se umístí na defektním úseku kosti a za stimulace vnějším zdrojem, začíná vibrovat, tím způsobuje stimulaci buněk v kosti a pomáhá jí rychleji růst.

Celkově se piezoelektrické aktuátory jeví jako slibný potenciální nástroj pro regeneraci kostí. K úplnému pochopení jejich potenciálu a optimalizaci jejich použití pro konkrétní aplikace regenerace kostí je zapotřebí dalšího výzkumu. [29]

Obr. 17: Použití biologicky rozložitelných piezoelektrických nanovláken PLLA v kombinaci s neinvazivním ultrazvukem



Zdroj: [32]

6 Ekonomické hodnocení piezoelektrických dlaždic

Piezoelektrické dlaždice jsou novou a inovativní technologií, která je navržena tak, aby využívala mechanickou energii vznikající při krocích a přeměňovala ji na elektrickou energii. Tyto dlaždice využívají jedinečné vlastnosti piezoelektrických materiálů, které při mechanickém namáhání nebo tlaku generují elektrický náboj.

Piezoelektrické dlaždice jsou obvykle vyrobeny z titaničitana olovnatého (PZT), polyvinylidenfluorida (PVDF) nebo jiných keramik a polymerů, které vykazují piezoelektrické vlastnosti. Při tlaku na piezoelektrickou dlaždici, způsobí tlak stlačení nebo deformaci piezoelektrického materiálu. Tato deformace změní uspořádání krystalové struktury, což následně vytvoří elektrický náboj. Vytvořený elektrický náboj je pak odebírán elektrodami připevněnými k piezoelektrickému materiálu. Elektrickou energii lze ukládat do baterií nebo kondenzátorů nebo ji přímo využít k napájení zařízení s nízkou spotřebou, jako jsou LED světla, elektronické displeje nebo senzory. Množství vyrobené energie závisí na velikosti a účinnosti piezoelektrického materiálu a také na síle působící na dlaždici.

Piezoelektrické dlaždice lze instalovat na různých místech s vysokým provozem, jako jsou chodníky, stanice metra, nákupní centra, školy a letiště. Díky přeměně mechanické energie na elektrickou představují tyto dlaždice udržitelný a ekologický způsob výroby energie pro různé účely. V závislosti na rozsahu instalace je lze použít k napájení pouličního osvětlení, nabíjení elektronických zařízení nebo dokonce k napájení rozvodné sítě.

Piezoelektrické dlaždice nabízejí několik výhod, například:

- Výroba energie z obnovitelných zdrojů: Piezoelektrické dlaždice mohou vyrábět elektřinu po celou dobu jejich provozu, což z nich činí obnovitelný zdroj energie.
- Snížení uhlíkové stopy: Využitím energie generované z kroků, může piezoelektrická dlažba pomoci snížit poptávku po energii z tradičních zdrojů, které jsou často závislé na spalování fosilních paliv.
- Všestrannost: Tyto dlaždice lze začlenit do různých prostředí v interiéru i exteriéru a využívat tak energii z každodenních lidských činností.
- Nízké nároky na údržbu: Díky své polovodičové povaze vyžadují piezoelektrické materiály minimální údržbu, což z nich činí odolný a spolehlivý zdroj energie.

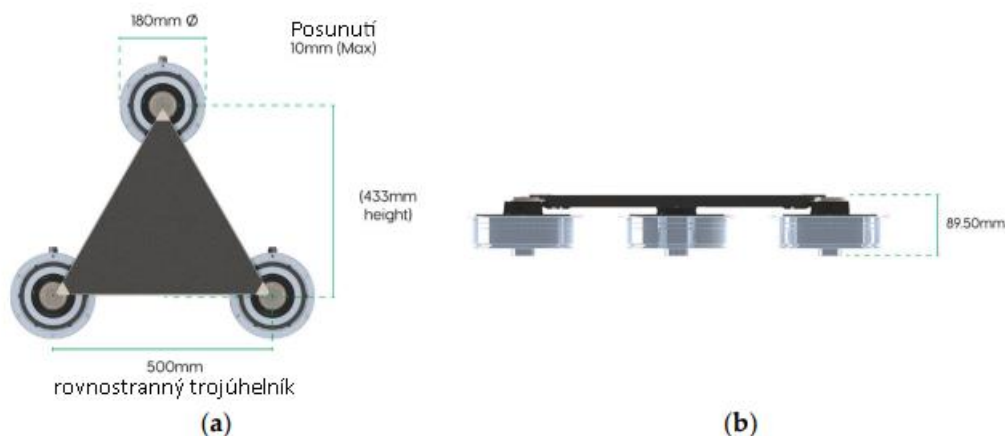
Navzdory výhodám je v současné době rozšíření piezoelektrických dlaždic omezeno faktory, jako jsou vysoké výrobní náklady, nižší účinnost přeměny energie ve srovnání s jinými obnovitelnými zdroji energie a potřeba rozsáhlé infrastruktury, kvůli významnému ovlivnění výroby energie. Probíhající výzkum a vývoj v oblasti piezoelektrických

materiálů a technologií má však potenciál zlepšit účinnost, snížit náklady a zvýšit praktičnost piezoelektrických dlaždic pro široké využití do budoucna. [30][31]

6.1 Rozbor piezoelektrických dlaždic

Ekonomická analýza bude provedena na příkladě piezoelektrických dlaždic od společnosti Pavegen Systems Ltd, která se už od roku 2009 zabývá návrhem a aplikací piezoelektrických dlaždic pro generace elektrické energie. Zařízení se skládá ze samotné dlaždice, vyrobené z kompozitního materiálu, umístěné na třech piezoelektrických generátorech.

Obr. 18: Schematická konstrukce piezoelektrických dlaždic. Pohled shora (a) a pohled z boku (b)



Zdroj: [30]

Je navržena tak, aby se při každém kroku stlačila o 5 mm a dokázala uchovávat energii po dobu 3 dnů. Průměrná životnost dlaždice Pavegen je přibližně 10-20 let. Každý krok generuje 2-8 W elektrického výkonu, v závislosti na hmotnosti zátěže, poloze kroku, počasí a jiných faktorech. [30]

Obr. 20: Piezoelektrický generátor.



Zdroj: [30]

6.2 Případová studie

Případová studie se uskutečnila v budově Studentské unie, kde bylo na schodiště instalováno 8 dlaždic Pavegen. Ekonomické hodnocení bylo provedeno se zvýšenou přesností rozdělením analýzy do tří podkategorií: redukce dat, analýza citlivosti dat a odhad ekonomických ukazatelů. Instalace osmi dlaždic Pavegen V3[®] stála 30 800 \$, bez nákladů na údržbu.

Redukce dat se týká procesu shromažďování výchozích údajů pro výpočet hodnot roční výroby energie. Analýza citlivosti dat má za cíl určit změny vstupních hodnot potřebných k dosažení stavu rentability. Nakonec se na základě výsledků redukce dat použijí ekonomické ukazatele k odhadu ekonomických podmínek, jako je čistá současná hodnota (NPV), vnitřní výnosové procento (IRR) a doba návratnosti (PBP). Pro účely výpočtu výsledků se předpokládalo, že průměrná životnost dlaždic Pavegen je 20 milionů kroků. Z výpočtů tak byla získána následující tabulka 2.

Tab. 2: Shrnutí výroby energie a ekonomických výpočtů

Vstupní data	Hodnoty(1 dlaždice)	Výsledky	Hodnoty (8 dlaždic)
Jednotkové kroky/den (zima)	500	Celkové kroky/rok	1,2 milionu
Jednotkové kroky/den (léto)	$zima/2 = 250$	Jednotková životnost v letech	13,12 roku
Celková životnost jednotky v počtu kroků	2 000 000	Celková energie/rok	1,016 KWh nebo 3,7 milionu J
Energie/krok	$3 W * 1 s = 3 J$	Celková hodnota energie/rok	+0,1016 \$/rok
Sazba energie BC Hydro	0,10 \$/KWh	Potenciální energie po dobu životnosti	13,33 KWh
		Potenciální hodnota energie za celou dobu životnosti	+1,33 \$ celkem

Zdroj: [34]

Následně byla provedena citlivostní analýza, která byla zaměřena na zjištění změny, potřebné pro vstupy tak, aby bylo dosaženo bodu zvratu, kdy se náklady na nákup a instalaci rovnají ekonomické hodnotě energie vyrobené po celou dobu životnosti dlaždic Pavegen. Získané výsledky jsou jednoznačně nereálné. Jak je patrné z tabulky 3, potřebná změna vstupních hodnot v procentech je reálně nedosažitelná.

Tab. 3: Citlivostní analýza

Položka	Odhad	Hodnota pro dosažení bodu zvratu	Procentuální změna
Jednotkové kroky/den	500	12 657 534	25 315%
Energie/krok	3 J	69 300 J	23 100%
Náklady na energii	0,10 \$/KWh	2 310 \$/KWh	23 100%
Životnost výrobku	2 000 000	46 200 000 000	23 100%

Zdroj: [34]

Ekonomické ukazatele, použité v této studii, zahrnují: čistou současnou hodnotu (NPV), vnitřní výnosové procento (IRR) a dobu návratnosti (PBP). NPV udává, jaký je ekonomický zisk nebo ztráta za dobu životnosti projektu. Vnitřní výnosové procento (IRR) označuje úrokovou sazbu nutnou k dosažení bodu rentability, jehož výsledkem je nulová čistá současná hodnota (NPV). Společnosti obvykle stanovují minimální přijatelnou míru návratnosti (MARR), aby určily životaschopnost investice. Projekty s IRR nižší než MARR jsou zpravidla zamítnuty, zatímco ty, které jsou vyšší než MARR, jsou seřazeny podle cílů společností. Záporné hodnoty NPV a IRR znamenají ekonomickou ztrátu, zatímco kladné hodnoty naznačují ekonomický zisk. Oba ukazatele by měly být v ideálním případě maximalizovány.

Doba návratnosti (PBP) udává dobu potřebnou ke zpětnému získání všech nákladů na projekt, s ohledem na všechny budoucí peněžní toky upravené na jejich současné hodnoty. Pokud PBP přesáhne dobu životnosti projektu, dochází k ekonomické ztrátě. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 4. Použitá míra inflace je 2,0% podle Kanadské centrální banky.

Tab. 4: Ekonomické ukazatelé

Ukazatel:	NPV	IRR	PBP
Hodnota:	-\$30 225.47	-66.25%	303 149 let

Zdroj: [34]

Celkově lze říct, že ekonomická analýza ukazuje, že instalace dlaždic Pavegen přináší minimální návratnost investic s odhadovanou ekonomickou ztrátou \$30 244,27. Záporná IRR je výrazně nižší než MARR jakékoli organizace. Aby bylo dosaženo bodu rentability, muselo by všech osm dlaždic fungovat 303 149 let, což je nedosažitelné vzhledem k tomu, že zařízení je třeba vyměnit přibližně každých 13 let, jak je uvedeno v tabulce 2.

Samotná ekonomická ztráta by však neměla být jediným rozhodujícím faktorem pro zamítnutí projektu. Hlavním cílem projektu, jak uvádí předkladatel, je dosažení pozitivních sociálních přínosů a zvýšení povědomí o udržitelnosti. V důsledku toho se klíčovou otázkou stává, zda sociální a environmentální faktory ospravedlňují vynaložené náklady.

V budoucnu, aby daná technologie měla i ekonomický přínos, několik faktorů by se mělo změnit. Vývoj v oblasti generace energie pomocí piezoelektrických materiálů neustále pokračuje, takže můžeme očekávat zvětšení množství generované energie od jednotlivých dlaždic (v kontextu výpočtu v případové studii – jednotlivých kroků). Kromě toho, s vývojem technologií můžeme očekávat snížení ceny na výrobu samotných dlaždic a piezoelektrických generátorů. To znamená, že při růstu ceny na elektrickou energii, tato technologie bude mít lepší ekonomický účinek. Nedokážeme však pomocí piezoelektrických generátorů nahradit tradiční zdroje elektrické energie, ale může to být pomocným zdrojem zelené elektrické energie, zejména v době, kdy klimatická krize se opravdu rychle rozrůstá.

[32][33][34]

7 Závěr

Piezoelektrický jev je neustálým předmětem výzkumu posledních let. Množství vědeckých článků a probíhajících výzkumů v posledních letech roste kvůli unikátním vlastnostem piezoelektrických materiálů. Trend se zmenšováním rozměru elektrických zařízení a snižováním jejich energetické náročnosti se neustále rozvíjí a piezoelektrické materiály vyhovují tomuto trendu nejvíce.

Piezoelektrický jev se už uplatňuje v různých oblastech a výzkum, který neustále probíhá, bude postupně otevírat nové možnosti pro aplikace tohoto jevu. Jak vyplývá z provedené rešerše, v současné době piezoelektrický jev a piezoelektrické materiály se nejvíce používají v aktuátorech, senzorech a zvukových zařízeních. V těchto zařízeních se piezoelektrický jev a piezoelektrické materiály používají už poměrně dávno, kvůli velmi přesným aplikacím jsou naprosto nepostradatelné.

V oblasti generace elektrické energie situace nevypadá tak dobře. Na jedné straně piezoelektrické materiály nabízejí výjimečnou možnost získávání energie z různých zdrojů, což může přispět k udržitelnějším energetickým řešením a snížit naši závislost na fosilních palivech. Na druhé straně se současný stav piezoelektrické technologie vyznačuje vysokými počátečními náklady a relativně nízkou úrovní výroby energie, což může omezovat její široké využití. Všechno se může změnit stálým technologickým pokrokem.

Ekonomická analýza provedená v této práci poskytla cenné poznatky o faktorech ovlivňujících životaschopnost piezoelektrických aplikací. Zatímco některé aplikace, jako například dlaždice Pavegen, nemusí být ještě ekonomicky rentabilní pro nasazení ve velkém měřítku, ukazují se jako slibné ve výklenkových aplikacích a oblastech s vysokou návštěvností, kde je jejich potenciál pro sběr energie maximální. S rozvojem technologie a snižováním nákladů se očekává, že trh s piezoelektrickými aplikacemi poroste, a to díky zvýšenému povědomí o otázkách životního prostředí a potřebě čistých energetických řešení.

Závěrem lze říci, že tato bakalářská práce poskytla ucelený přehled o piezoelektrickém jevu a jeho aplikacích a zdůraznila potřebu pokračovat ve výzkumu a vývoji, aby bylo možné překonat současná omezení a plně využít jeho potenciál. Vzhledem k tomu, že svět usiluje o přijetí udržitelnějších a ekologičtějších energetických řešení, piezoelektrická technologie by mohla hrát významnou roli při utváření naší energetické budoucnosti.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] PIEZOELECTRICITY. APC International Ltd. [online]. Mackeyville: APC International, 2021 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- [2] JORDAN, T L a Nasa LANGLEY. Piezoelectric Ceramics Characterization. Contract [online]. 2001, 23. Dostupné z: doi:NASA/CR-2001-211225 ICASE Report No. 2001- 28.
- [3] PETRŽÍLKA, Václav. Piezoelektrina a její technické použití. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1960.
- [4] Journal of the European Ceramic Society. 2021. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2021. ISSN 0955-2219.
- [5] Doc.Mgr. Jiří Erhart, Ph.D. Základy piezoelektriny pro aplikace. Brno, 2011. Učební texty k semináři. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] UCHINO, Kenji. Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition) [online]. Woodhead Publishing, 2017 [cit. 2023-02-19]. ISBN 9780081021354. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021354000011>
- [7] SKÁCEL, Vladimír, Jana FIEDLEROVÁ a Karel NEJEZCHLEB. Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice [online]. 2006 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>
- [8] CO-FIRED PIEZOELECTRIC ACTUATORS. Thorlabs.de [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/NewGroupPage9_PF.cfm?Guide=10&Category_ID=28&ObjectGroup_ID=61#:~:text=These%20open%2Dloop%20piezoelectric%20actuators,solely%20based%20on%20applied%20voltage.
- [9] MANIFOLD OF FUNCTIONAL UNITS. Piezotransfer [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.piezotransfer.de/index.php?id=13&L=1>
- [10] ZHANG, Z. H., J. W. KAN, X. C. YU, S. Y. WANG, J. J. MA a Z. X. CAO. Sensitivity enhancement of piezoelectric force sensors by using multiple piezoelectric effects. AIP Advances [online]. 2016, 6(7) [cit. 2023-03-26]. ISSN 2158-3226. Dostupné z: doi:10.1063/1.4960212
- [11] MĚŘENÍ TLAKU. PRŮMYSLOVÉ SNÍMAČE TLAKU. Profess [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: https://www.profess.cz/cs/pci/produkty/mereni_tlaku/prumyslove_snimace_tlaku/rychly-snimac-tlaku-pro-hydraulicke-systemy
- [12] Introduction to Dynamic Pressure Sensors. PCB Piezoelectronics [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-pressure-sensors>
- [13] Introduction to ICP® Accelerometers. PCB Piezoelectronics [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>
- [14] NAZEMI, Haleh, Aashish JOSEPH, Jaewoo PARK a Arezoo EMADI. Advanced Micro- and Nano-Gas Sensor Technology: A Review. Sensors [online]. 2019, 19(6) [cit. 2023-03-02]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19061285
- [15] Journal of Materials Science: Materials in Electronics. Norwell: Kluwer Academic Publishers. ISSN 0957-4522.
- [16] HUANG, Jie, Cheng XU, Nan MA, Qinghui ZHOU, Zhaohua JI, Chunxia JIA, Shan XIAO a Peng WANG. Intelligent Device for Harvesting the Vibration Energy of the Automobile Exhaust with a Piezoelectric Generator. Micromachines [online].

- 2023, 14(2) [cit. 2023-03-04]. ISSN 2072-666X. Dostupné z:
doi:10.3390/mi14020491
- [17] WANG, Xudong a Jian SHI. Piezoelectric Nanogenerators for Self-powered Nanodevices. In: CIOFANI, Gianni a Arianna MENCIASSI, ed. Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, 2012, s. 135-172 [cit. 2023-03-04]. Nanomedicine and Nanotoxicology. ISBN 978-3-642-28043-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-28044-3_5
- [18] UCHINO, K. Multilayer Ceramic Actuators. In: Encyclopedia of Materials: Science and Technology [online]. Elsevier, 2001, 2001, s. 5850-5858 [cit. 2023-03-26]. ISBN 9780080431529. Dostupné z: doi:10.1016/B0-08-043152-6/01019-6
- [19] GAO, Xiangyu, Jikun YANG, Jingen WU, Xudong XIN, Zhanmiao LI, Xiaoting YUAN, Xinyi SHEN a Shuxiang DONG. Piezoelectric Actuators and Motors: Materials, Designs, and Applications. Advanced Materials Technologies [online]. 2020, 5(1) [cit. 2023-03-10]. ISSN 2365-709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.201900716
- [20] SODNIK, Zoran, Bernhard FURCH a Hanspeter LUTZ. Free-Space Laser Communication Activities in Europe: SILEX and beyond. In: LEOS 2006 - 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 78-79 [cit. 2023-03-06]. ISBN 0-7803-9556-5. Dostupné z: doi:10.1109/LEOS.2006.278845
- [21] GAO, Xiangyu, Jikun YANG, Jingen WU, Xudong XIN, Zhanmiao LI, Xiaoting YUAN, Xinyi SHEN a Shuxiang DONG. Piezoelectric Actuators and Motors: Materials, Designs, and Applications. Advanced Materials Technologies [online]. 2020, 5(1) [cit. 2023-03-12]. ISSN 2365-709X. Dostupné z: doi:10.1002/admt.201900716
- [22] F. MOKBEL, Hany, Wan YUAN, Lv QIONG YING, Cao GUO HUA a Amr A. ROSHDY. Research on the Mechanical Design of Two-Axis Fast Steering Mirror for Optical Beam Guidance. In: Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2012, 2012, - [cit. 2023-03-12]. ISBN 978-90-78677-59-8. Dostupné z: doi:10.2991/mems.2012.137
- [23] Fast steering mirrors Overview. Optotune [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.optotune.com/fast-steering-mirrors>
- [24] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, JAVIER. HIGH-FIDELITY PIEZOELECTRIC LOUDSPEAKER [online]. United Kingdom, 2014 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: https://oa.upm.es/33068/8/TFG_javier_fernandez_martinez.pdf. PROYECTO FIN DE GRADO. UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. Vedoucí práce DR. KEITH R. HOLLAND.
- [25] ZHANG, Zhifu, Jiakuan WANG, Zhuang LI a Xirui ZHANG. Broadband Sound Insulation and Dual Equivalent Negative Properties of Acoustic Metamaterial with Distributed Piezoelectric Resonators. Materials [online]. 2022, 15(14) [cit. 2023-03-27]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15144907
- [26] FABIJANSKI, Pawel a Ryszard LAGO. Modeling and Identification of Parameters the Piezoelectric Transducers in Ultrasonic Systems. In: SIKALIDIS, Costas, ed. Advances in Ceramics - Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment [online]. InTech, 2011, 2011-09-06 [cit. 2023-03-27]. ISBN 978-953-307-350-7. Dostupné z: doi:10.5772/21619
- [27] FUCHS, John. Ultrasonics – Transducers – Piezoelectric Hardware. Cleaning Technology Group [online]. 2012-01-04 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z:

- <https://techblog.ctgclean.com/2012/01/ultrasonics-transducers-piezoelectric-hardware/>
- [28] ZHOU, Wenhao, Frederick SARPONG a Cunshan ZHOU. Use of Ultrasonic Cleaning Technology in the Whole Process of Fruit and Vegetable Processing. *Foods* [online]. 2022, 11(18) [cit. 2023-03-18]. ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods11182874
- [29] YANG, Chunyu, Jianying JI, Yujia LV, Zhou LI a Dan LUO. Application of Piezoelectric Material and Devices in Bone Regeneration. *Nanomaterials* [online]. 2022, 12(24) [cit. 2023-03-18]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano12244386
- [30] PAVEGEN V3. Wevolver [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/specs/pavegen.v3>
- [31] LI, Xiaofeng a Vladimir STREZOV. Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, 85, 435-442 [cit. 2023-03-18]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.05.096
- [32] VISCONTI, Paolo, Laura BAGORDO, Ramiro VELÁZQUEZ, Donato CAFAGNA a Roberto DE FAZIO. Available Technologies and Commercial Devices to Harvest Energy by Human Trampling in Smart Flooring Systems: A Review. *Energies* [online]. 2022, 15(2) [cit. 2023-03-18]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15020432
- [33] BEKZHANOVA, Zere, Sabina KUMAROVA a Symbat SEITZHAN. The Application of Piezoelectric Technology for Human Energy Harvesting in Korea and Kazakhstan [online]. 2019 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.32381.51689
- [34] CROCKETT, Shawn, Lukas FLEMING a Saeromi KIM. An investigation into triple bottom line value of Pavegen tiles : installation at UBC [online]. 2012-08-20 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: doi:10.14288/1.0108406
- [35] SEKHAR, Madunuri Chandra, Eshwarappa VEENA, Nagasamudram Suresh KUMAR, Kadiyala Chandra Babu NAIDU, Allam MALLIKARJUNA a Dudekula Baba BASHA. A Review on Piezoelectric Materials and Their Applications. *Crystal Research and Technology* [online]. 2023, 58(2) [cit. 2023-03-27]. ISSN 0232-1300. Dostupné z: doi:10.1002/crat.202200130
- [36] Návod na výrobu levného a přitom kvalitního snímače pro akustické hudební nástroje. *ELEKTROAKUSTIKA* [online]. b.r. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <http://www.elektroakustika.cz/snimac.html>

Seznam obrázků

- Obr. 1: Vnější síla působící na iontový krystal
- Obr. 2: Polarizace piezokeramiky.
- Obr. 3: Křivka citlivosti piezoelektrického snímače síly.
- Obr. 4: Snímač tlaku Baumer PDRD-E002.S14.C.360.00
- Obr. 5: Průřez křemenného snímače tlaku.
- Obr. 6: Průřez křemenného snímače vibrací s piezoelektrickým krystalem
- Obr. 7: Schematický pohled na typický QCM senzor
- Obr. 8: Konstrukční návrh inteligentního zařízení s vlastním pohonem (SPID)
- Obr. 9: Princip fungování SPID
- Obr. 10: (a) Schéma znázorňující nanogenerátoru. (b) Schematické znázornění klikaté elektrody.
- Obr. 11: Příklady struktur aktuátorů.
- Obr. 13: Architektura systému Fast Steering Mirror
- Obr. 14: Oscilace piezoelektrického krystalu při přiložení napětí
- Obr. 15: Schéma metamateriálové tenké desky obsahující piezoelektrická pole s rezonančními bočníky
- Obr. 16: Ultrazvukové čisticí zařízení
- Obr. 17: Typický ultrazvukový převodník
- Obr. 18: Použití biologicky rozložitelných piezoelektrických nanovláken PLLA v kombinaci s neinvazivním ultrazvukem
- Obr. 19: Schematická konstrukce piezoelektrických dlaždic

Seznam tabulek

- Tab. 1: Přehled populárních piezoelektrických materiálů a jejich základní vlastnosti
- Tab. 2: Shrnutí výroby energie a ekonomických výpočtů
- Tab. 3: Citlivostní analýza
- Tab. 4: Ekonomické ukazatele