

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití energie piezoelektrického jevu

**vedoucí práce: Ing. Jan Beneš
autor: Lukáš Pastorek**

2012

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřená na popis stávajících energetických aplikací využívajících energii piezoelektrického jevu a zhodnocení tohoto zdroje z pohledu energetického, environmentálního a ekonomického.

Klíčová slova

Polarizace, náboj, krystal, krystalická mřížka, deformace, Energy Harvesting, piezoelektrický jev.

Abstract

The present thesis is focused on the description of existing energy applications using piezoelectric energy effect and evaluation of this source in terms of energy, environmental and economic.

Key words

Polarization, charge, crystal, crystalline lattice, deformation, Energy Harvesting, piezoelectric effect.

Prohlášení

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

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Benešovi za jeho trpělivost a připomínky týkající se této práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	10
1.1 HISTORIE VZNIKU PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	10
1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIP	10
1.2.1 Vznik přímého piezoelektrického jevu	11
1.2.2 Obrácený piezoelektrický jev.....	11
1.3 PIEZOELEKTRICKÉ KONSTANTY	12
1.4 CURIEOVA TEPLOTA T_c [°C].....	14
1.5 PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	14
2 ENERGETICKÉ INSTALACE VYUŽÍVAJÍCÍ ENERGIÍ PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	15
2.1 SILNICE VYRÁBĚJÍCÍ ELEKTRICKOU ENERGIÍ	15
2.2 ŽELEZNICE.....	18
2.3 TANEČNÍ KLUBY	19
2.3.1 Sustainable Dance Club	19
2.3.2 Club Surya	20
2.4 STANICE METRA V TOKIU	21
2.5 DLAŽBA PAVEGEN SYSTEMS	22
2.6 CHODNÍK, KTERÝ VYRÁBÍ ELEKTRICKOU ENERGIÍ	24
2.7 PARKOVIŠTĚ U SUPERMARKETU.....	25
2.8 INTELLIGENT TYRE SYSTEMS (ITS).....	25
2.9 ZAJÍMAVÉ STUDIE, KTERÉ SE MOHOU DOSTAT V BRZKÉ DOBĚ DO PRAXE.....	26
2.9.1 Piezoelektrické nanogenerátory	26
2.9.2 Boty s piezogenerátorem v podrážce	27
2.9.3 Eco Touch	28
2.9.4 Piezoelektrická větrná elektrárna	29
2.10 SOUČASNÝ VÝZKUM V OBLASTI PIEZOELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ	30
3 ZHODNOCENÍ PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU	31
3.1 ZHODNOCENÍ Z ENERGETICKÉHO HLEDISKA	32
3.2 ZHODNOCENÍ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	33
3.3 ZHODNOCENÍ Z ENVIRONMENTÁLNÍHO HLEDISKA	33
ZÁVĚR	34
POUŽITÁ LITERATURA	35

Úvod

Tato závěrečná práce je zaměřena na energetické využití piezoelektrického jevu.

Text je rozdělen do tří částí, přičemž v první části se věnuje seznámení s piezoelektrickým jevem, tedy historií, základním principem a dalšími charakteristikami potřebnými pro jeho základní popis.

Druhá část se již skládá z kompletního výčtu všech stávajících a použitých aplikací. Popisují se zde systémy a technologie, jakými je tento jev využit v praxi, kde se jednotlivé aplikace nacházejí a jaké jsou jejich výsledky. Dále jsou zde uvedeny zajímavé studie, které demonstrují široké možnosti využití a aplikací tohoto fenoménu.

V třetí části textu se nachází zhodnocení piezoelektrického jevu jako dalšího alternativního zdroje elektrické energie, a to jak z pohledu energetického, tak z pohledu environmentálního a ekonomického.

Seznam symbolů

d	Piezoelektrická nábojová konstanta [C/N], [m/V]
E	Youngův modul pružnosti [Pa], [N/m ²]
g	Piezoelektrická napěťová konstanta [Vm/N]
S	Mechanické přetvoření []
T _c	Curieova teplota [°C]
ε	Absolutní permitivita [F/m]

1 Piezoelektrický jev

1.1 Historie vzniku piezoelektrického jevu

Objev piezoelektrického jevu úzce souvisí s příchodem jevu pyroelektrického. Již v dávných dobách bylo v Indii a na Cejlonu známo, že když se vhodily krystaly turmalínu do horkého popelu, začaly přitahovat a poté odpuzovat jeho částičky. Tento jev se nazývá pyroelektrický, z řeckého *pyro* = oheň.

Přitahování a odpuzování popele je způsobeno polarizací, tedy vznikem nábojů různé polarity na určitých plochách krystalu. Polarizaci způsobuje přímý účinek tepla a deformace krystalu.

Do Evropy se turmalínové krystaly dostaly počátkem 18. Století. Roku 1800 došlo k zásadnímu objevu, když významní fyzici a bratři Pierre a Jacques Curieové zjistili, že krystal turmalínu (později i křemene) stlačený v určitých osách, vykazuje na konci těchto os elektrický náboj různé polarity. Tento úkaz byl nazván jevem piezoelektrickým, z řeckého *piezō* = tlačit.

V roce 1881 upozornil matematik M. G. Lippmann, opírající se o své výpočty, na existenci opačného jevu, kdy po přivedení náboje na dané plošky krystalu dojde k jeho deformaci. To nám umožňuje použít krystal po připojení vhodného signálu jako zdroj oscilací, případně ultrazvuku.

Piezoelektrický jev si našel již na začátku 20. Století mnoho užití, ať už v lékařství, biologii či různých odvětví techniky od sonaru po různá čidla.

V poslední době se zájem o piezoelektrický jev posouvá i do oblasti energetiky, jako možný alternativní zdroj energie. [1]

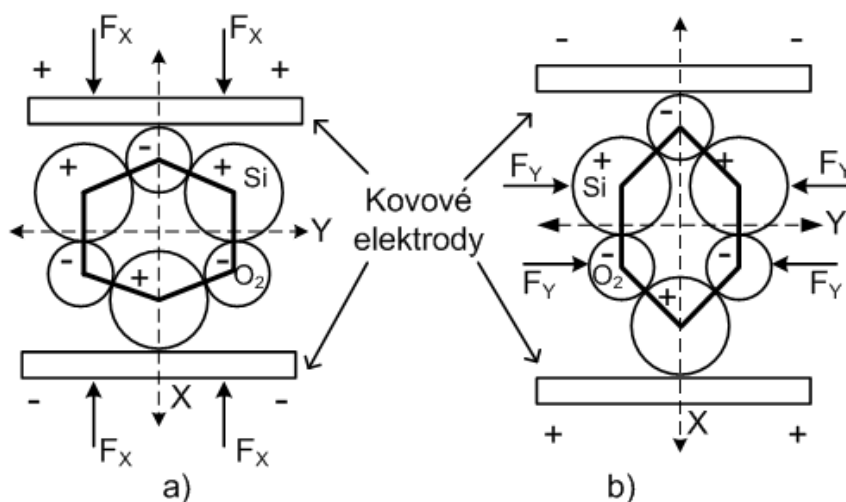
1.2 Základní princip

Přímý piezoelektrický jev nastává v případě, že na krystal působíme vnější silou a tím jej deformujeme. Pokud na krystal připojíme elektrické pole, jehož vlivem dojde k deformaci krystalu, hovoříme o obráceném piezoelektrickém jevu.

1.2.1 Vznik přímého piezoelektrického jevu

Vznik tohoto jevu je podmíněn složením materiálu z krystalů, které jsou středově nesymetrické. Tyto krystaly jsou složeny z atomů a iontů, uspořádaných v krystalové mřížce tak, že si kladné a záporné částice odpovídají. Takovéto uspořádání tedy znamená, že krystal je elektricky neutrální.

Budeme-li na krystal působit silou a stlačovat ho, začne se jeho krystalová mřížka deformovat. Tím se kladně a záporně nabité částice vzájemně posunou a z jednotlivých krystalů se stanou dipóly. Vlivem existence těchto dipólů se na povrchu krystalu vytvoří povrchový elektrický náboj opačné polarity (viz obr. 1a,b). K ploškám, na nichž se vytvořil elektrický náboj jsou připevněny kovové elektrody.

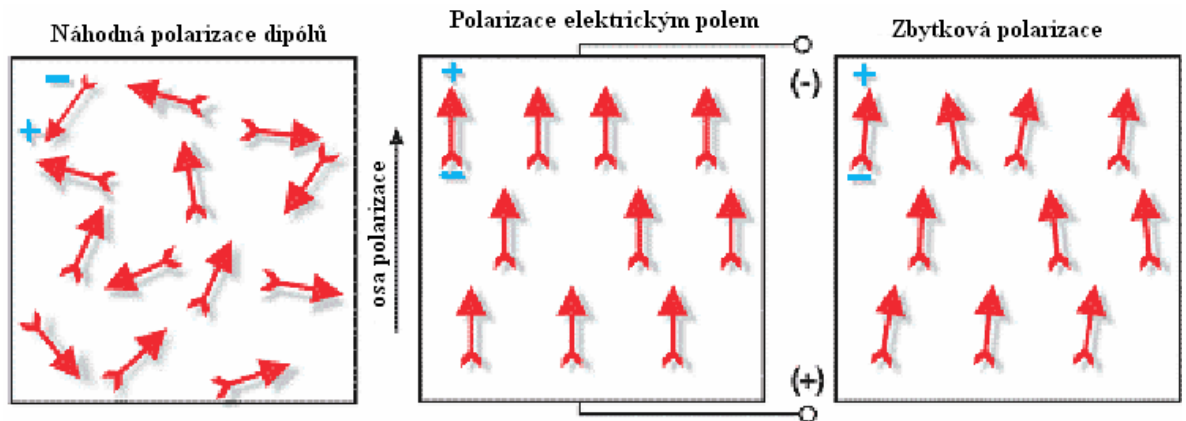


Obrázek 1.2.1-1 a, b Vznik náboje vlivem deformace v různých směrech [1]

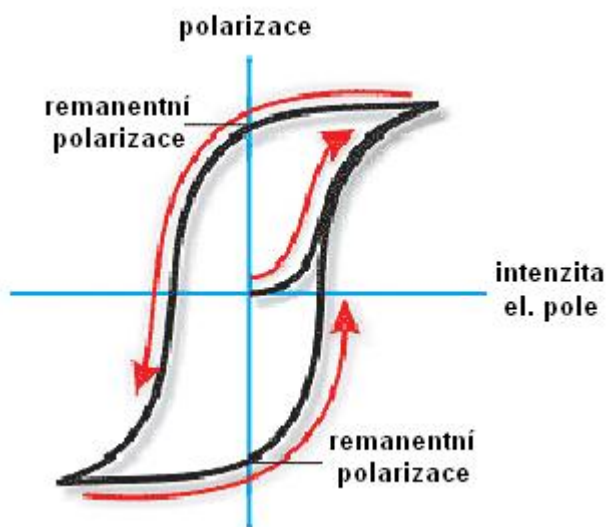
1.2.2 Obrácený piezoelektrický jev

Pokud ovšem připojíme na elektricky neutrální krystal elektrické pole, záporně a kladně nabitě částice se vzájemně posunou ve směru působení vnějšího elektrického pole. Tím dojde k prostorové deformaci krystalu. Tomuto jevu také říkáme *elektrostrikce*. [1]

Míra deformace krystalu je při obráceném piezoelektrickém jevu větší, než při jevu přímém. Navíc se po odpojení vnějšího elektrického pole nevrátí elektrické dipóly do původní polohy, ale do určité míry zůstanou v původním směru. To znamená, že materiál má zbytkovou polarizaci. Na obrázku 2 je graficky znázorněná polarizace dipólů vlivem působení vnějšího elektrického pole a následná zbytková polarizace. Obrázek 3 znázorňuje vliv elektrického pole na polarizaci. [2]



Obrázek 1.2.2-1 Polarizace piezoelektrické keramiky [2]

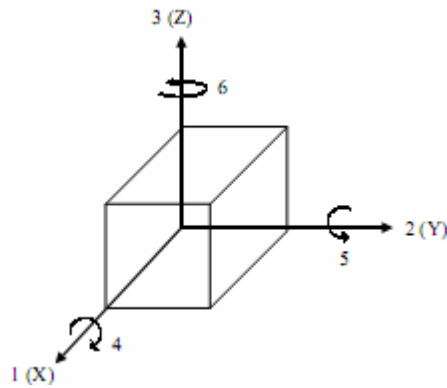


Obrázek 1.2.2-2 Hysterezní smyčka polarizace [2]

1.3 Piezoelektrické konstanty

Piezoelektrické konstanty jsou důležité hodnoty určující vlastnosti piezoelektrického materiálu. Nalezneme je v každém katalogu s piezoelektrickým materiálem. U každé konstanty jsou uvedeny dle normy dva indexy, které určují směry dvou souvisejících hodnot tvořících konstantu. Mohou nabývat velikosti 1 – 6.

Hodnoty indexů jsou uvedené na obrázku 4.



Obrázek 1.2.2-1 Hodnoty indexů piezoelektrických konstant [2]

Piezoelektrickou konstantu tvoří vztah mezi elektrickým a mechanickým chováním látky. Mezi nejdůležitější konstanty se řadí:

- Napět'ová konstanta g [Vm/m]

Napět'ová konstanta g udává velikost vygenerovaného elektrického pole v závislosti na působení mechanického napětí. Nebo naopak, velikost mechanické deformace vlivem působení vnějšího elektrického pole. Tato konstanta je důležitá zvláště pro materiály určené na výrobu snímačů.

- Nábojová konstanta d [C/m], [m/V]

Nábojová konstanta d udává, kolik se vygeneruje náboje za působení mechanického napětí a opačně, velikost mechanické deformace při působení elektrického náboje. Tato hodnota je důležitá především pro materiály použité v pohybových aplikacích.

- Permittivita ϵ [F/m]

Permittivita ϵ udává změnu dielektrika vlivem působení elektrického pole. Absolutní permittivita se spočítá jako součin permittivity vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) a relativní permittivity, udávané v tabulkách. Piezoelektrický materiál lze popsat také dielektrickou konstantou, která je dána jako poměr relativní a absolutní permittivity.

- Youngův modul pružnosti E [Pa], [N/m^2]

Modul pružnosti v tahu E lze definovat jako poměr mechanického napětí k poměrnému prodloužení krystalu. Tato hodnota nám značí elasticitu materiálu.

- Elastická poddajnost S []

Tato konstanta S je dána jako převrácená hodnota modulu pružnosti. Je rozdělena na S^E udávající míru poddajnosti při konstantním elektrickém poli a na S^D udávající míru poddajnosti při konstantní hustotě náboje.

1.4 Curieova teplota T_c [°C]

Při dosažení této teploty ztrácí materiál veškeré piezoelektrické vlastnosti. To je způsobeno fázovým přechodem, kdy se žádaná nesymetrická struktura změní v symetrickou, a krystaly získávají kubickou strukturu. U nových materiálů je kladen důraz na to, aby tato teplota byla co nejvyšší. [1], [2]

1.5 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály se vyznačují složením z krystalů, které nemají střed symetrie. Mohou být čistě přírodní, či uměle vytvořené člověkem. Mezi přírodní materiály řadíme křemen (nejvíce používaný), topaz, turmalín, atd.

Mezi umělé materiály řadíme mimo jiné hlavně *piezokeramiky*. Tyto keramiky se nejčastěji vyrábějí jako směsi tuhých roztoků PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT), odtud název PZT. Piezokeramika je při ukončení výroby složena z velkého množství zrn, jež jsou náhodně orientována, takže se materiál musí vystavit silné polarizaci, která určuje směr použití materiálu.

Lze tedy říci, že mezi nejpoužívanější materiály patří krystalický křemen, krystaly LiNbO_3 a LiTaO_3 , piezoelektrická keramika PZT. Dále se ještě používají různé typy materiálů, jako například materiály odolné vysokým teplotám, bezolovnaté piezokeramiky či flexibilní polymerové materiály. [1], [2], [3]

2 Energetické instalace využívající energii piezoelektrického jevu

Způsob získávání elektrické energie z okolního prostředí se dá vyjádřit několika možnými pojmy vycházejícími z angličtiny:

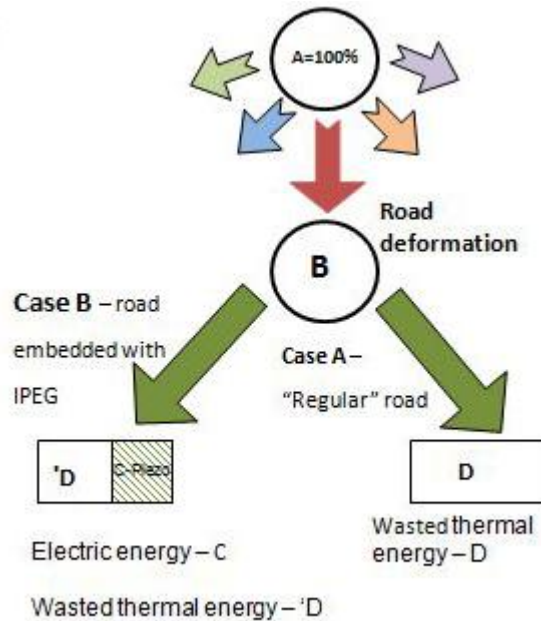
- Energy Harvesting
- Energy Scavenging
- Power Harvesting

Všechny tyto pojmy zahrnují možnosti získávání energie prostřednictvím elektromagnetického záření (fotovoltaika), proudění vzduchu (větrné elektrárny), působení tepla (solární elektrárny, teplo lidského těla) a mechanické energie (nahodilé pohyby, vibrace). Právě piezoelektrický jev je jednou z rychle se rozvíjejících možností čerpání energie z prostředí.

2.1 Silnice vyrábějící elektrickou energii

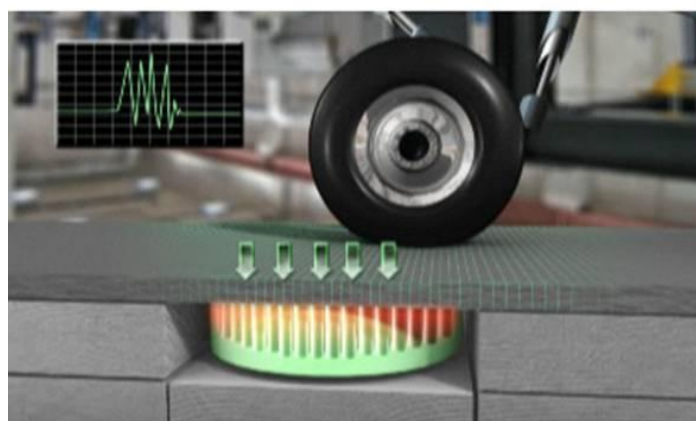
Asi nejznámější a nejrozsáhlejší příklad energy harvesting u využívajícího piezoelektrickou energii je úsek dálnice v Izraeli. Stejně jako každá standardní silnice i tato má asfaltový povrch. Tento povrch se dá popsat jako visko-elasto-plastický materiál, přičemž elasticita je pro materiál charakteristická. Při průjezdu vozidla přes silnici se její povrch vychyluje ve svislém směru. Většina energie ze spalování paliva využitá na pohyb vozidla je spotřebována pro překonání valivého odporu, avšak je zde i část, která se zbytečně spotřebuje na vytvoření deformace asfaltu a na teplo vznikající při deformaci.

Izraelská společnost Innowattech ve spojení s institutem Technion přišla s řešením, které umožňuje sběr a přeměnu mechanické energie průhybu při průjezdu vozidel na energii elektrickou. Využívá přitom piezoelektrické elementy uložené pod povrchem silnice.



Obrázek 2.1-1.2.2-1 Rozložení energie při deformaci s a bez piezo generátoru [4]

Velikost stlačení klesá s hloubkou, a tak jsou piezoelektrické generátory uloženy pouze 5 cm pod povrchem silnice. Energie potřebná k deformaci vozovky je funkcí mnoha parametrů, jako například kvalita povrchu, typ použitého asfaltu, teplota prostředí a jiné, zatímco tuhost piezoelektrických generátorů je pouze funkcí piezoelektrického materiálu. Proto je modul pružnosti piezo materiálu vyšší, než u asfaltu. Z toho vyplývá, že při použití piezo generátorů se sníží právě vlivem vyššího modulu pružnosti vertikální vychýlení dálnice. To znamená, že povrch se chová jako tužší a tím pádem opět klesá spotřeba paliva. Použité generátory se skládají z piezoelektrických sloupců, které jsou svisle uložené. Toto řešení přeměny mechanické energie na elektrickou se nazývá IPEG (Innowattech PiezoElectric Generator).



Obrázek 2.11.2.2-2 Piezoelektrický generátor IPEG [4]

Tato technologie byla testována na desetimetrovém úseku silnice 4 severně od města Hadera. Tento úsek je schopný vyprodukovat až 2 kWh energie za hodinu. Systém je připojen na akumulátory umístěné vedle silnice. Z toho vyplývá, že jeden kilometr IPEG generátorů uložených v jednom jízdním pruhu je schopen vygenerovat v průměru 200 kWh za hodinu, za předpokladu přejetí zhruba 600 nákladních automobilů nebo autobusů v pravidelných intervalech. Takto vzniklá energie může být uložena v akumulátorech či superkapacitorech a použita například pro osvětlení cest a billboardů, napájení radarů nebo může být přivedena přímo do rozvodné sítě.



Obrázek 1.2.2-3 Uložení IPEG v silnici [4]

Výhoda těchto generátorů je taková, že nevyužívají energii ze spalování paliva v motoru, ale využívají odpadní energii potřebnou k deformaci povrchu a vzniku tepla. Mezi další výhody patří velmi nízká údržba z důvodu absence pohyblivých částí, schopnost poskytovat energii v místech bez rozvodné sítě, funkčnost za všech povětrnostních podmínek, či že nezabírají žádný veřejný prostor. Navíc systém ještě nabízí sběr dat s názvem I-WIM (Innowattech Weight In Motion), pomocí kterého lze získat údaje o hmotnosti vozu, jeho rychlosti či počtu náprav. I-WIM tedy pracuje na stejném principu jako IPEG, jen na místo uložení vygenerované energie do akumulátorů se energie změní na signál, který se zašle do centrálního počítače. Výhodou je opět neporušení povrchu a tedy nenačtyřnění spotřeby paliva a navíc systém nemusí mít napájení, energii pro odeslání si vyrábí sám právě přeměnou mechanické energie na elektrickou. [4], [5], [6]

2.2 Železnice

Společnost Innowattech se dále zabývá výzkumem v oblasti integrování piezoelektrických generátorů do železničních pražců. Vlaky projíždějící po trati působí na koleje obrovskou mechanickou silou, skládající se z tlaku a vibrací. Několik speciálně upravených piezo generátorů bylo umístěno namísto kovových destiček mezi koleje a pražce nedaleko stanice Haifa.



Obrázek 1.2.2-1 a) Uložení generátorů pod kolejemi b) Původní kovová destička a generátor [4]

Energie vzniklá při průjezdu vlaku se dá uložit do akumulátorů, připojit přímo na rozvodnou síť nebo použít v odlehlých oblastech pro napájení signalizace na přejezdech. Navíc tato technologie opět umožňuje monitorování počtu projetých souprav, jejich hmotnosti či rychlosti. Při tomto použití nepotřebuje senzor napájení, protože si energii vyrobí sám.

Společnost Innowattech se dále věnuje studii o uložení piezo elementů do chodníku či pod těžké lisovací stroje. [4], [7]

2.3 Taneční kluby

Další možností aplikace piezogenerátorů je jejich umístění do podlahy a kde více se využije jejich potenciál, než v tanečních klubech. V tomto směru existují již dva kluby, které nabízejí piezoelektrické taneční parkety. Mezi těmito kluby také panuje rivalita týkající se prvenství využití piezoelektrického jevu k výrobě energie.

2.3.1 Sustainable Dance Club

Nápad na vznik ekologického tanečního klubu vznikl již v roce 2005 v Nizozemí. Na tomto projektu začalo spolupracovat architektonické studio Döll Lab. a ekologicko - sociální společnost Enviu – Innovators. V roce 2006 byl koncept dokončen a v roce 2008 se klub, tehdy ještě pod názvem WATT, otevřel v Rotterdamu pro veřejnost. V roce 2009 klub změnil název na Sustainable Dance Club.

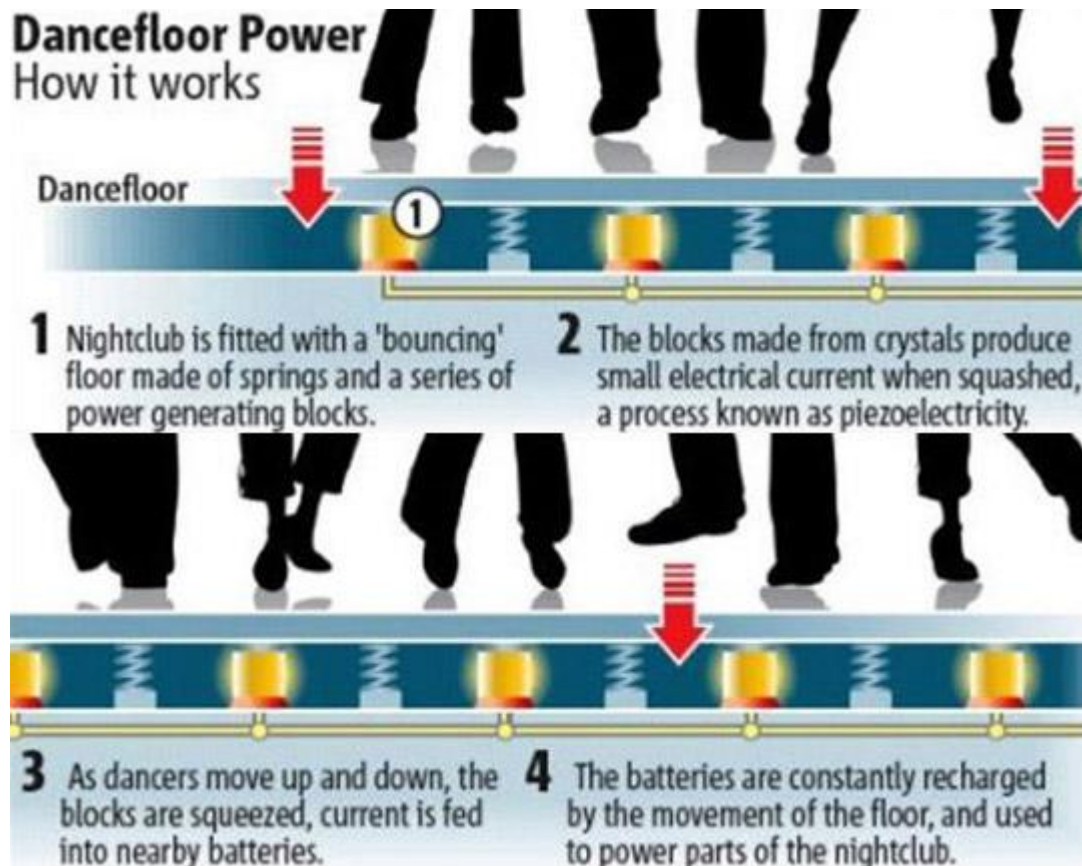
Základním prvkem pro úsporu elektrické energie zde slouží speciálně upravená taneční plocha, která se skládá z jednotlivých elementů, obsahujících piezoelektrický generátor. Tento systém se nazývá Sustainable Dance Floor (SDF).



Obrázek 2.3.1-1 Sustainable Dance Floor [9]

Výhodou tohoto systému složeného z jednotlivých částí je variabilita jeho rozložení a mobilita. Každý element, o rozměrech 75x75x20 cm, lze při došlápnutí stlačit až o celých 10 mm. Při maximálním působení tlaku je schopen vygenerovat až 35 wattů výkonu.

Z praktického hlediska dokáže tedy jeden tanečník vyrobit 5 – 30 wattů, v závislosti na jeho váze a aktivitě. Vyrobena energie se ukládá do akumulátorů a poté se z nich spotřebuje k napájení osvětlení a částečně i k napájení audiotechniky. Tato technologie byla vyvíjena ve spolupráci s technickou univerzitou v Eindhovenu a Delftu.



Obrázek 2.3.1-2 Jednoduché zobrazení funkce SDF [8]

Díky SDF se dosáhlo ke snížení spotřeby elektrické energie až o 30 %. Za zmínku ještě stojí to, že toto není jediné ekologické řešení, klub mimo jiné využívá například i dešťovou vodu, která se zachytává v nádržích na střeše a následně je použita na toaletách. [8], [9]

2.3.2 Club Surya

Druhým klubem nabízejícím netradiční řešení využívající alternativní zdroje je londýnský klub Surya. Tento klub vznikl v roce 2008 za podpory multimilionáře známého pod přezdívkou Dr. Earth. Klub Surya je sice menší než Rotterdamský klub, zato ale efektivněji využívá energii tanečního parketu, rovněž obsahujícího piezoelektrické generátory. Až celých 60 % spotřeby energie jak na osvětlení, tak na audiotechniku je pokryto právě tímto parketem.



Obrázek 2.3.2-1 Taneční parket klubu Surya [10]

Bližší informace se neuvádějí, ale výroba energie bude opět záležet na množství návštěvníků, jejich hmotnosti a aktivitě. Opět je zde použita technologie ukládání okamžitě vyrobené energie do akumulátorů a její následné využití.

Jelikož se jedná opět o ekologický klub, využívá Surya také dešťovou vodu na toalety, úsporné světelné zdroje a solární panely. [10], [11]

2.4 Stanice metra v Tokiu

Následující projekt, stejně jako předešlý, opět využívá lidskou chuť jako zdroj potřebné síly pro deformaci piezo článků. Východní Japonská železniční společnost (JR East) ve spolupráci se společností Soundpower corporation, která se věnuje energy harvesting, nainstalovaly ve dvou stanicích metra piezogenerátory. Obě tyto stanice patří k velmi frekventovaným, dokonce jedna z nich, Shibuya, patří k nejrušnějším stanicím metra na světě, denně jí projde zhruba 2,4 milionu cestujících. Zařízení zde bylo od roku 2008 do roku 2009 a cílem bylo pozorování užití piezogenerátorů v praxi.



Obrázek 2.4-2.3.2-1 Podložka mezi turnikety a informační displej [12]

System byl uložen pod podlahou o ploše 25 m^2 a v podložkách uložených mezi turnikety, těch bylo celkem sedm. Podložky měly plochu zhruba 90 cm^2 a výšku 2,5 cm. Při této konfiguraci a takto vysokém počtu lidí bylo možné vygenerovat až 1400 kW denně. Tým společnosti Soundpower corporation vyvinul podložky, které jsou schopné vygenerovat až 10 Ws při došlápnutí člověka o hmotnosti 60 kg. Na začátku výzkumu to bylo pouze 1 Ws.

Energie vygenerovaná chůzí cestujících se používala na napájení vstupních bran, displejů a dalších signalizačních prvků. [12], [13], [14]

2.5 Dlažba Pavegen Systems

Anglická firma Pavegen Systems se zabývá přímo výrobou dlaždic, které v sobě mají zabudovaný piezogenerátor. Tyto dlaždice jsou vyráběny z více než 90 % z recyklovaných materiálů, převážně použité gumy, takže jsou ekologické nejen z pohledu vyrábění energie ale i materiálového složení.

Technologie Pavegen opět využívá přeměny kinetické energie na elektrickou, pomocí piezoelektrického jevu, ale na rozdíl od klasických piezoelektrických generátorů, které používají především „špičky“, tedy maximální vyrobenou energii v krátkém čase, se Pavegen snaží rozdíl mezi špičkami zmenšit a docílit tak konstantního toku energie.

Toho dosahuje právě materiálovým složením a pružností dlaždice. Při došlápnutí se celek prohne zhruba o 5 mm. A navíc díky pružnosti lépe absorbují dopady chodidla a nenamáhají se tolik klouby chodců.

Při frekventovanějším provozu je dlaždice schopna dodat až 2,1 Wh/h. Vyrobená energie se ihned ukládá do lithium – polymerových baterií, odkud se poté čerpá pro spotřebič. Výrobce udává, že při průměrném došlápnutí vygeneruje dlaždice tolik energie, kolik je potřeba k 30 sekundovému chodu pouliční lampy složené z LED diod. Životnost takovéto dlaždice je zhruba 5 let nebo 20 milionů kroků. Složení z odolných materiálů umožňuje venkovní použití.



Obrázek 2.5-2.3.2-1 Instalace v chodníku, východní Londýn [16]

První instalace proběhla ve východním Londýně, kde bylo zabudováno do chodníku několik Pavegen dlaždic s integrovaným svítidlem, čímž se zvýšila v noci bezpečnost chodců. Výrobce dále udává, že při použití v rušné pěší zóně, tedy tam, kde se uskuteční průměrně 50 000 kroků denně, by stačilo pouhých 5 dlaždic k udržení osvětlení autobusové zastávky po celou noc. Firma Pavegen již dostala první čistě komerční zakázku, aby svými dlaždicemi pokryla pěší prostory ve Westfield Stratford City Shopping Centre, kam zavítá kolem 30 milionů zákazníků ročně. Firma také doufá, že se brzy dostane do celého světa. [15], [16], [17], [18]

2.6 Chodník, který vyrábí elektrickou energii

V jihozápadní Francii ve městě Toulouse se také rozhodli pro vyzkoušení alternativního zdroje energie a uskutečnili zde projekt zvaný Trotelec. Do části chodníku o délce 8 m bylo namontováno několik panelů s piezoelektrickými generátory, které dodala již výše zmiňovaná Nizozemská společnost Sustainable Dance Floor (SDF). Tyto panely s celkovým maximálním výkonem 60 wattů měly sloužit k napájení pouličního osvětlení právě v blízkosti tohoto chodníku.



Obrázek 2.6-2.3.2-1 Ukázka SDF systému v chodníku v Toulouse [20]

Tento pokus je důležitý z toho důvodu, že se zde ukázalo použití SDF technologie jako neefektivní. Jelikož se jednalo o standardní chodník, který není nijak zvlášť hodně vytížen a jedna osoba dokáže při běžné chůzi vygenerovat maximálně 5 wattů, tak by získaná energie byla schopna pokrýt spotřebu pouze jedné lampy na půl kilometru svítící celou noc. Z toho vyplývá, že současné piezogenerátory využívající lidskou chůzi se hodí spíše pro místa s vysokou koncentrací kroků, jako například výše zmíněné aplikace. [19], [20]

2.7 Parkoviště u supermarketu

Další aplikací, která nevyužívá pouze lidskou chůzi je parkoviště u supermarketu Sainsbury v Gloucestru v Anglii. Na povrchu parkovací plochy jsou umístěny kinetické desky, které jsou v kontaktu s piezoelektrickými generátory. Při přejezdu automobilu dochází k přeměně kinetické energie na elektrickou.



Obrázek 2.7-2.3.2-1 Kinetická deska na parkovišti [22]

Vzhledem k počtu zákazníků, respektive jejich vozů je tento systém schopen dodat až 30 kW za hodinu. Tento výkon je dostačující pro napájení pokladen. Navíc tento supermarket používá další ekologická řešení, jako je sběr dešťové vody nebo solární panely. [21], [22]

2.8 Intelligent Tyre Systems (ITS)

Roku 2007 byl odhlasován v USA nový zákon, který ukládá všem novým vozidlům s hmotností přesahující 4,5 tuny mít systém, který měří tlak v pneumatikách. Společnost Continental AG proto vyvinula ITS, což je vlastně snímač tlaku napájený piezoelektrickým generátorem, přičemž celek je uložen přímo uvnitř pneumatiky. To umožňuje, aby systém nebyl závislý na baterii, a je naprosto bezdrátový. Čidlo odesílá data do centrálního počítače, který výsledek vyhodnotí a určí optimální nahuštění pneumatik. Tento systém by se měl v budoucnu používat ve všech vozidlech, protože optimální nahuštění pneumatik činí automobil bezpečnější a hlavně úspornější, tedy i ekologičtější. [23], [24]

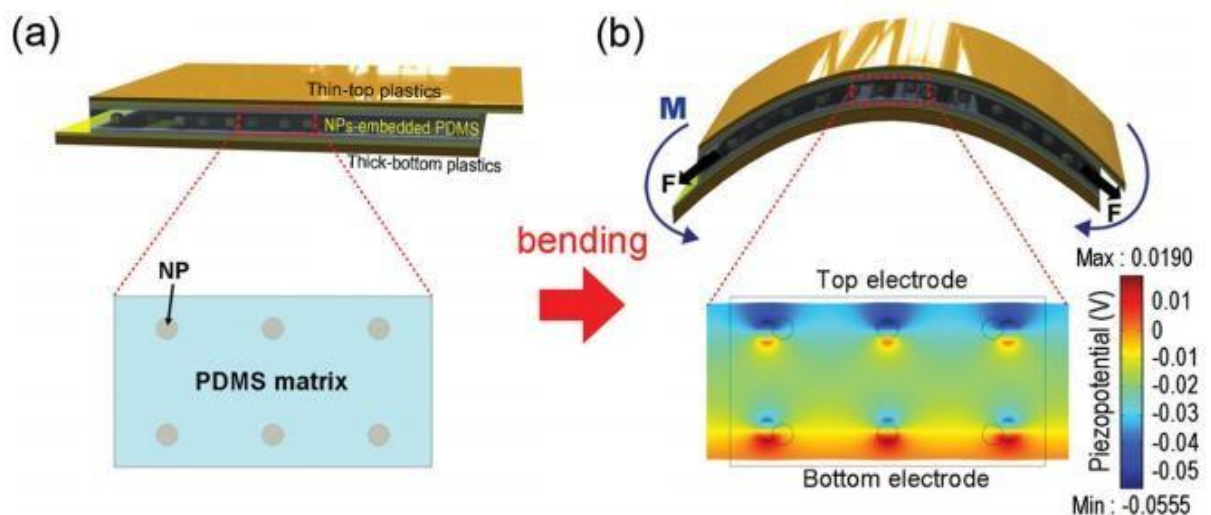


Obrázek 2.3.2-1 Intelligent Tyre Systems

2.9 Zajímavé studie, které se mohou dostat v brzké době do praxe

2.9.1 Piezoelektrické nanogenerátory

V roce 2011 představil výzkumný tým z Korea Advanced Institute of Science and Technology vedený doktorem Zhon-Lin Wangem první funkční piezo nanogenerátor. Tento nanogenerátor je jednoduchý na výrobu, skládá se z piezo nanočástic, tedy nanodrátků z oxidu zinku, dále uhlíkových nanotrubiček a grafenového oxidu. Vše je nakonec uspořádáno do matice z polydimethylsiloxanu (PDMS).



Obrázek 2.9.1-1 Piezoelektrický nanogenerátor PDMS

Složení z nanodrátků umožňuje větší ohyb a tedy více vyrobené energie. Tato technologie má vyšší hustotu energie a účinnost konverze 7 %.

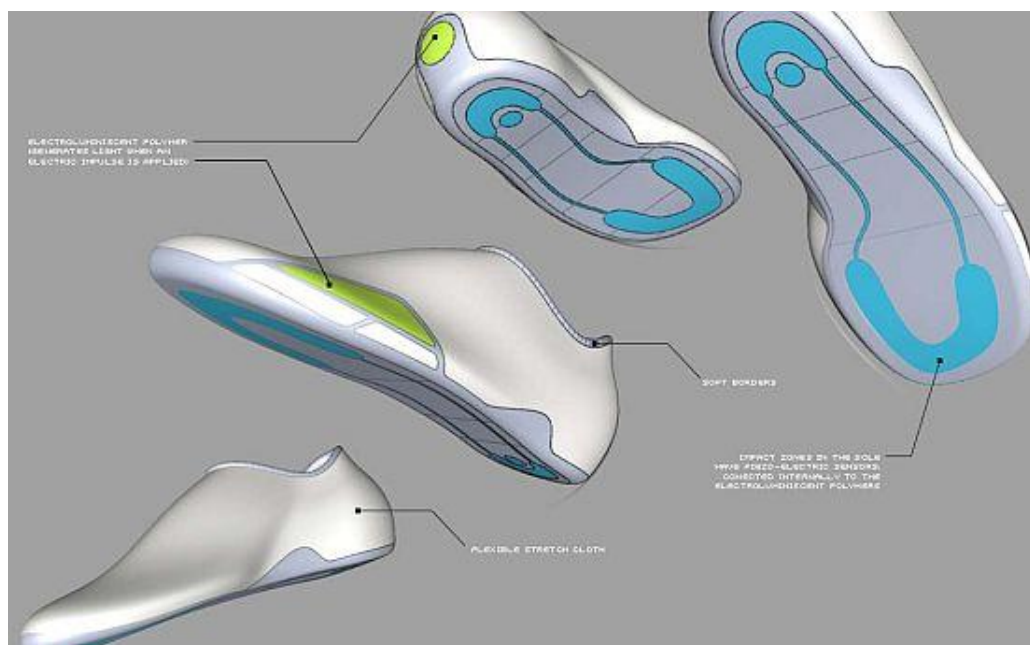
Tyto nanogenerátory se dají využít v lékařství a zdravotnictví pro napájení nanorobotů, přičemž kinetická energie se získává z dýchání, tepu srdce či jiných pohybů v těle. Dále se dá využít i pro větší aplikace, čehož se dosáhne skládáním těchto zdrojů. A právě tomuto skládání se výzkum aktuálně věnuje, protože v nanosvětě patří zdánlivě jednoduché napojení k docela obtížným problémům.

Jiný tým vědců z University of Wisconsin dal již vědět, že vytvořil nanogenerátor, který je schopen vygenerovat 10 nW/ 1cm². Bližší informace bohužel nejsou veřejné. [25], [26]

2.9.2 Boty s piezogenerátorem v podrážce

2.9.2.1 Brightwalk

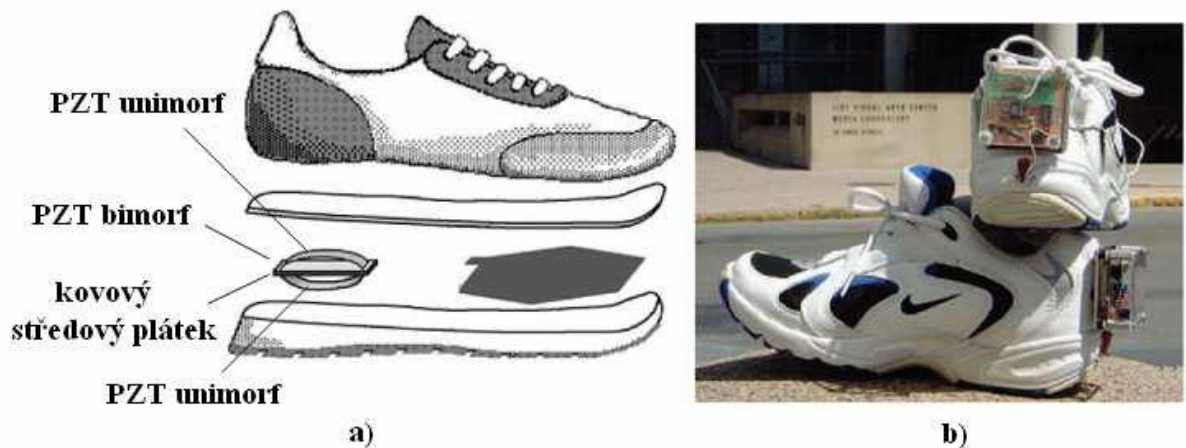
Zajímavý návrh bot nazvaný Brightwalk získal v roce 2005 vítězství v designerské soutěži Red Dot Design Awards. V podrážce je integrovaná piezokeramika, která při stlačení nebo roztažení, tedy během chůze, vytváří elektrickou energii. Ta je následně přivedena na elektroluminiscentní polymerové svítilny uložené na boku a patě. To umožňuje chodci či běžci, aby po setmění lépe viděl a byl viděn. Důvodem pro volbu polymeru jako zdroje světla je to, že látka nevydává při luminiscenci téměř žádné odpadní teplo. Tento systém je velmi jednoduchý a nevyžaduje žádné baterie, proto je také bota lehká. [27]



Obrázek 2.9.2-1 Koncept bot Brightwalk [27]

2.9.2.2 Boty od MIT

Další návrh sportovních bot je od výzkumného týmu z MIT - Massachusetts Institute of Technology. Tato technologie je opět zaměřená na energy harvesting parazitní energie, tedy takové, která vždy vzniká a spotřebovává se na odpadní teplo a jiné. Tato energie se dá využít pro nenáročné spotřebiče, jako v tomto případě pro napájení i-Podu. Toto řešení není tolik efektivní, jako klasický elektrodynamický generátor, naproti tomu je však o mnoho menší, nezabírá tedy žádné extra místo a má i nižší váhu. Jako materiál na piezo generátor zde byla použita standardní PZT keramika. Tato technologie dosahovala špiček až 150 V, ale efektivní hodnota výkonu pouze 1,8 mW. Získaná energie se poté zpracovala elektronikou a předala napájenému zařízení. [28]



Obrázek 2.9.2-2 a) Konstrukce bot b) praktické provedení [28]

2.9.3 Eco Touch

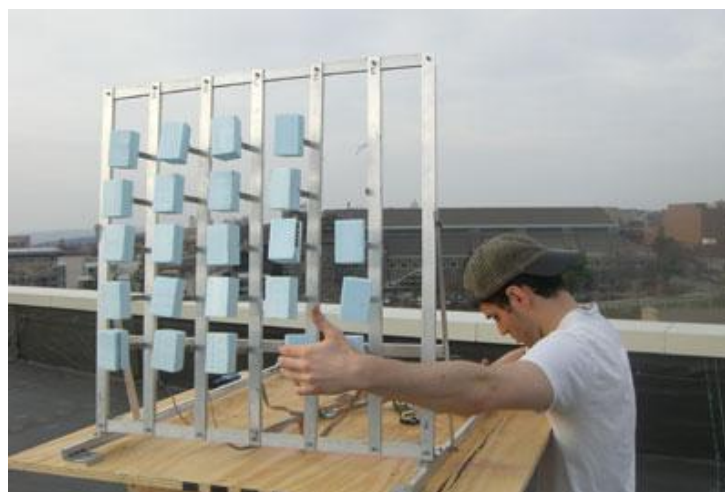
Další velice zajímavá studie je aplikace Piezogenerátoru pod dotykovou obrazovku tabletu. Právě s tímto nápadem přišla společnost Fujitsu a nazvala ho ecoPad. Statisticky stiskne každý uživatel dotykovou obrazovku více než 10 000 x denně. Toho se dá využít a dokázat tak minimální závislost tohoto přístroje na elektrické síti. [29]



Obrázek 2.9.3-1 Koncept ekologického tabletu ecoPad [29]

2.9.4 Piezoelektrická větrná elektrárna

Výzkumný tým z Cornell University přišel s netradičním pojetím větrné elektrárny. Ta se podobá jakési zvonkohře, přičemž jednotlivé klapky jsou vystaveny tlakovému působení větru. Jejich pohybem dochází ke stlačení krystalu a tedy výrobě elektrické energie. Tento systém je také zajímavý z architektonického a designového hlediska, protože otevírá cestu mnoha originálním řešením. [30]



Obrázek 2.9.4-1 Větrná piezoelektrická elektrárna [30]

2.10 Současný výzkum v oblasti piezoelektrických generátorů

V současné době se výzkumu v oblasti piezoelektrických generátorů či nových piezoelektrických materiálů věnuje většina velkých univerzit, zde je uvedeno několik odkazů:

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

Dále se těmito oblastmi výzkumu zabývají soukromé nebo státní společnosti, zde pro ukázkou několik odkazů:

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

A další odkazy jsou uvedeny v použité literatuře.

3 Zhodnocení piezoelektrického jevu

V současné době je elektrická energie považována ve většině zemí za nepostradatelnou. Vzhledem ke stále rostoucímu počtu spotřebních míst a spotřebičů ve všech možných odvětvích, vzrůstá také potřeba nových zdrojů elektrické energie. Doposud nejvyužívanější paliva, jak pro energetické účely, tak v dopravě jsou fosilní paliva, tedy uhlí, ropa a zemní plyn. Zásoby těchto paliv docházejí a podle současných prognóz má dojít ropa zhruba za 50 let, zemní plyn zhruba za 150 let a nejlépe je na tom uhlí, jehož zásoby jsou odhadovány na 200 - 300 let [31]. Kromě omezených zásob mají tyto paliva další negativum, během jejich spalování dochází ke vzniku nebezpečných emisí, jako oxid uhličitý, oxidy síry, oxidy dusíku a další nebezpečné látky. Všechny tyto produkty mají nepříznivý dopad na životní prostředí, jako například kyselá dešť vzniklé sloučením oxidů síry s vodními parami. Ovšem kromě emisí tyto zdroje škodí i nepřímo, a to těžbou paliva nebo vzhledem v krajině. Ve prospěch zdrojů spalujících fosilní paliva hovoří účinnost, cena paliva a v dopravě navíc mobilita (u elektromobilů je stále závislost na kapacitě baterií a umístění nabíjecích stanic).

Alternativní zdroje elektrické energie, které dosahují stále většího rozšíření, čerpají energii z neomezených zdrojů, tedy elektromagnetického záření slunce, energii proudění vzduchu, energii vyvolanou přitažlivostí Měsíce, biomasu nebo geotermální energii. Tyto zdroje jsou ovšem limitovány různými faktory. U slunečního záření je to nízká účinnost konverze energie a závislost na počasí, u větrné turbíny závislost na aktuálních povětrnostních podmínkách a ukládání energie v momentě jejího přebytku, u geotermální elektrárny je to cena a vhodná lokalita. Z toho vyplývá, že nejrozšířenější zdroje využívající obnovitelnou energii nejsou špatnou cestou, ale jejich momentální limity jim nedovolují být dostatečnou alternativou zdrojů využívajících fosilní paliva.

Tyto hlavní důvody nás nutí hledat stále další zdroje, které mají minimální dopad škodlivin. Právě tento přístup nám umožnil nový pohled na získávání energie a dal vzniknout mnoha novým, netradičním zdrojům.

Mimo veliké centrální zdroje se okruh zájmu posunuje i na malé lokální zdroje. Tyto zdroje mají většinou nižší výkon, zato jsou ale rozmanité a mají široké pole působnosti. Touto problematikou se zabývá energy harvesting, tedy sběr energie. Energy harvesting zahrnuje velmi mnoho způsobů získávání energie, jako například energie z rádiových vln a nebo právě využití piezoelektrického jevu ke konverzi odpadní kinetické energie na elektrickou. Tak jako každý zdroj, i tento nás zajímá z pohledu energetického, ekonomického a environmentálního.

3.1 Zhodnocení z energetického hlediska

Piezoelektrický jev umožňuje široké využití. Jedná se o sekundární zdroj, tedy zdroj, který využívá energii vzniklou při procesech, které nebyly primárně určené k jejímu vzniku. Využívá tedy například energii, vzniklou při přejezdu vozidla po silnici, která by se spotřebovala na deformaci povrchu a vznik odpadního tepla při stlačení povrchu cesty. Nebo může být například využit k získávání energie z vibrací různých zařízení a mnoho dalších. Z tohoto pohledu jsou aplikace piezoelektrického jevu téměř neomezené. Ovšem jako zdroj sám o sobě je piezoelektrický efekt omezen několika faktory. První z nich je nižší účinnost konverze energie. V této době se ovšem mnoho institucí věnuje vývoji nových materiálů, jejichž cílem je vyšší účinnost, nižší cena a vyšší ekologická hodnota. Dalším problémem je nízký energetický zisk, řádově stovky μW až jednotky mW na cm^2 . Tento zdroj vytváří vysokonapěťové špičky, je tedy nutná přítomnost elektroniky pro úpravu získané energie a její další použití. Jedná se tedy o malý a jednoduchý vysokonapěťový zdroj. Jako příklad takového využití je piezoelektrické zapalování, kde je zapotřebí pro vznik výboje vysoké napětí, nebo piezoelektrický transformátor, což je vlastně nekompaktnější VN zdroj. Jiným problémem je nezbytnost zařízení, ve kterém se okamžitá vyrobená energie ukládá pro další použití. Jako akumulční prvky se dají použít akumulátory nebo superkapacitory.

Na druhou stranu umožňuje tento zdroj relativně efektivní využití odpadní energie. Další výhodou spočívá v možnosti aplikace a tedy výrobě elektřiny v místech, kde nelze nebo je finančně nevýhodné zavést vedení, jako příklad lze uvést piezoelektrické generátory umístěné pod koleje, sloužící k napájení signalizačního zařízení v odlehlých polohách.

Tento zdroj je z energetického hlediska vhodný spíše pro nízkoenergetické aplikace, jakými mohou být osvětlení, signalizace, napájení spotřební elektroniky atd. Nejedná se tedy o zdroj, který nahradí dosavadní zdroje, ale podle mého názoru v budoucnu výrazně ušetří spotřebu elektrické energie. V jeho prospěch hovoří vysoká flexibilita použití, životnost, jednoduchost a nízká údržba.

3.2 Zhodnocení z ekonomického hlediska

Z ekonomického hlediska skýtá tento zdroj mnoho výhod. Jelikož se jedná o jednoduchý systém, který neobsahuje žádné složité součásti, snižují se výrazně náklady na údržbu a zvyšuje se životnost. Další výhodou je výroba elektřiny z parazitní energie, nejsou tedy žádné náklady na palivo. Jako příklad poslouží opět aplikace v silnici, kde se využívá energie spotřebovaná na deformaci povrchu vozovky a vozidlu tedy nijak nevzrůstá spotřeba pohonných hmot. Další výhodou v tomto směru jsou nízké náklady při aplikování. Není za potřebí výstavba žádných budov ani nákup pozemků. Při ukládání piezoelektrických elementů jsou z důvodu kompaktnosti a široké možnosti provedení zásahy do místa aplikace minimální. To umožňuje mimo jiné rozsáhlé použití v urbanizovaných prostorech. Jinou výhodou jsou možnosti provedení celkového zařízení, které umožňují použít pro výrobu recyklované materiály.

Naopak nevýhodou se jeví nutnost použití akumulčního zařízení a elektroniky pro úpravu vyrobené energie.

3.3 Zhodnocení z environmentálního hlediska

Z tohoto hlediska se jedná o velmi čistý zdroj energie. Při jeho funkci nevznikají žádné škodlivé emise ani jiné produkty ničící životní prostředí. Nevznikají ani žádné odpady a není zde ani žádná další spotřeba nějakého paliva. Právě naopak tento způsob získávání energie využívá, jak již bylo několikrát zmíněno odpadní energii. Také většina kladných hodnocení, kterých se dá použít i z environmentálního hlediska, již byla řečena výše, za zopakování stojí alespoň minimální zásahy do krajiny a použití recyklovaných materiálů.

Jediná negativa jsou tedy nutnost akumulčního prvku, většinou baterií, které obsahují nebezpečné látky nebo samotné piezoelektrické materiály, konkrétně uměle vytvářené, tedy keramiky, kde například PZT obsahuje olovo.

Závěr

Cílem této práce bylo uvedení do základní problematiky využití energie piezoelektrického jevu. Práce se v první kapitole věnuje obecným informacím o piezoelektrickém jevu, v druhé, důležitější kapitole utváří kompletní seznam stávajících aplikací a nakonec v poslední kapitole je zhodnocení piezoelektrického jevu využitého k výrobě elektrické energie z hlediska energetického, ekonomického a environmentálního. V práci jsem tedy splnil odpovědi na všechny body zadání. Přínosem této práce je vytvoření kompletního seznamu stávajících aplikací a hlubší seznámení autora s danou problematikou a vytvoření si vlastního názoru na ni. Tento názor se promítá v poslední kapitole jako výsledné zhodnocení.

Použitá literatura

- [1] Petržílka, V. et. al.: *Piezoelektrina a její technické použití*, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1960
- [2] American Piezo Ceramics, Inc. URL:< <http://www.americanpiezo.com> >
- [3] Erhart, J.: *Piezoelektrické chytré materiály pro elektrotechniku*, Elektro, č.11, 2002. URL: < www.odbornecasopisy.cz/download/el110204.pdf >
- [4] Innowattech Ltd., Technion I.I.T. URL:< <http://www.innowattech.co.il> >
- [5] Grohmann, J.: *Silnice vyrábějící elektrickou energii*. URL: <<http://www.ekobydleni.eu/energie/silnice-vyrabejici-elektrickou-energi>>
- [6] Renewable Alternative Energy. URL:< <http://www.renewable-alternative-energy.org/alternative-energy/innowattech-breakthrough-in-alternative-energy-from-road-traffic/>>
- [7] EcoFriend: Five ways to harvest clean energy from trains. URL: <<http://www.ecofriend.com/entry/ways-harvest-clean-energy-trains/>>
- [8] Eco Latin: Party Sustainable Dance Club. URL: <<http://www.ecolatin.org/en/party-sustainable-dance-club-dance-for-electricity>>
- [9] Sustainable Dance Club. URL:< <http://www.sustainabledanceclub.com/>>
- [10] Club Surya. URL: <<http://www.club4climate.com/>>
- [11] Dailymail: Britain's first eco-nightclub powered by pounding feet opens its doors. URL: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1027362/Britains-eco-nightclub-powered-pounding-feet-opens-doors.html>>
- [12] Inhabitat: Energy-Generating Floors to Power Tokyo Subways. URL: <<http://inhabitat.com/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/>>
- [13] Celsius: Foot powering Tokyo train station. URL: <<http://www.celsius.com/article/foot-powering-tokyo-train-station/>>
- [14] Trends in Japan: The power beneath your feet. URL: <http://web-japan.org/trends/09_sci-tech/sci100107.html>
- [15] Grohmann, J.: *Dlažba, která vyrábí elektrickou energii*. URL: <<http://www.ekobydleni.eu/energie/dlazba-ktera-vyrabi-elektrickou-energi>>
- [16] Pavegen systems. URL: <<http://www.pavegen.com/>>
- [17] Robaid: Pavegen flexible paving slabs generate energy from footsteps. URL: < <http://www.robaid.com/tech/pavegen-flexible-paving-slabs-generate-energy-from-footsteps.htm> >

- [18] Harris, S.: *Pavegen founder Laurence Kembell-Cook*. URL: <<http://www.theengineer.co.uk/in-depth/interviews/pavegen-founder-laurence-kembell-cook/1010877.article>>
- [19] Strickland, J.: *Toulouse Pedestrians May Tread a Dark Path*. URL: <<http://blogs.howstuffworks.com/2010/04/14/toulouse-pedestrians-may-tread-a-dark-path/>>
- [20] Global cities dialogue: The Trotelec project. URL: <<http://www.globalcitiesdialogue.com/index.php/component/content/article/108-coup-de-coeur/208-the-trotelec-project.html>>
- [21] Engadget: Supermarket generates piezoelectric power in parking lot. URL: <<http://www.engadget.com/2009/06/15/supermarket-generates-piezoelectric-power-in-parking-lot/>>
- [22] Fastcompany: Sainsbury Supermarket Opens People-Powered Checkout Lines. URL: <<http://www.fastcompany.com/blog/ariel-schwartz/sustainability/sainsbury-supermarket-opens-people-powered-checkout-lines>>
- [23] Kuchler, G., Beerstecher, R.: *ITS – The Tyre Information System of the Future*. URL: <<http://www.atonline.com/index.php;do=show/site=a4e/sid=17886930334fc0f4bb3d543923728942/alloc=3/id=7235>>
- [24] Continental AG: Intelligent Tyre Systems. URL: <<http://www.conti-online.com>>
- [25] Borghino, D.: *KAIST develops low-cost, large-area piezoelectric nanogenerator*. URL: <<http://www.gizmag.com/low-cost-large-area-piezoelectric-nanogenerator/22468/>>
- [26] The American Ceramic Society: Zhong-Lin Wang takes nanoscale piezo energy scavenging to heart. URL: <<http://ceramics.org/ceramictechtoday/tag/nanogenerator/>>
- [27] EcoFriend: Eco Gadgets: Bright Walk illuminates your run on renewable energy. URL: <<http://www.ecofriend.com/entry/eco-gadgets-bright-walk-illuminates-your-run-on-renewable-energy/>>
- [28] Kymissis, J. et. al.: *Parasitic Power Harvesting in Shoes*, Physics and Media Group, MIT Media Laboratory E15-410, Cambridge, MA. 02139 USA, 1998. URL: <http://resenv.media.mit.edu/pubs/papers/98_08_PP_wearcon_final.pdf>
- [29] EcoFriend: Ecopad - A concept tablet that can be self powered by 'tapping' into piezoelectricity. URL: <<http://www.ecofriend.com/entry/ecopad-a-concept-tablet-that-can-be-self-powered-by-tapping-into-piezoelectricity/>>
- [30] Grohmann, J.: *Piezoelektrická větrná elektrárna*. URL: <<http://www.ekobydleni.eu/vetrna-energie/piezoelektricka-vetrna-elektrarna>>
- [31] Nalezeno: Fosilní paliva. URL: <<http://www.nazeleno.cz/fosilni-paliva.dic>>