



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ANALÝZA SMART ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO ŽELEZNIČNÍ DOPRAVU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Zapletal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Bc. Vít Zapletal |
| Studijní program: | Aplikované vědy v inženýrství |
| Studijní obor: | Mechatronika |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2017/18 |

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

Analýza SMART zdrojů elektrické energie pro železniční dopravu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je analýza možností uplatnit SMART materiály jako nezávislé zdroje elektrické energie pro monitorování železniční dopravy. Jedná se především o řešení založené na piezoelektrických a magnetostrikčních materiálech. Práce bude zaměřena na multidisciplinární simulace a modelování těchto zařízení a porovnání výsledků pro různé konstrukční uspořádání.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše SMART materiálů vhodných pro aplikace v železniční dopravě.
2. Analýza a porovnání jednotlivých konstrukčních řešení.
3. Vytvoření simulačních modelů vybrané aplikace.
4. Analýza výsledků a návrh parametrů pro vybraný zdroj elektrické energie.

Seznam doporučené literatury:

BATRA, A. K. a A. ALOMARI: Power Harvesting via Smart Materials. SPIE, USA. ISBN 9781510608498, 2017

BOWEN, C. R., KIM, A. H., WEAVER, P. M. a DUNN, S.: Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. Energy & Environmental Science [online]. roč. 7, č. 1, s. 25. ISSN 1754-5692, 2014

PRIYA, S. a D. J. INMAN, ed.: Energy Harvesting Technologies [online]. Boston, MA: Springer US. ISBN 978-0-387-76463-4, 2009

ROSCOW, J., ZHANG, Y., TAYLOR J. a BOWEN C. R.: Porous ferroelectrics for energy harvesting applications. European Physical Journal: Special Topics [online]. roč. 224, č. 14–15, s. 2949–2966. ISSN 19516401, 2015

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou možných alternativních zdrojů napájení bezdrátových čidel monitorujících železniční dopravu a stav kolejí. Hlavním tématem jsou SMART materiály, konkrétně materiály s piezoelektrickými a magnetostrikčními vlastnostmi. Nejprve je nastíněna důležitá teorie pro pochopení chování materiálů a použitelná řešení generátorů, jsou vybrány nejvhodnější konstrukce následované simulacemi. Závěr práce patří návržení parametrů zvoleného generátoru, porovnání a zhodnocení SMART materiálů jako vhodného alternativního zdroje pro železniční dopravu.

Abstract

This master thesis deal with analysis of possible alternative energy sources for health monitoring of railway trafic. Mainly focus on energy harvesting via SMART materials, specifically materials with piezoelectric and magnetostrictive properties. First theoretical background and real concepts are introduced, followed by material modelling and simulations. End of thesis cover parameter suggestion and SMART materials comparation and valorizations.

Klíčová slova

Energy harvesting, Ansys, Matlab, Piezoelektrický materiál, Magnetostrikční materiál, Železniční trať

Keywords

Energy harvesting, Ansys, Matlab, Piezoelectric material, Magnetostrict material, Trackside

Bibliografická citace

ZAPLETAL, V. *Analýza SMART zdrojů elektrické energie pro železniční dopravu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně

dne.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Hadaši, Ph.D. za jeho rady a připomínky. Dále chci vyjádřit díky svým blízkým za nekonečnou podporu.

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod | 11 |
| 2. Formulace problému a cíle řešení | 12 |
| 3. Energy harvesting a SMART materiály | 13 |
| 4. Piezoelektrické materiály..... | 14 |
| 4.1 Princip piezoelektrického jevu | 14 |
| 4.2 Polarizace..... | 15 |
| 4.3 Popis piezoelektrických materiálů | 15 |
| 4.4 Piezoelektrické koeficienty | 17 |
| 4.4.1 Piezoelektrická nábojová konstanta d_{ij} | 17 |
| 4.4.2 Piezoelektrická napěťová konstanta g_{ij} | 17 |
| 4.4.3 Konstanta dielektrika neboli Permitivita ϵ_{ij} | 17 |
| 4.4.4 Elektromechanický coupling koeficient k_{ij} | 17 |
| 4.5 Materiály s piezoelektrickými vlastnostmi | 18 |
| 4.5.1 Krystaly | 18 |
| 4.5.2 Keramika..... | 18 |
| 4.5.3 Polymery..... | 19 |
| 4.5.4 Kompozity | 20 |
| 4.6 Piezoelektrické generátory..... | 21 |
| 4.6.1 Wischke, Masur, Kröner a Woias nosníkový generátor..... | 23 |
| 4.6.2 Tianchen, Jian, Ruigang a Xiaowei bubínkový generátor..... | 24 |
| 4.6.3 Wang, Shi, Xiang a Song Stack-type piezoelektrický generátor | 24 |
| 4.6.4 Wang, Chen a Guzman piezoelektrický harvester se zesilovacím rámem | 26 |
| 5. Magnetostrikční materiály | 27 |
| 5.1 Joulův jev..... | 27 |
| 5.2 Villariho jev | 28 |
| 5.3 Popis magnetostrikčních materiálů | 28 |
| 5.4 Materiály s magnetostrikčními vlastnostmi | 29 |
| 5.4.1 Terfenol-D | 29 |
| 5.4.2 Galfenol | 29 |
| 5.5 Magnetostrikční generátory | 30 |
| 5.5.1 GMEG generátor..... | 31 |
| 5.5.2 High-Impact vibration generátor..... | 32 |
| 6. Výběr konstrukčního řešení | 33 |
| 7. Návrh zesilovacího rámu a modelování SMART materiálů..... | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.1 | Návrh zesilovacího rámu | 34 |
| 7.1.1 | Pevnostní výpočet | 34 |
| 7.2 | Dynamika soustavy generátoru | 37 |
| 7.3 | Matematický model piezoelektrického materiálu | 38 |
| 7.3.1 | Návrh modelu..... | 38 |
| 7.3.2 | Model piezoelektrického generátoru | 40 |
| 7.4 | Matematický model magnetostrikčního materiálu | 41 |
| 7.4.1 | Návrh modelu..... | 41 |
| 7.4.2 | Parametry cívky | 42 |
| 7.4.3 | Model magnetostrikčního generátoru..... | 43 |
| 7.4.4 | Model magnetostrikčního generátoru ve FEMM..... | 44 |
| 8. | Citlivostní analýza SMART generátorů | 47 |
| 8.1 | Piezoelektrický generátor | 48 |
| 8.2 | Magnetostrikční generátor | 50 |
| 9. | Porovnání SMART generátorů | 52 |
| 10. | Závěr | 55 |
| 11. | Literatura a použité zdroje..... | 57 |
| 12. | Seznam obrázků, grafů a tabulek..... | 61 |
| 13. | Seznam použitých symbolů | 63 |
| 14. | Seznam příloh..... | 65 |

1. Úvod

V dnešní době si již život bez elektrické energie nedokážeme představit, chytré bezdrátové senzory se používají prakticky všude a internet věcí (anglicky *Internet of Things*) se každým dnem rozrůstá. S tím však přichází otázka, jak všechna tato zařízení napájet.

Jistě, jsou tu baterie, ty se však časem vybíjí a je třeba je dobíjet, nebo dokonce nahrazovat. Je zde však i jiné řešení a tím je energy harvesting/scavenging, obor zabývající se přeměnou nějaké pasivní, resp. ztrátové energie na energii užitečnou, tedy elektrickou. Pro tento proces využívá tzv. energy harvester, což je zařízení, které přeměnu energie uskutečňuje. Toto zařízení může být mechanické a využívat elektromagnetickou indukci, jako například větrná turbína, nebo může využívat tzv. SMART materiál, což je materiál se specifickými vlastnostmi.

Tato práce má za úkol prozkoumat možnosti využití energie průjezdu vlaku pro generování elektrické energie. Velká část železničních tratí, hlavně v rozvojových zemích či amerických pouštích není elektrizována a případná čidla na trati není jak napájet, využití baterie z dlouhodobého hlediska z důvodu její životnosti není nejlepší volbou.

V ideálním případě by samotný průjezd vlaku mohl díky energy harvesteru vytvořit dostatečné množství energie pro napájení čidel a nějakého komunikujícího zařízení, které by dalo vědět, že se vlak blíží, případně sledovalo stav kolejnic (anglicky *Health Monitoring*). K dispozici je nepřehledné množství způsobů, ovšem jen některé z nich jsou použitelné. Využití větrné energie při průjezdu není špatnou variantou, ovšem v oblastech, kde v zimních měsících teplota klesá pod bod mrazu a sněží, by větrná turbína mohla zamrznout. Dále se nabízí solární energie, v tomto případě by vlak ani nebyl potřeba, ovšem jak budou čidla napájena v noci, systém by stejně musel obsahovat baterii, která časem degraduje a nezvládá nízké zimní teploty.

Nejdeálnější zdroj se zdají být vibrace případně mechanický posuv pražců a kolejnice při průjezdu vlaku, pohyb by se dal využít jak pro elektromagnetickou konstrukci harvesteru, tak pro konstrukci využívající SMART materiál. Modelování a analýzám poslední varianty se celá práce zabývá, konkrétně využitím piezoelektrických a magnetostrikčních materiálů.

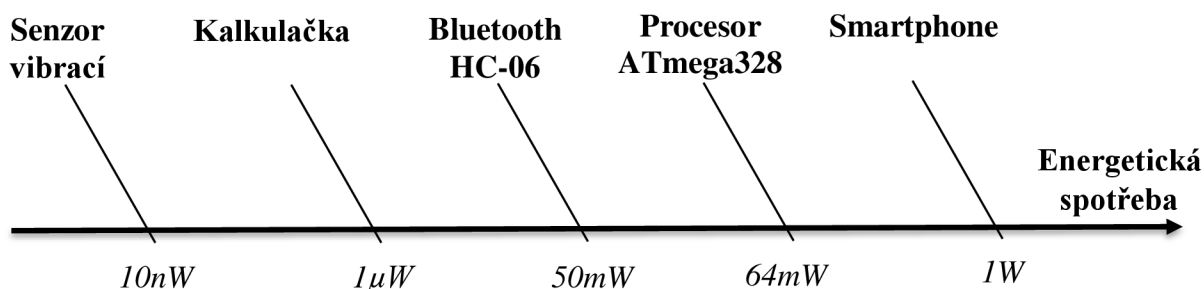
Téma jsem si vybral z důvodu zajímavosti, není příliš rozšířené a myslím, že uplatnění energy harvesting u v praxi bude nadále pozvolna růst, domnívám se však, že harvestery mají budoucnost ve spojení s bateriemi. S myšlenkou dobíjení elektrických zařízení chůzí se v současnosti zabývá již vícero univerzit. Na trhu je již dostupná například power banka se solárním panelem, představa že ji necháme 10 hodin na slunci a zařízení se dobije je však milná, její účinnost je velmi nízká a jde tak spíše o marketingový tah, ale již toto zařízení se dá pokládat za harvester, neboť mění všudypřítomnou sluneční energii na elektrickou, byť ve velmi malém měřítku.

2. Formulace problému a cíle řešení

Železnice je jedním z nejefektivnějších způsobů dopravy a tratě tak protínají moderní města, oblasti rozvojových zemí i pouště, právě u posledních dvou zmíněných nastává problém. Tratě zde nejsou elektrifikovány a není tak možné jednoduše napájet čidla sloužící k monitoringu dopravy a stavu kolejí, problém se dá řešit více způsoby a tato práce si dává za cíl prozkoumat jeden z nich. Cílem je analýza využití SMART materiálů jako zdroje elektrické energie generované průjezdem vlaku. Práce nejprve vysvětlí základní pojmy, představí materiály a položí teorii nutnou k pochopení principu funkce SMART zdrojů energie. Následně budou představena vybraná konstrukční řešení a bude provedena jejich analýza. Největší částí práce bude modelování a simulace jednotlivých řešení. Závěr patří porovnání výsledků a vyhodnocení SMART energy harvesterů.

3. Energy harvesting a SMART materiály

Pro začátek je vhodné si říci co pojem Energy Harvesting nebo také Energy Scavenging představuje. Jde o obor zabývající se přeměnou nějaké okolní nebo ztrátové energie, která poté slouží k napájení mikroelektroniky a jiných zařízení s nízkou spotřebou. Příklady spotřeb některých zařízení lze pozorovat v obrázku 1. Lze vidět jakou spotřebu má například celek procesor ATmega328, který využívá Arduino, senzor vibrací a bluetooth modul. Všechny tyto komponenty by byly třeba pro snímání, zpracování a posílání dat.



Obrázek 1: Energetická spotřeba některých zařízení

Energy harvesting má několik odvětví, rozdělených podle druhu využívané energie. Patří zde:

- Energie záření
- Tepelná energie
- Energie proudění plynů a kapalin
- Mechanická energie

Využití záření je nejspíše nejznámějším, obliba solárních panelů stoupá a v současnosti se hned několik společností zabývá integrací solárního panelu pod display smartphonů. Co se tepelné energie týče, je tím myšlen spíše teplotní gradient, ten skvěle využívají například Peltierovy články, které při zahřátí jedné strany a ochlazení druhé generují elektrické napětí. Proudění plynů a kapalin využívají větrné a vodní turbíny, existují již zařízení, která dokáží využívat energii vln a napájet například bójku, která může snímat informace o teplotě a rychlosti větru. V poslední době se do popředí dostává také využití vibrací, spousta výzkumů se zabývá využitím vibrací při pohybu člověka, při chůzi by bylo možné například nabíjet smartphone, všechny tyto výzkumy jsou však v plenkách a prototyp s úctyhodnou účinností je zatím jen snem.

Tato práce je zaměřena na využití mechanické energie spolu s použitím tzv. SMART materiálů [1], což jsou materiály, které mají schopnost sami reagovat na okolní podmínky, najdeme zde elektro-reologické a magneto-reologické materiály, magnetostrikční materiály, chromické materiály, které dokáží měnit barvu při změně náboje, teploty nebo světla, piezoelektrické materiály, nebo slitiny s tvarovou pamětí.

Nejpoužívanější SMART materiály v energy harvesting, jsou piezoelektrické a magnetostrikční materiály a využitím právě těchto materiálů se práce zabývá.

4. Piezoelektrické materiály

Piezoelektrický jev byl objeven roku 1880 bratry Pierre a Jacques Curieovými, kteří vypořizovali povrchový elektrický náboj při stlačení krystalu turmalínu [10]. Piezoelektrické vlastnosti jsou závislé na uspořádání krystalické mřížky [1][2]. Existuje celkem 7 krystalových soustav, jsou to:

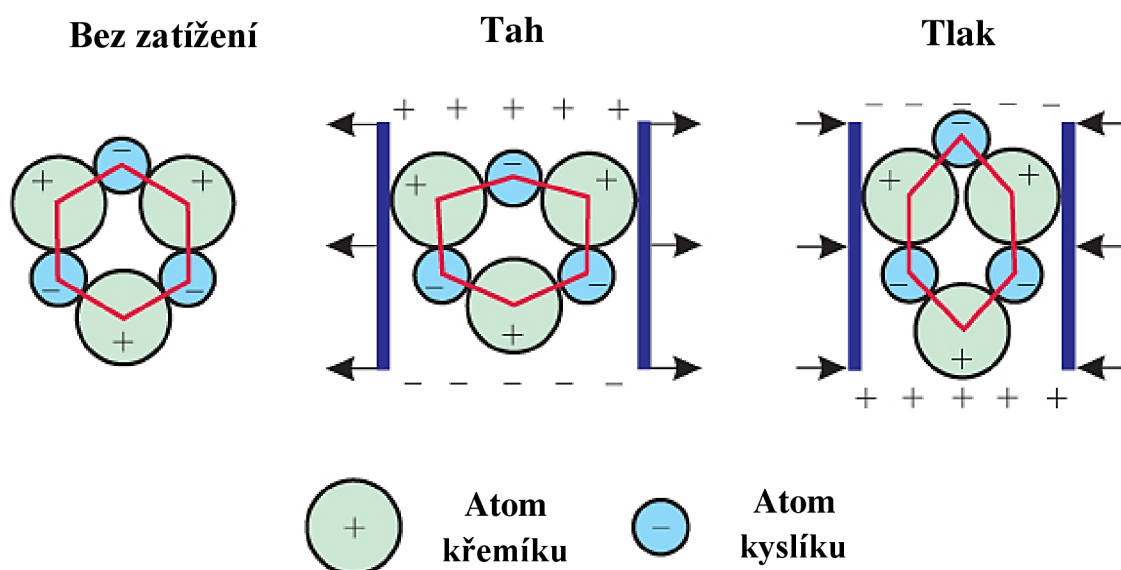
- triklinická
- monoklinická
- ortorombická
- trigonální
- hexagonální
- kubická

Tyto krystalové soustavy tvoří celkem 32 bodových grup. Piezoelektrické vlastnosti má 20 z nich, jedná se o soustavy bez středu symetrie, mezi které nepatří hexagonální a kubická soustava.

Piezoelektrické materiály mají pak tu vlastnost, že při mechanické deformaci vytvářejí na opačných stranách různý potenciál, tím mezi nimi vzniká elektrické napětí, tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev [3]. Funguje však i reverzně a materiál se při vystavení vnějšímu elektrickému poli mechanicky deformuje, takové chování popisuje nepřímý piezoelektrický jev.

4.1 Princip piezoelektrického jevu

Princip piezoelektrického jevu je zjednodušeně vysvětlen v obrázku 2. Při zatížení dochází k asymetrickému posunu aniontů a kationtů, tím vzniká dipólový moment. Během tahového namáhání je pak na jedné straně více kladných atomů křemíku a na druhé záporných atomů kyslíku. Tím se na protějších stranách vytváří kladný a záporný potenciál a vzniká elektrické napětí. Totéž se děje i při namáhání tlakem s tím rozdílem, že strany mají opačné znaménko potenciálu. Při uvolnění se anionty a kationty vrací do původní pozice a soustava se stává elektricky neutrální.

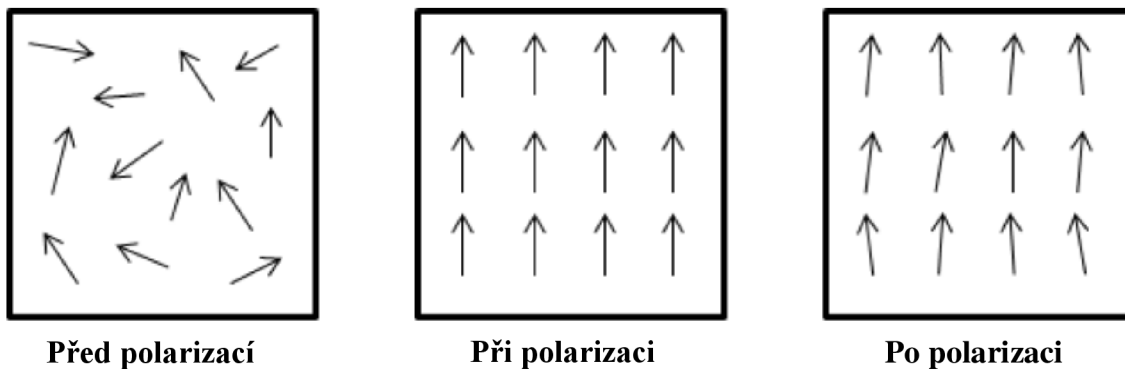


Obrázek 2: Piezoelektrický efekt na krystalu SiO₂ [25]

4.2 Polarizace

Polarizace je proces, kterým zlepšujeme piezoelektrické vlastnosti daného materiálu [11]. Na makroskopické úrovni se materiál skládá z množství elektrických dipólů, které jsou orientovány různými směry, když je materiál vystaven mechanickému namáhání, každý dipól změní orientaci do polohy, v níž má nižší celkovou elektrickou i mechanickou energii. Jestliže jsou všechny dipóly náhodně uspořádány, piezoelektrický efekt bude zanedbatelný. Proto je důležité vytvořit takový počáteční stav, v kterém mají dipóly stejnou orientaci. Tohoto stavu lze docílit právě polarizací, při níž je materiál vystaven velmi silnému elektrickému poli, které dipóly vyrovná. Po „vypnutí“ elektrického pole se dipóly nevrátí do svojí původní pozice a jejich směr zůstává více či méně stejný, viz obrázek 3.

Je nutno dodat, že materiál může být de-polarizován, a to opět elektrickým polem působícím jiným směrem, nebo dosažením Curieovy teploty [12], při které ztrácí piezoelektrické vlastnosti a to z důvodu přechodu z fáze nesymetrického soustavy do symetrické.



Obrázek 3: Orientace elektrických dipólů před, během a po polarizaci [11]

4.3 Popis piezoelektrických materiálů

Konstitutivní lineární vztahy popisující elektromechanické chování uvedený níže jsou odvozeny ze základních termodynamických principů. [1][5][4]

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{E} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \epsilon^T \mathbf{E} \quad (4.2)$$

Kde \mathbf{D} představuje hustotu elektrického náboje, \mathbf{S} je přetvoření, \mathbf{s}^E je elastická poddajnost za konstantní intenzity elektrického pole, \mathbf{T} definuje vektor mechanických napětí, \mathbf{d} představuje matici piezoelektrických koeficientů, \mathbf{d}^T je pak pouze její transpozice, \mathbf{E} vyjadřuje intenzitu elektrického pole a ϵ^T je matice absolutní permitivity materiálu.

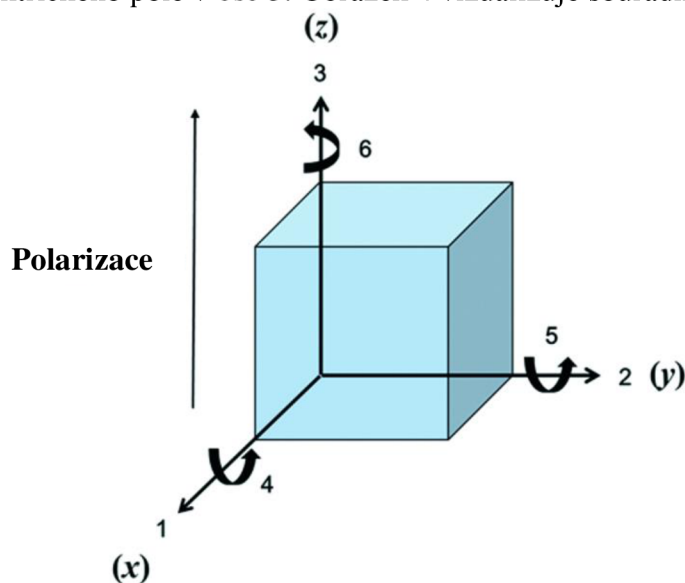
Rovnice (4.1) a (4.2) lze dále rozepsat podle normy ANSI-IEEE 176 jako:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Dolní indexy veličin udávají orientaci konstanty vzhledem k souřadnému systému [11]. Fakt, že piezoelektrickými vlastnostmi disponují pouze materiály s nesymetrickou krystalovou soustavou, implikuje nehomogenitu jejich vlastností v různých směrech. Proto byl zaveden souřadný systém, který jasně definuje směry vzhledem k materiálu. Podle konvencí se směr polarizace volí rovnoběžně s osou 3.

Například piezoelektrická nábojová konstanta d_{31} udává mechanické napětí v ose 1 při působení elektrického pole v ose 3. Obrázek 4 vizualizuje souřadný systém.



Obrázek 4: Souřadný systém [26]

4.4 Piezoelektrické koeficienty

Následující kapitola představuje některé důležité konstanty týkající se vlastností piezoelektrických materiálů. Tyto vlastnosti výrobce většinou neuvádí, čímž stěžují možnosti simulací a výpočtů.

4.4.1 Piezoelektrická nábojová konstanta d_{ij}

Tato konstanta udává podíl mezi elektrickým nábojem a zatěžující silou na jednotku plochy, jednotkou je [C/N] [1][12]. Index i udává směr generování elektrického náboje a j udává směr zatěžující síly.

4.4.2 Piezoelektrická napěťová konstanta g_{ij}

Koeficient udává podíl mezi generovaným elektrickým polem a mechanickým napětím, které na materiál působí, jednotkou je [Vm/N] [1][12]. Index i udává směr elektrického pole a j udává směr působení mechanického napětí.

4.4.3 Konstanta dielektrika neboli Permittivita ϵ_{ij}

Tato hodnota udává absolutní permitivitu piezoelektrického materiálu při konstantním mechanickém napětí[1][12]. Index i udává, v kterém směru působí konstantní mechanické napětí.

4.4.4 Elektromechanický coupling koeficient k_{ij}

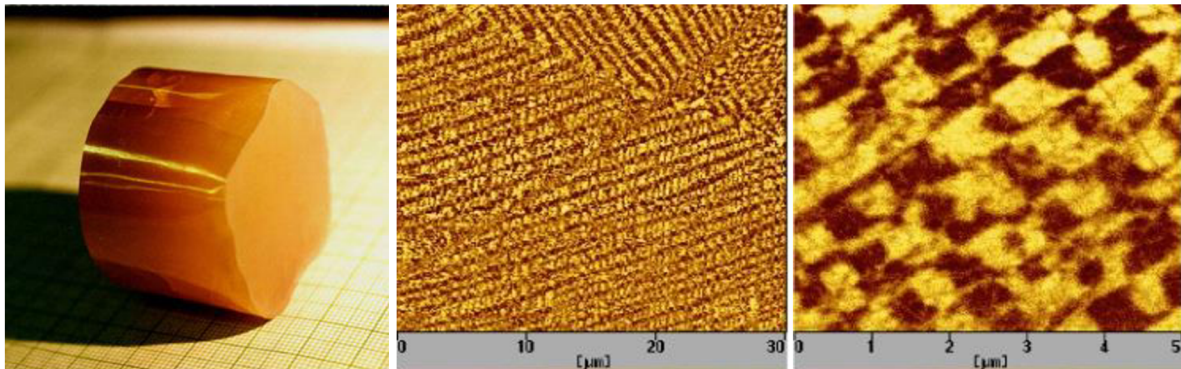
Udává hodnotu efektivity, s jakou materiál dokáže měnit mechanickou energii na elektrickou a naopak[1][12]. Pro nízké frekvence je její hodnota couplingu běžné piezokeramiky 0.3 až 0.75, jinak řečeno účinnost 30 až 75%. Speciálně navržená keramika může mít i více. Index i udává směr elektrického pole a j udává směr působení mechanických vibrací

4.5 Materiály s piezoelektrickými vlastnostmi

Piezoelektrické materiály se dělí do čtyř skupin, jsou to krystaly, keramika, polymery a kompozity, v následující kapitole budou jednotlivě rozebrány a porovnány.

4.5.1 Krystaly

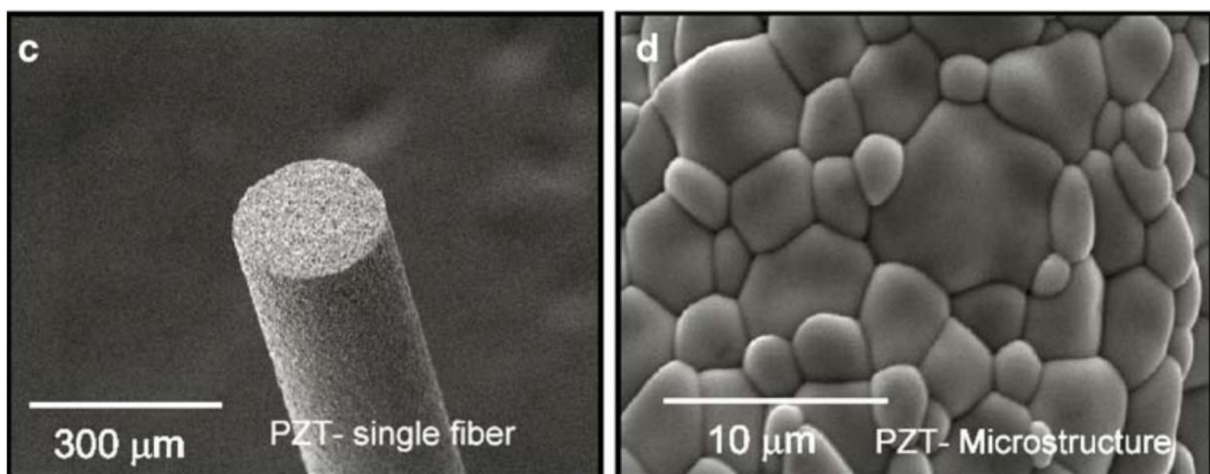
Pro krystaly je charakteristická homogenita, kationty a anionty jsou periodicky organizované v celém materiálu [9]. Nejvýjimečnějším krystalem je PMN-PT, piezoelektrické vlastnosti tohoto materiálu převyšují i piezokeramiku, avšak jeho výroba je velmi složitá a proto se v energy harvesting uplatňuje jen zřídka. Obrázek 5 zobrazuje strukturu PMN-0.33PT krystalu.



Obrázek 5: Struktura krystalu PMN-0.33PT [27][28]

4.5.2 Keramika

Je zdaleka nejpoužívanějším piezoelektrickým materiálem ze všech a to nejen v oblasti energy harvesting, ale také sonarů a aktuátorů. Keramika na rozdíl od krystalů není homogenní a obsahuje mnoho krystalových zrn stejných chemických vlastností[6]. Hlavními představiteli této skupiny jsou PZT a BaTiO₃. PZT bylo vyvinuto okolo roku 1952 v Tokijském technologickém institutu. Tato fáze se tvoří za teplot okolo 1000 °C ze směsi olova, zirkonu a titanu. Jejím neúprosným nedostatkem jsou mechanické vlastnosti a z těch plynoucí nízká flexibilita. Na obrázku 6 lze pozorovat mikrostrukturu PZT.

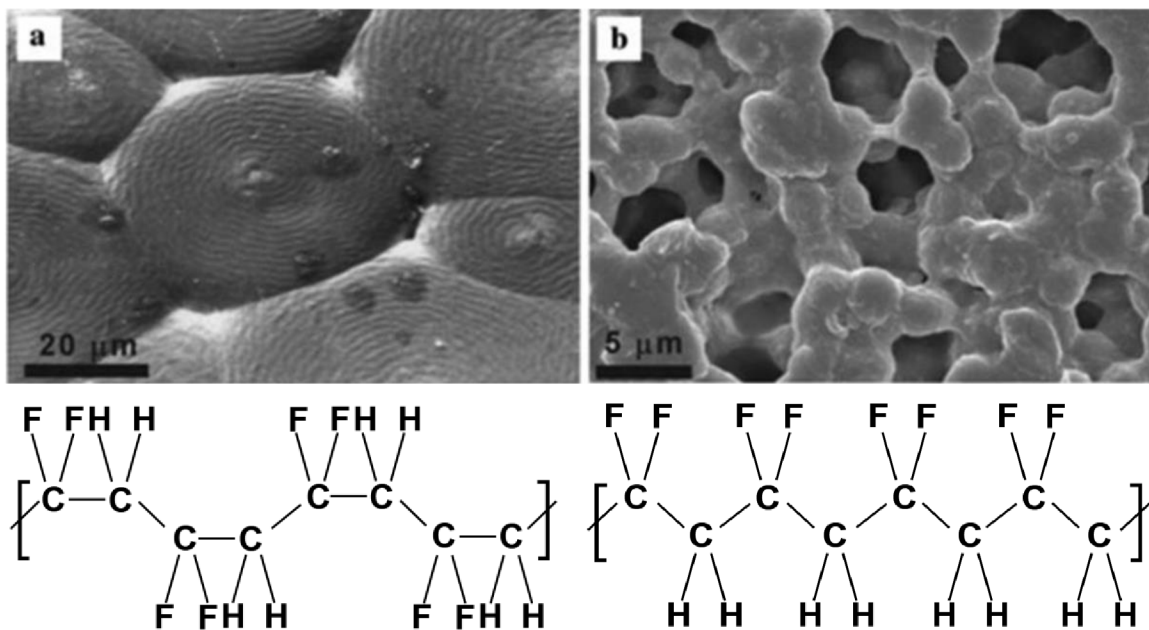


Obrázek 6: Mikrostruktura PZT keramiky [29]

4.5.3 Polymery

Největším neduhem piezoelektrických materiálů, ať už jde o krystaly nebo keramiku jsou bezesporu jejich mechanické vlastnosti, neboť se jedná o velice křehký materiál. Polymer s piezoelektrickými vlastnostmi byl představen již v roce 1969, avšak pozornost si začal získávat až začátkem 21. století a to zejména kvůli využití v biomedicínských aplikacích [6]. Nejvýznamnějším je Poly-vinyliden-fluorid neboli PVDF. Jedná se o polykrystalický polymer, který se vyskytuje ve čtyřech fázích α , β , γ a δ . Piezoelektrické vlastnosti obsahuje pouze fáze β , důvodem je fakt, že fluor a vodík jsou na opačných stranách a tím vytváří dipólový moment, který je charakteristický pro všechny piezoelektrické materiály [7]. Rozdíl v chemické struktuře různých fází lze pozorovat v obrázku 7.

Velkou nevýhodou je potřeba velkého elektrického pole pro polarizaci a hlavně nízká piezoelektrická napěťová konstanta d_{33} . To je také důvodem proč polymery v energy harvesting nenacházejí široké uplatnění.

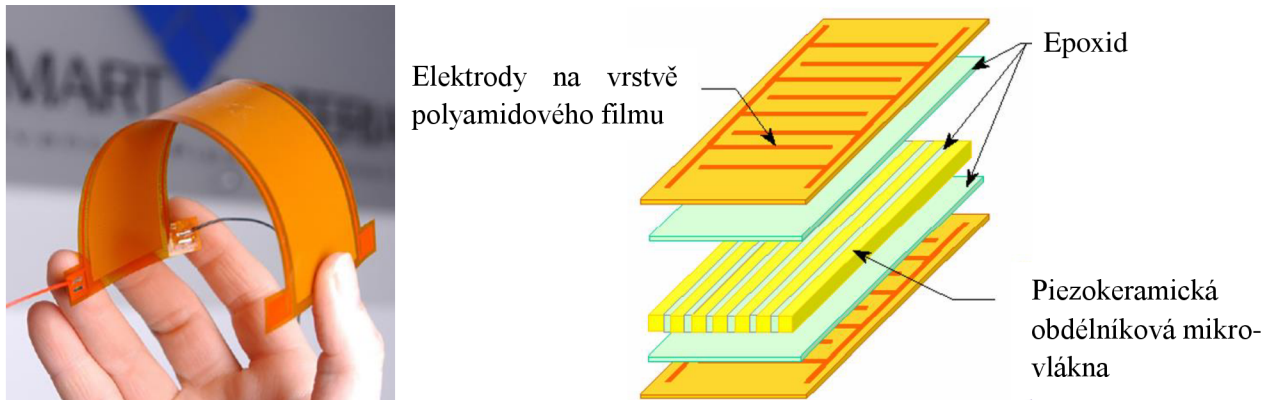


Obrázek 7: a) Struktura fáze α [6]

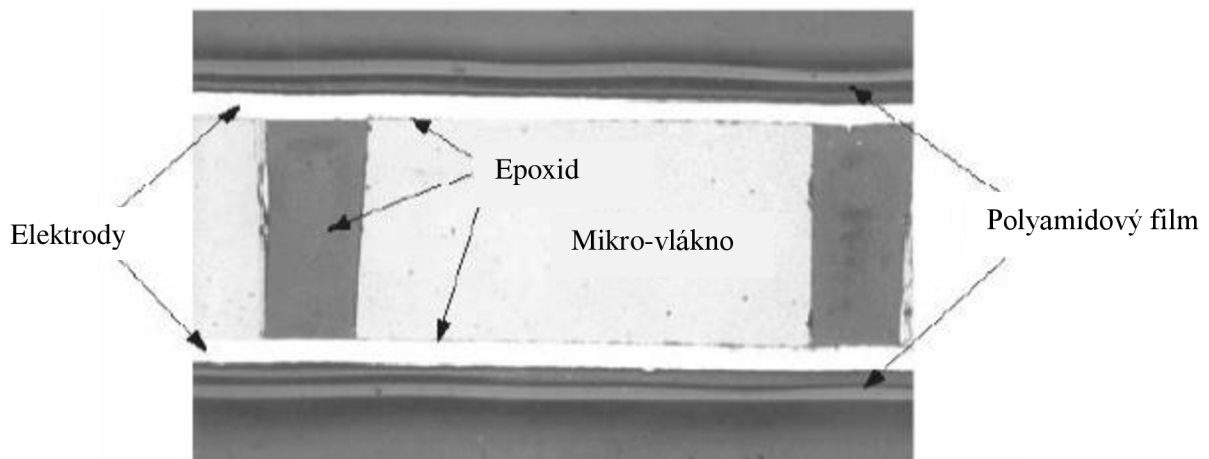
b) Struktura fáze β [30]

4.5.4 Kompozity

Křehkost keramiky a nízký piezoelektrický napěťový koeficient PVDF, vedl k vývoji piezoelektrických kompozitů, první z nich spatřil světlo světa v roce 2000 v NASA Langley Research Center, jeho výhodou je vysoká flexibilita a robustnost [8]. Rozdílem je použití piezoelektrických obdélníkových mikro-vláken namísto monolitického kusu piezoelektrického materiálu, tyto vlákna jsou zapařena v epoxidu, který soustavu vláken drží pohromadě a zároveň brání šíření trhlin. Obalem je pak polyamidový film s elektrodami. Obrázek 8 zobrazuje složení mikro-vláknového kompozitu, obrázek 9 pak řez jedním mikrovláknem.



Obrázek 8: Mikro-vláknový kompozit [31]



Obrázek 9: Řez kompozitem [32]

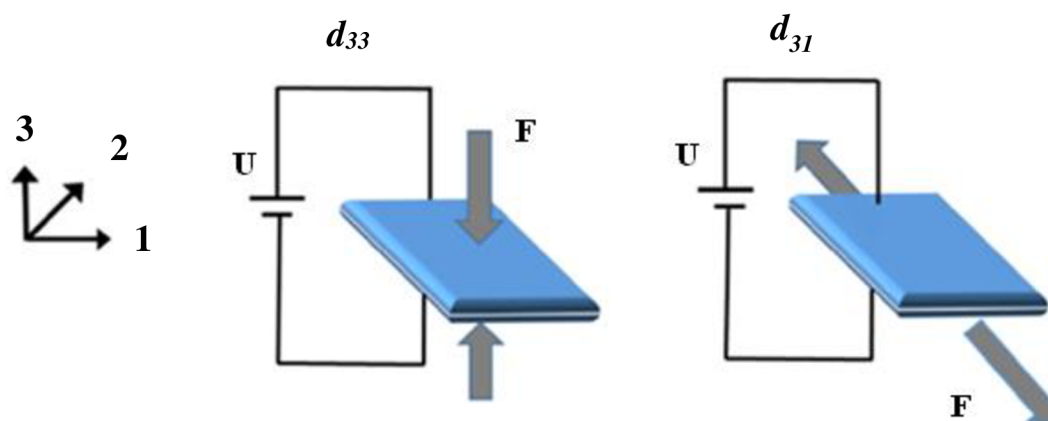
Následující tabulka ukazuje porovnání vlastností piezoelektrických materiálů, je důležité podotknout, že vlastnosti jsou velmi závislé na chemickém složení, polarizaci i způsobu výroby, proto jsou čísla pouze orientační, zároveň není uveden kompozit a to z důvodu, že se vlastně nejedná o materiál, ale spíše o specifické uspořádání piezokeramiky.

| Vlastnosti | PZT5A | PMN-0.33PT | PVDF |
|------------------------------|-------|------------|------|
| d_{31} [pC/N] | -171 | -1330 | 25 |
| d_{33} [pC/N] | 374 | 2820 | -33 |
| Curie. Teplota [°C] | 365 | 145 | 125 |
| Hustota [kg/m ³] | 7700 | 8060 | 1880 |

4.6 Piezoelektrické generátory

Co je piezoelektrický materiál a jaké má vlastnosti bylo uvedeno v předešlých kapitolách. Klíčem k proměně materiálu ve zdroj elektrického napětí jsou vibrace, pomocí nichž je materiál periodicky namáhán.

Generátory mají nejčastěji konstrukční uspořádání módu d_{31} nebo d_{33} . Rozdíl mezi směry namáhání a generovaným napětím lze vidět v Obrázek 10. Směr polarizace je tradičně ve směru osy 3.

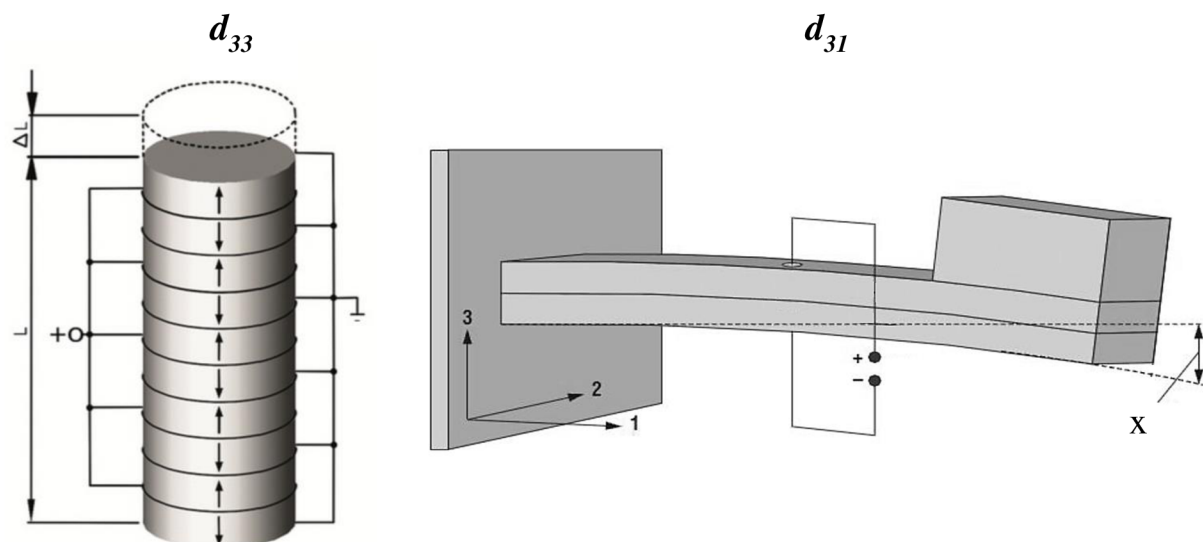


Obrázek 10: Módy piezo-generátorů [33]

Generátory pak mohou vypadat jako na obrázku 11. Výstupní parametry generátorů, lze měnit počtem a velikostí piezoelektrických vrstev.

V případě d_{31} se většinou jedná o vetknutý nosník, na který je nalepená vrstva piezoelektrického materiálu, lze se setkat s pojmy unimorfnní, bimorfnní a polymorfnní [5]. Jedná se pouze o počet vrstev, unimorfnní obsahuje jen jednu vrstvu piezoelektrického materiálu, bimorfnní dvě a polymorfnní konstrukce více vrstev. Na konci nosníku může a nemusí být zátěž.

Konstrukce d_{33} může mít také podobu nosníku, častěji ji však lze vidět ve formě válce, nebo kvádru tzv. Stack-type, který se skládá z mnoha opačně polarizovaných vrstev piezoelektrického materiálu. Tento typ je výkonnější, avšak je třeba řádově vyšších sil pro stlačení materiálu a tedy generování napětí.



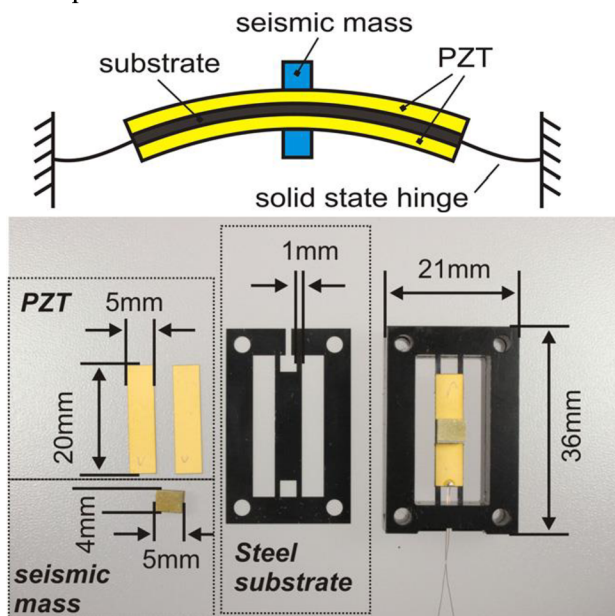
Obrázek 11: Schéma piezoelektrických generátorů [34][35]

Aby bylo u konstrukcí s vetknutým nosníkem dosaženo maximální efektivity, musí budící vibrace působit v rezonančním pásmu nosníku, každá konstrukce tak musí být navržena speciálně pro danou aplikaci.

Následující podkapitoly popisují některá konstrukční řešení piezoelektrických generátorů vhodných pro umístění na železniční trať.

4.6.1 Wischke, Masur, Kröner a Woias nosníkový generátor

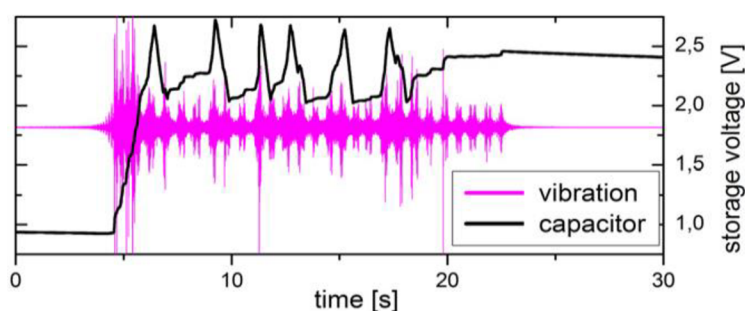
Harvester je konstruován pro napájení senzoru monitoringu stavu železnic [17]. Autoři se rozhodli pro upravený design nosníku a to z důvodu velkého zrychlení pražce, které by způsobovalo velké výchylky nosníku a mohlo tak vést k jeho porušení. Na obrázku 12 lze pozorovat nejprve schéma a poté realizaci harvesteru.



Obrázek 12: Schéma a realizace harvesteru [17]

Jedná se o ocelový nosník vetknutý na obou stranách, konstrukce je bimorfní, tedy s dvěma vrstvami PZT, uprostřed nosníku se nachází závaží, jímž se konfiguruje vlastní frekvence soustavy. Zařízení celkem obsahuje 4 tyto harvestery naladěné na frekvence 437, 461, 480 a 498 Hz. Spolu s piezogenerátorem vyvinuly i elektrický obvod, který se o produkovanou energii stará.

Zařízení bylo testováno po dobu 6. dní v reálných podmínkách, jako zátěž byl použit 100k Ω rezistor. Test spočíval v poslání 135 μ J na elektrickou zátěž pokaždé, když napětí na kondenzátoru přesáhne 2.55V. Graf v obrázku 13 ukazuje stav napětí na kondenzátoru a vibrace při průjezdu vlaku.

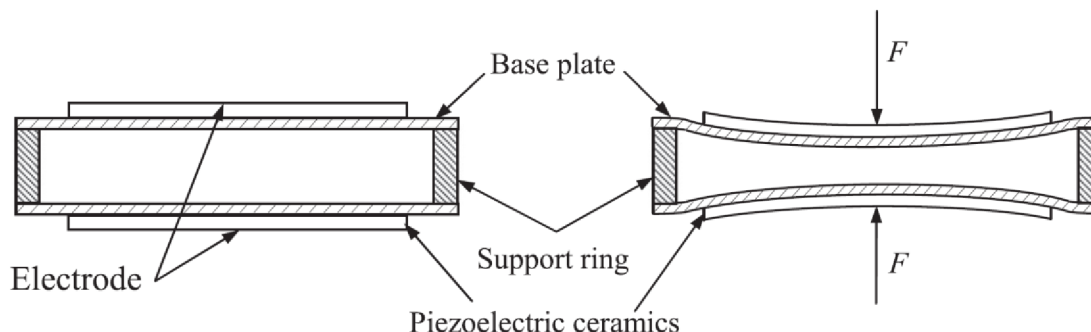


Obrázek 13: Stav kondenzátoru při pracovním cyklu [17]

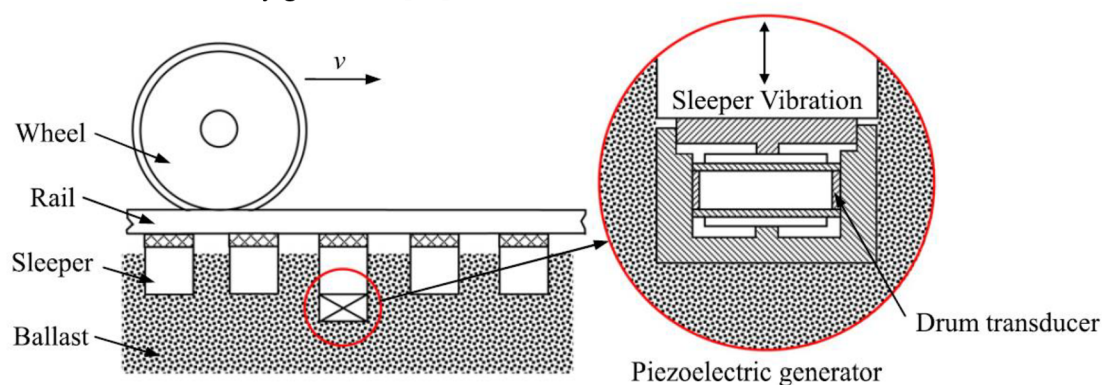
Celkem bylo napočítáno 580 průjezdů vlaku, z nichž 93 nedokázalo shromáždit dostatek elektrické energie k poslání oněch 135 μ J. Naproti tomu 487 se to úspěšně povedlo. Ze závěrečných výsledků vyplývá, že průměrná získaná energie za jeden průjezd byla 395 μ J.

4.6.2 Tianchen, Jian, Ruigang a Xiaowei bubínkový generátor

Autoři se opět zaměřili na železnice a napájení senzorů, jejich přístup spočívá ve využití drum transduceru [18]. Konstrukci lze vidět v obrázku 14 a obrázku 15. Jedná se o ocelový rám, který je pokryt vrstvou PZT. Harvester je umístěn pod pražcem, při průjezdu vlaku se nosník zatíží a dochází k vytvoření ohybového momentu a vzniku elektrického napětí.

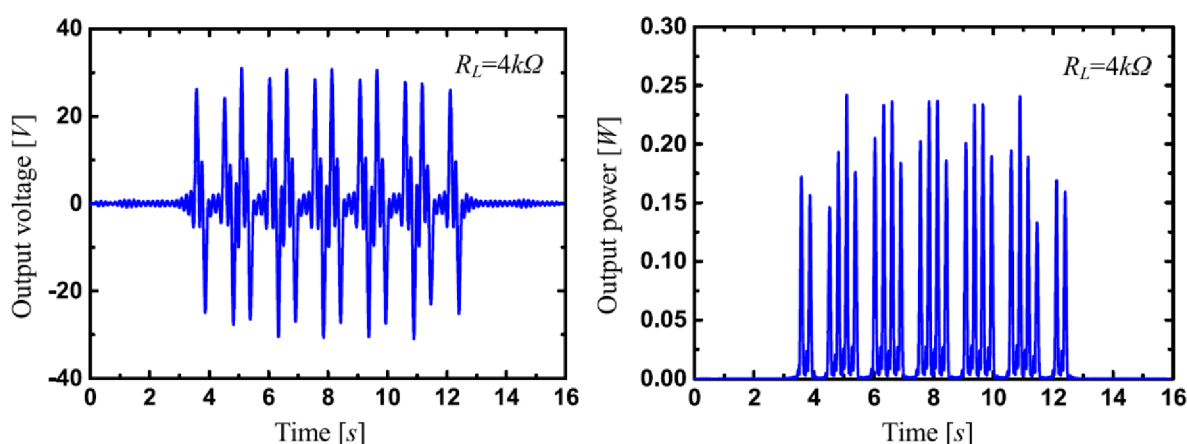


Obrázek 14: Piezoelektrický generátor [18]



Obrázek 15: Umístění generátoru [18]

V rámci vývoje byla provedena simulace, jejíž výsledky jsou v obrázku 16. Graf nalevo ukazuje generované napětí a graf napravo elektrický výkon, při simulaci byla použita elektrická zátěž $4\text{ k}\Omega$.

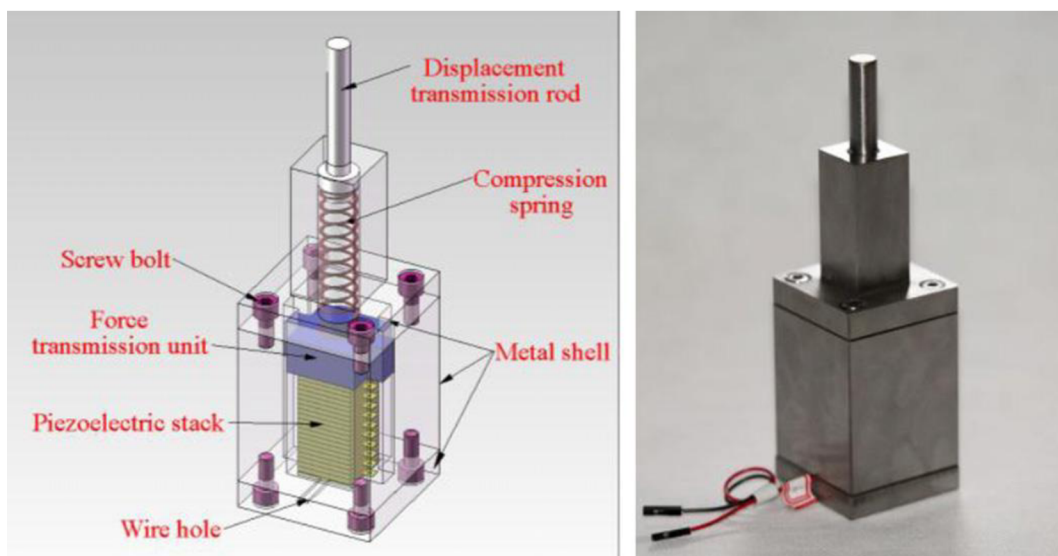


Obrázek 16: Výsledky simulace [18]

Závěrem autoři provedli laboratorní experiment, jehož výsledky lze najít v práci.

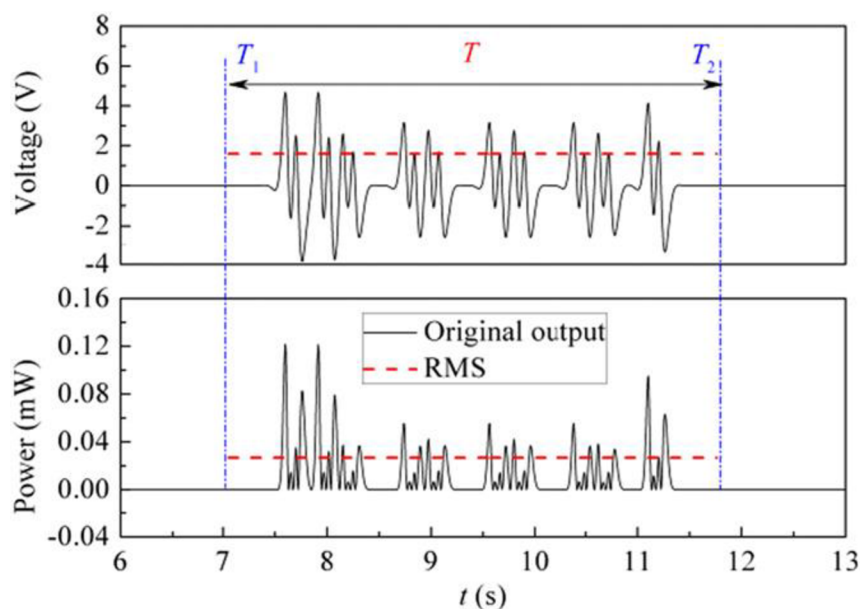
4.6.3 Wang, Shi, Xiang a Song Stack-type piezoelektrický generátor

Práce těchto pánů se zabývá simulací a experimenty patch-type a stack-type piezogenerátorů, v této práci však bude uveden pouze stack-type [19]. Konstrukce tohoto harvesteru je popsána v obrázku 17. Piezoelektrický materiál je vrstven na sebe, celkem obsahuje 20 vrstev. Zatěžování je provedeno pomocí tyče, která může být umístěna jak pod pražcem, tak přímo pod kolejnicí. Důležitou součástí konstrukce je stlačující pružina, bylo zjištěno, že čím větší má tuhost, tím větší je i celkový výstupní výkon.



Obrázek 17: Stack-type piezoelektrický generátor [19]

Byl proveden experiment s elektrickou zátěží $180\text{k}\Omega$ a při rychlosti vychýlení 30m/s . Výsledky je možné vidět v obrázku 18.

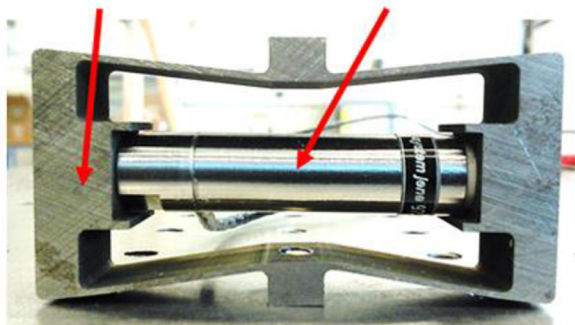


Obrázek 18: Výsledky experimentu [19]

4.6.4 Wang, Chen a Guzman piezoelektrický harvester se zesilovacím rámem

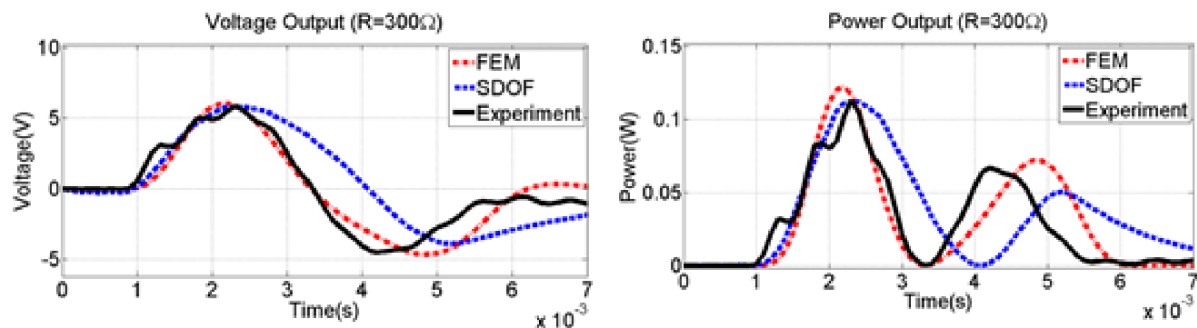
Autoři také použili stack-type piezoelektrický generátor, avšak soustředili se na zatížení, zkonstruovali force amplification frame, což se dá volně přeložit jako zesilovací rám [20]. Ten ve skutečnosti převádí horizontální sílu na vertikální v určitém poměru, takže správným dimenzováním zesilovacího rámu je harvester možné použít pro jakoukoli velikost zatěžovací síly.

Zesilovací rám Piezoelektrický válec



Obrázek 19: Piezoelektrický generátor se zesilovacím rámem [20]

V rámci vývoje rámu bylo testováno více variant zátěže piezoelektrického materiálu a právě tato se ukázala jako nejúčinnější. V obrázku 20 lze pozorovat výsledky napětí a výkonu, je vidět i odchylka analytického modelu s jedním stupněm volnosti a metody konečných prvků od reálného experimentu. Experiment byl proveden s elektrickou zátěží 300Ω .



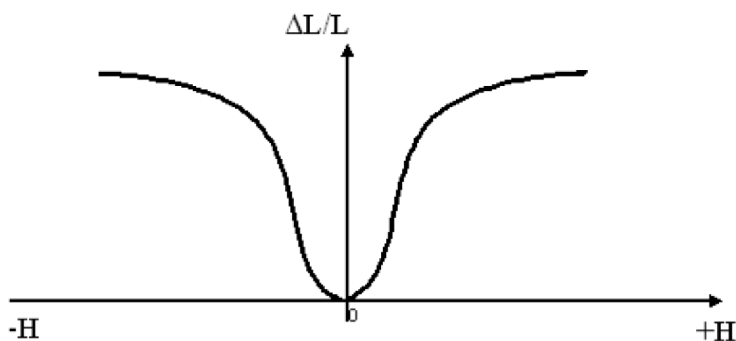
Obrázek 20: Výsledky simulací a experimentu [20]

5. Magnetostrikční materiály

Magnetostrikce byla popsána roku 1842 anglickým fyzikem Jamesem Joulem, který vypočítal změnu délky vzorků feromagnetických materiálů důsledkem presence magnetického pole [13]. Magnetostrikčními vlastnostmi mohou disponovat pouze feromagnetické materiály, neboť se skládají z domén, přičemž každá z těchto domén má odlišnou magnetickou polarizaci. Tuto vlastnost doprovází výskyt následujících jevů:

- Joulův jev
- Villariho jev
- ΔE - jev
- Wiedermannův jev
- Matteucioho jev
- Barretův jev
- Nagaoka-Honda jev

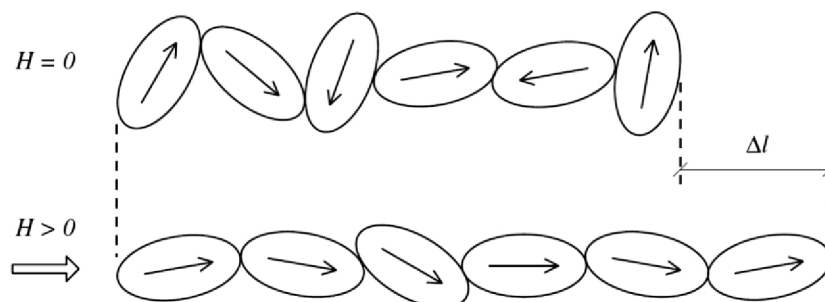
Nejvíce využívané jevy jsou Joulův a Villariho jev, které jsou na sebe inverzní a charakterizují vztah mezi rozměry materiálu a magnetickým polem. Křivka v obrázku 21 popisuje velikost poměrného prodloužení v závislosti na magnetickém poli.



Obrázek 21: Poměrné prodloužení v závislosti na magnetickém poli [13]

5.1 Joulův jev

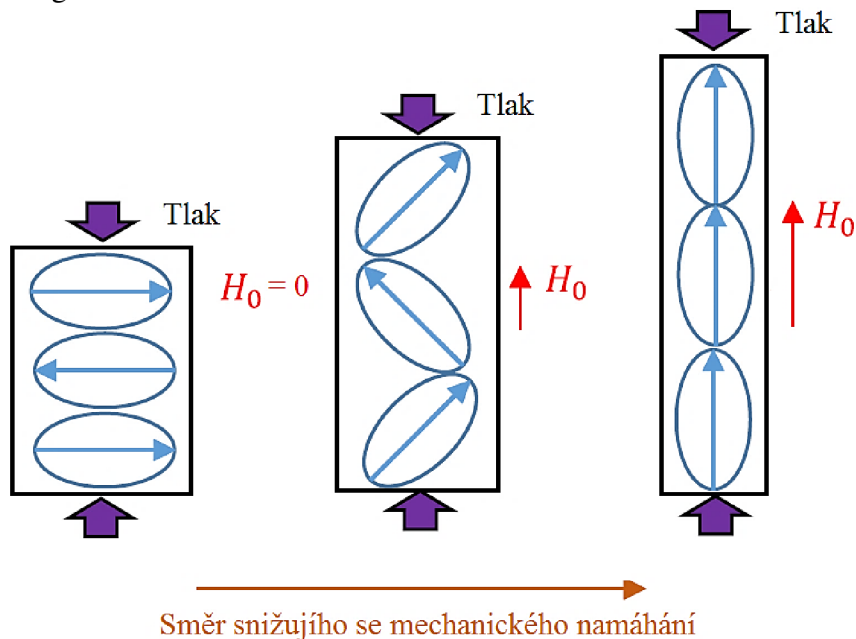
Spočívá ve změně rozměrů vzorku materiálu v magnetickém poli, konkrétně ke zvětšení ve směru působení magnetického pole [14]. Princip lze pozorovat v obrázku 22. Elipsy představují domény a šipky směr jejich magnetické polarizace. Při absenci vnějšího magnetického pole mají domény nahodilé směry magnetických momentů. Při působení magnetického pole se magnetické domény natočí tak, aby byly s polem rovnoběžné, tím se změní rozměr vzorku o Δl . Čím větší je magnetické pole, tím větší je ji změna velikosti materiálu [13]. Tohoto jevu se využívá v konstrukci aktuátorů.



Obrázek 22: Joulův jev [14]

5.2 Villariho jev

Jak bylo již zmíněno, Villariho jev je inverzní k Joulovu jevu, to znamená, že při změně rozměru vzorku materiálu se mění jeho magnetické vlastnosti. To jakým způsobem se mění, záleží na způsobu a směru mechanického namáhání a také na přirozené magnetické polarizaci materiálu [14][13]. Co se polarizace týče, platí zde stejný souřadný systém jako pro piezoelektrické materiály. Princip jevu je nastíněn v obrázku 23, kde je materiál polarizován tak, aby vytvářel největší magnetické pole v momentě, kdy není mechanicky namáhán a téměř žádné při maximálním mechanickém namáhání. Villariho jev je hojně využíván v senzorce a energy harvesting.



Obrázek 23: Villariho jev [15]

5.3 Popis magnetostrikčních materiálů

Konstitutivní vztahy pro popis chování magnetostrikčních materiálů zní následovně:

$$\mathbf{B} = \mathbf{d}^H \mathbf{T} + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{H} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^H \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \mathbf{H} \quad (5.2)$$

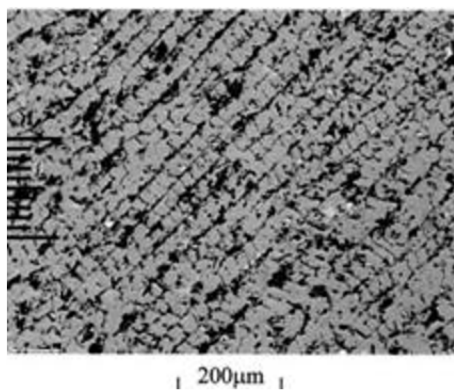
Rovnice 5.1 popisuje Villariho jev a rovnice 5.2 Joulův jev [14][16]. \mathbf{B} představuje magnetickou indukci, \mathbf{d} magnetostrikční konstantu, \mathbf{H} je intenzita magnetického pole, \mathbf{s}^H je elastická poddajnost, $\boldsymbol{\mu}^\sigma$ popisuje magnetickou permeabilitu, \mathbf{T} mechanické napětí a \mathbf{S} představuje přetvoření. Na rozdíl od Popisu piezoelektrických materiálů, zde horní indexy říkají, za jakých podmínek konstanty platí, v našem případě index \mathbf{H} značí konstantní intenzitu magnetického pole a \mathbf{T} konstantní mechanické napětí. Například $\boldsymbol{\mu}^T$ tedy obsahuje konstanty permeability při konstantním mechanickém napětí.

5.4 Materiály s magnetostrikčními vlastnostmi

Do 70 let 20. století byly využívány převážně kovy jako Kobalt a Nikl [14], případně slitiny na jejich bázi, po tomto roce však přišel zlom v podobě materiálu Terfenol-D, k němu se později přidal Galfenol.

5.4.1 Terfenol-D

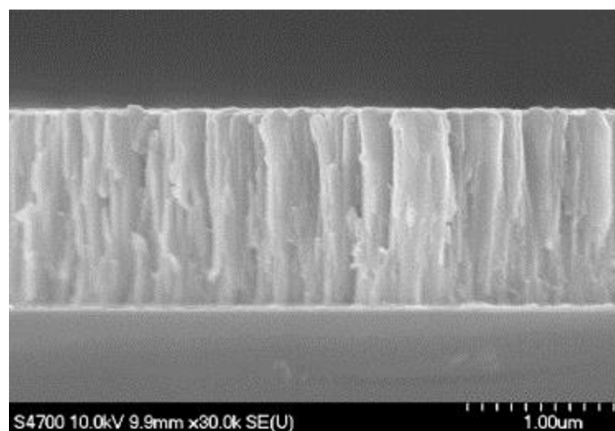
Jedná se o slitinu Terbia, Železa a Dysprosia vyvinutou v Naval Ordnance Laboratory, pyšní se vysokými hodnotami magnetostrikčních vlastností, kde překonává Nikl i více než 200x. Jeho nedostatkem jsou však mechanické vlastnosti, je velmi křehký a jeho pevnost v tahu je pouhých 28 MPa v tlaku pak 700 MPa [14]. Materiál lze pořídit v různých formách, od prášku, přes tyčinky až po tenké fólie. Obrázek 24 zobrazuje strukturu Terfenolu pod mikroskopem



Obrázek 24: Struktura Terfenolu-D [36]

5.4.2 Galfenol

Chabé mechanické vlastnosti Terfenolu-D vedli k vývoji další magnetostrikční slitiny a v roce 1999 byl představen Galfenol. Jedná se o slitinu Galia a Železa, oproti Terfenolu-D disponuje téměř 20x větší pevností v tahu a vlastnosti si uchovává i ve vysokých teplotách, to však na úkor několikanásobně nižší magnetostrikce. Obrázek 25 zobrazuje mikrostrukturu Galfenolu pod skenovacím elektronovým mikroskopem.



Obrázek 25: Struktura Galfenolu [37]

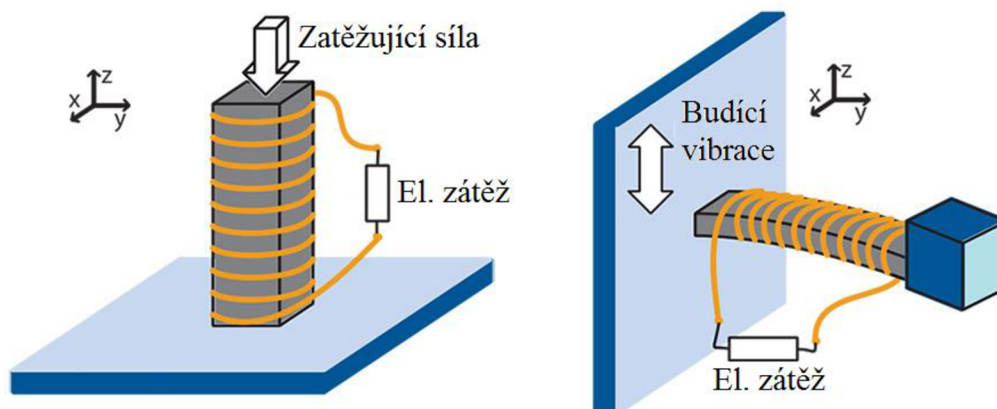
Tabulka níže obsahuje porovnání materiálů a jejich vlastností [14]. Jako v případě piezoelektrických materiálů, tak i u magnetostrikčních záleží na přesném složení materiálu a tak jsou čísla v tabulce pouze orientační.

| Vlastnosti | Terfenol-D | Galfenol | Nikl |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| Magneto-strikce [<i>ppm</i>] | 1600 - 2400 | 150 - 420 | -66 |
| Koupling faktor | 0.7 - 0.8 | 0.67 - 0.76 | -33 |
| Mez pevnosti v tahu [<i>MPa</i>] | 28 | 580 | 500 |
| Relativní permeabilita | 2-8 | 60 - 360 | 110 - 600 |
| Curie. Teplota [$^{\circ}\text{C}$] | 357 | 675 | 627 |

5.5 Magnetostrikční generátory

Z vlastností plyne, že vystavením magnetostrikčního materiálu periodickému zatěžování vzniká i periodicky měnící se magnetické pole. Je-li materiál vložen v cívice, vytváří v ní díky změně magnetizačního toku indukované napětí a indukovaný proud.

Na rozdíl od piezoelektrických generátorů, všechny magnetostrikční generátory využívají konstrukční uspořádání pouze módu d33, tedy magnetické pole se mění ve směru zatěžující síly [16]. Provedení je realizováno ve formě přímého zatěžování materiálu, nebo vibračního buzení vetknutého nosníku viz obrázek 26.

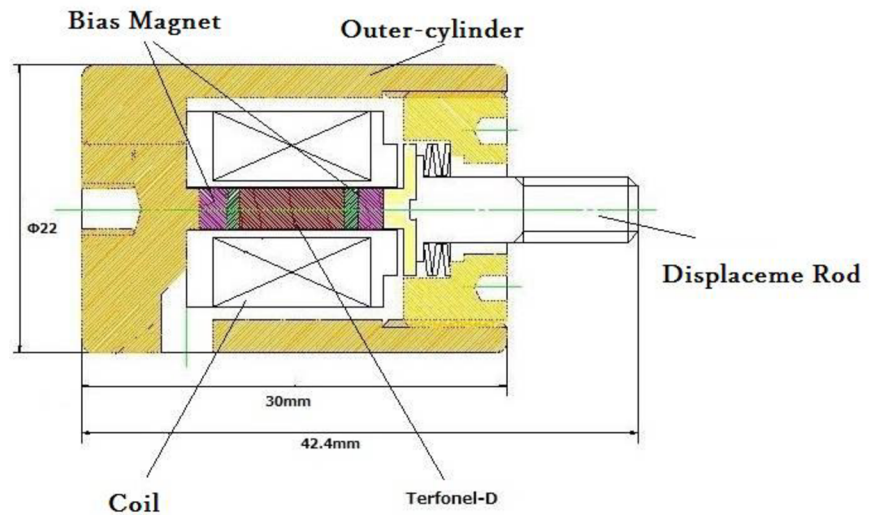


Obrázek 26: Provedení magnetostrikčních generátorů [38]

Následující podkapitola představuje reálné koncepty magnetostrikčních generátorů vyvinutých některými světovými univerzitami.

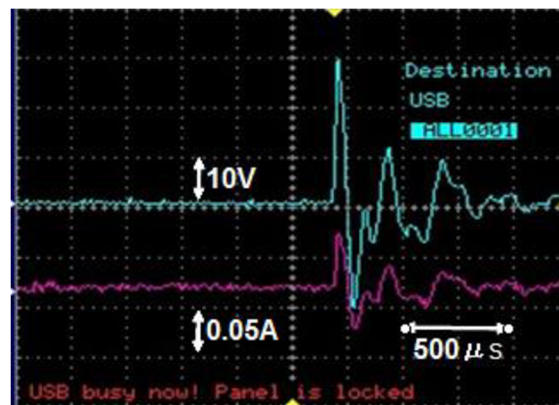
5.5.1 GMEG generátor

Tento magnetostrikční generátor byl vyvinut Tokaiskou univerzitou v Japonsku [21]. Jeho konstrukce je velmi jednoduchá, obsahuje pouze terfenolový váleček, vložený v cívce, zatěžovací mechanismus a dvojici magnetů, které se starají o před zatížení. Obrázek 27 zobrazuje řez konstrukcí GMEG generátoru.



Obrázek 27: Řez GMEG generátorem [21]

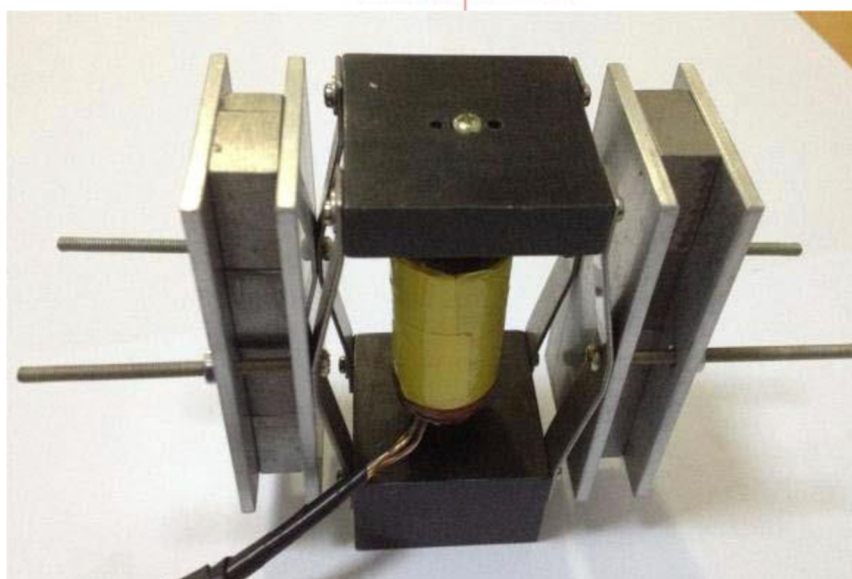
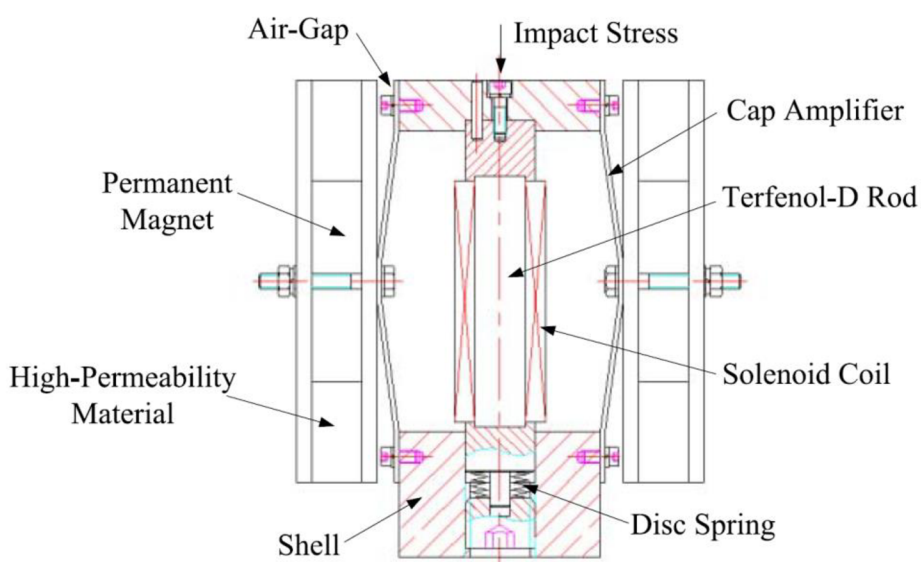
Experiment byl proveden tak, že byla na zatěžovací mechanismus upuštěna ocelová kulička o hmotnosti 5.45g. Průběh napětí a proudu lze pozorovat v obrázku 28.



Obrázek 28: Výsledky experimentu [21]

5.5.2 High-Impact vibration generátor

Tato neobvyklá konstrukce si klade za cíl co největší změnu magnetického toku při pracovním cyklu [22]. V nezatiženém stavu je maximalizován magnetický tok co nejmenší vzduchovou mezerou a polarizovaným terfenolovým válečkem. Při namáhání terfenolový váleček snižuje magnetické pole a konstrukce svojí deformací zároveň zvětší vzduchovou mezeru, tím dochází k razantnímu poklesu magnetického toku magnetickým obvodem a tedy větší změnou magnetického toku v čase. Obrázek 29 zobrazuje konstrukci generátoru.

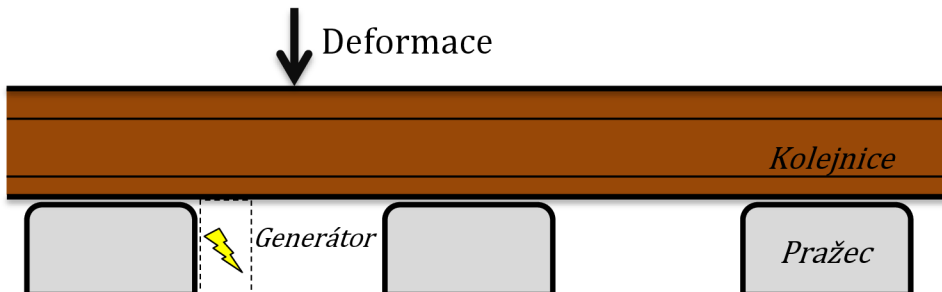


Obrázek 29: High impact vibration generator [22]

Práce, která se vývojem tohoto magnetostrikčního generátoru zabývá, sice obsahuje i experiment s využitím prototypu, bohužel však v závěru nejsou uvedeny žádné elektrické hodnoty.

6. Výběr konstrukčního řešení

Před výběrem konstrukčního řešení bylo třeba zvolit umístění generátoru, ideálně tak aby nebylo třeba zasahovat do pražce, či kolejnice. Po diskuzi s vedoucím práce bylo zvoleno umístění harvesteru mezi kolejnicí a pražce, zároveň bylo dohodnuto, že buzení zařízení bude realizováno posuvem kolejnice vzhledem k mezeře mezi pražci a to o 0,4 mm viz obrázek 30.

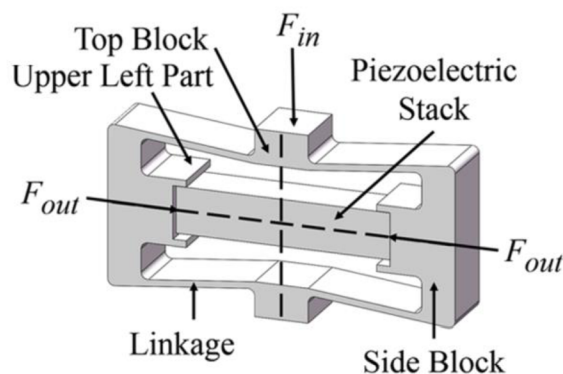


Obrázek 30: Umístění generátoru

Je důležité podotknout, že vibrace při průjezdu vlaku mají nízkou frekvenci, ta je zároveň při každém průjezdu jiná, protože záleží na rychlosti vlaku a rozložení kol soupravy a to se typ od typu liší, není tedy vhodné použití generátoru typu vetknutý nosník, ten by být naladěný pouze na jednu frekvenci a jeho funkčnost by byla pouze dílem náhody.

S přihlédnutím k těmto faktům bylo v rámci práce vybráno konstrukční řešení se zesilovacím rámem uvedené v kapitole 4.6.4. Jedná se o Stack-type řešení, pro která jsou nutná velká zatížení, zároveň lze do zesilovacího rámu vložit jak piezoelektrický tak magnetostrikční materiál a oba materiály v rámci analýzy vhodně porovnat.

Zesilovací rám (obrázek 31) vytváří tzv. pákový efekt. Funguje tak, že se vrchní část zatíží silou F_{in} a díky tvaru rámu se síla transformuje do horizontálního směru a tvoří síly F_{out} . Ty pak působí na samotný SMART materiál, ve zmiňované práci konkrétně na piezoelektrický váleček.



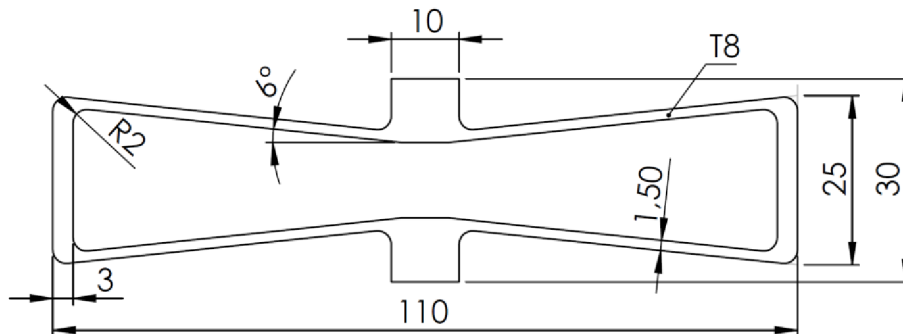
Obrázek 31: Wang, Chen a Guzman piezoelektrický harvester se zesilovacím rámem [20]

7. Návrh zesilovacího rámu a modelování SMART materiálů

První částí této kapitoly bude návrh geometrie rámu, poté budou následovat podkapitoly zabývající se modelováním dynamiky a jednotlivých materiálů.

7.1 Návrh zesilovacího rámu

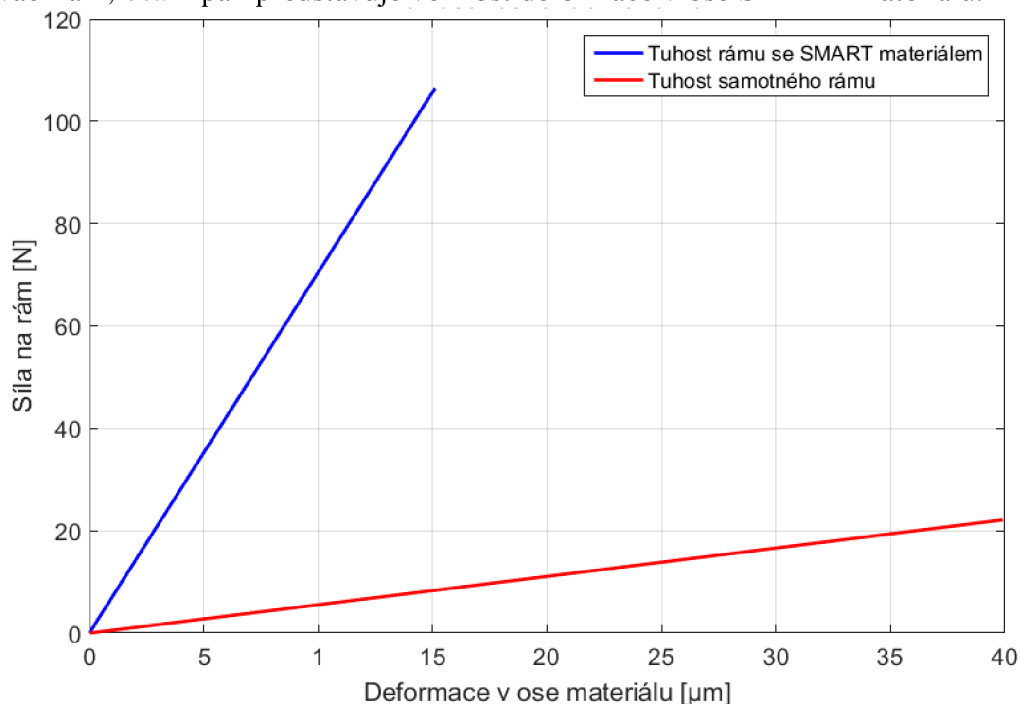
Geometrie zesilovacího rámu, dále také nazývaném amplifier, byla navržena tak, aby bylo možné ji umístit mezi kolejnici a pražce. Nejdůležitějším kritériem byl přenos co největší síly při zajištění pevnosti pro nekonečný počet cyklů a tím bylo zajištěno generování maximálního elektrického výkonu. Finální geometrie je zobrazena na obrázku 32.



Obrázek 32: Geometrie zesilovacího rámu

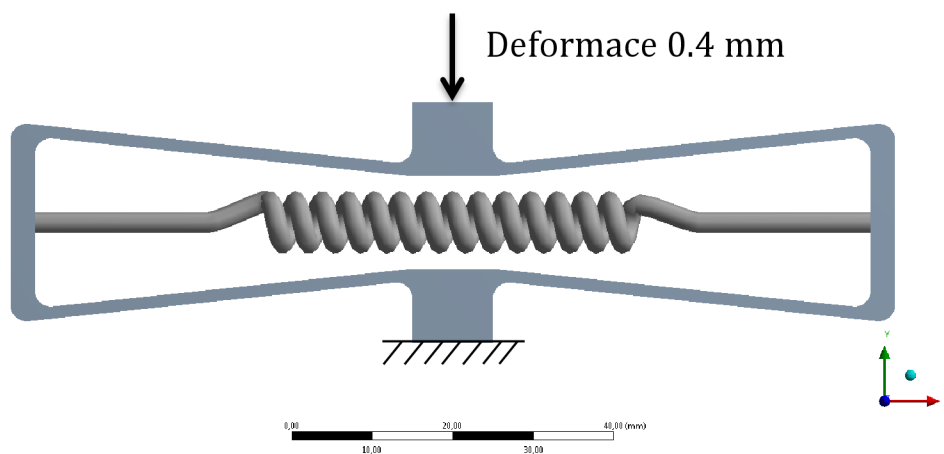
7.1.1 Pevnostní výpočet

K návrhu zesilovacího rámu byl použit software Ansys Workbench, ve kterém byly provedeny pevnostní výpočty a modální analýza. Do těla zesilovacího rámu z konstrukční oceli byla navíc přidána pružina, která svou tuhostí reprezentuje zatěžovaný SMART materiál. V obrázku 33 lze vidět jaký vliv má SMART materiál na tuhost rámu, osa-y představuje sílu, která působí na zesilovací rám, osa-x pak představuje velikost deformace v ose SMART materiálu.



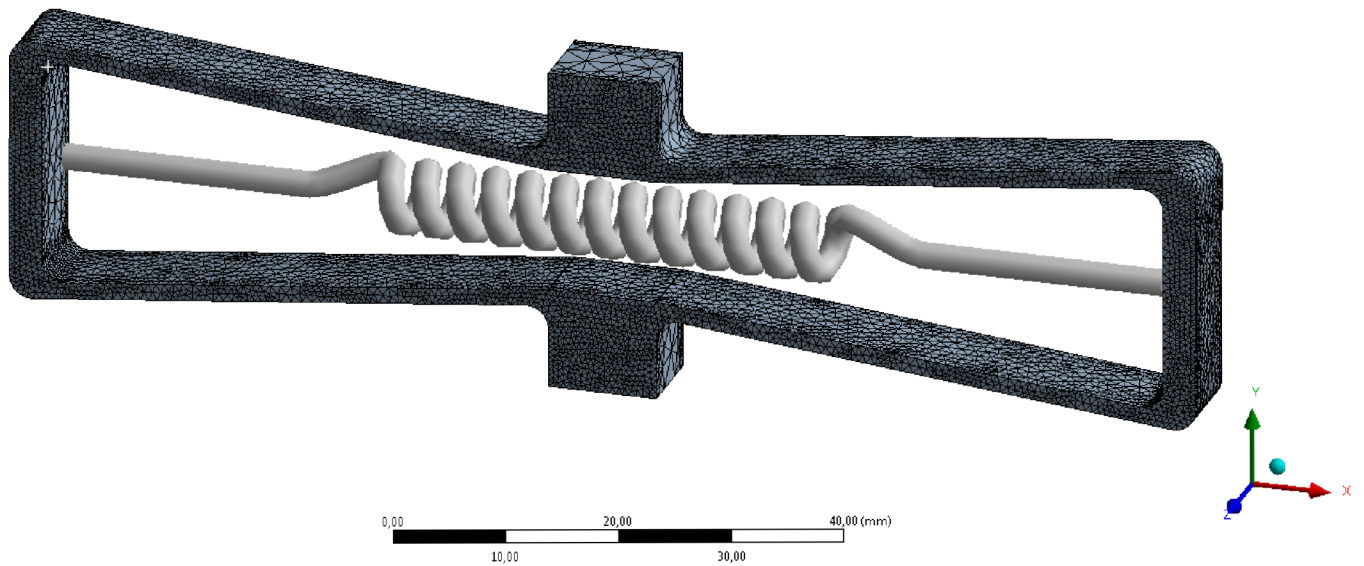
Obrázek 33: Tuhost zesilovacího rámu

Přestože je geometrie symetrická, s přihlédnutím k jednoduchosti byla modelována celá a to z důvodu ověření správného chování a názornosti. Mezi okrajové podmínky patří vetknutí dolní části a deformace vrchní části rámu o $-0,4$ mm ve směru osy y. Obrázek 34 vizualizuje okrajové podmínky.



Obrázek 34: Okrajové podmínky

Na obrázku 35 lze vidět použitou síť.



Obrázek 35: MKP síť

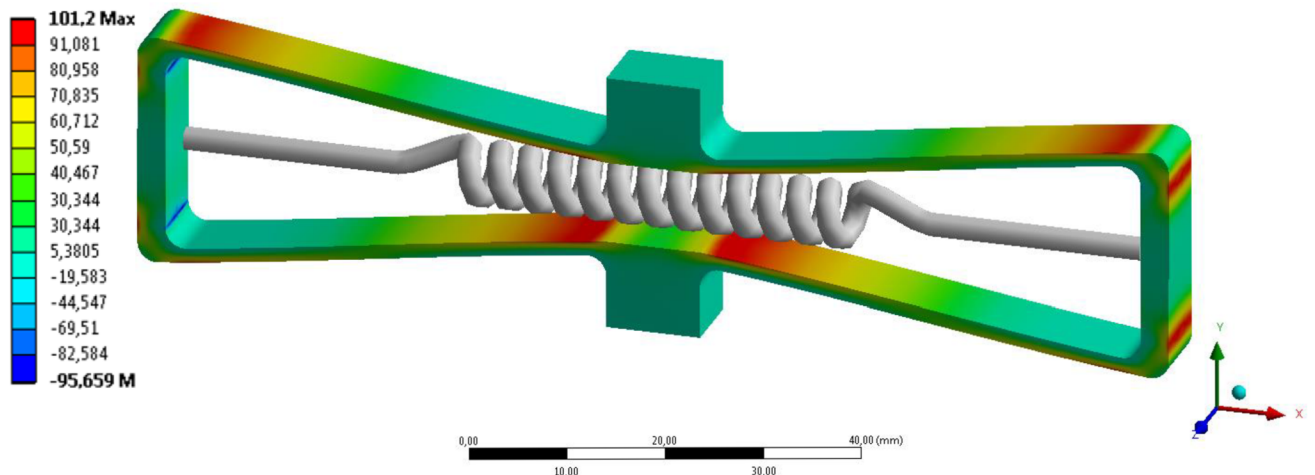
Aby bylo zajištěno co nejdelší fungování zařízení, konstrukce musí vydržet opakované namáhání. Z hlediska životnosti pro nekonečný počet cyklů u konstrukčních ocelí platí:

$$\sigma_{ct} = 0.45\sigma_{tmax} \quad (6.1)$$

Mez pevnosti v tahu použité konstrukční oceli je $\sigma_{tmax} = 250$ MPa. Z rovnice 6.1 tedy vyplívá mez pevnosti v tahu pro nekonečný počet cyklů $\sigma_{ct}=112.5$ MPa.

Z pevnostní analýzy nacházející se na obrázku 36 vyplývají maximální hodnoty napětí 101,2MPa. Zesilovací rám tedy nekonečný počet cyklů vydrží.

A: Static Structural
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 3.4.2018 17:05

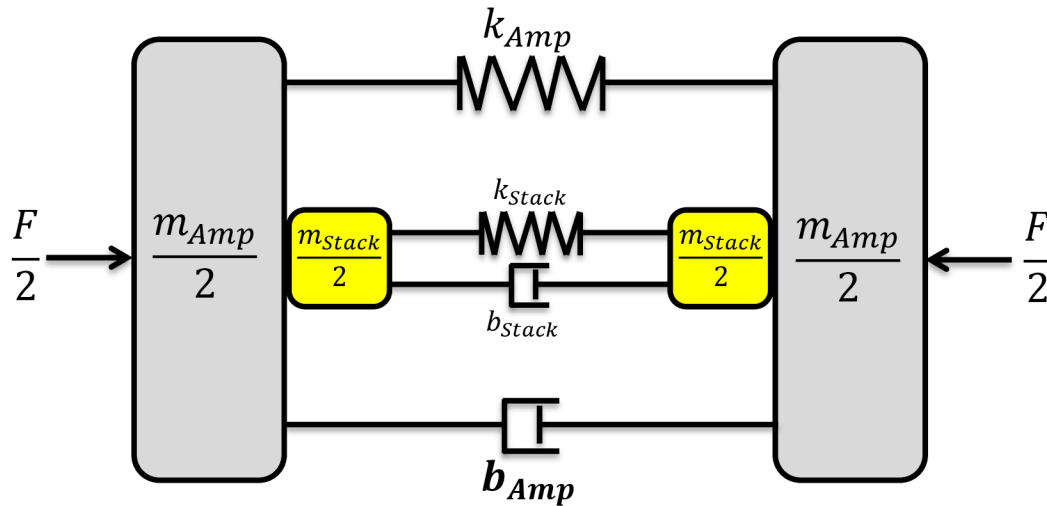


Obrázek 36: Pevnostní analýza - napětí

7.2 Dynamika soustavy generátoru

Z důvodu provázanosti mechanických a elektrických resp. magnetických vlastností materiálů bylo důležité zahrnout do modelu i dynamiku zesilujícího rámu, neboť jak napovídá obrázek 33, jeho použití přináší do systému další tuhost a také tlumení.

Zjednodušené náhradní schéma lze vidět na obrázku 37. Obsahuje válec SMART materiálu dále nazývaný jako stack, který má svoji tuhost a tlumení, které jsou buď přímo uvedeny výrobcem, nebo se dají z poskytnutých parametrů dopočítat. Dále obsahuje zesilovací rám s vlastní tuhostí a tlumením.



Obrázek 37: Dynamické schéma soustavy

Pro tuto soustavu platí pohybová rovnice:

$$(m_{Stack} + m_{Amp})\ddot{x} = k_{Amp}x + k_{Stack}x + b_{Amp}\dot{x} + b_{Stack}\dot{x} - F \quad (6.2)$$

Kde m jsou efektivní hmotnosti, k tuhosti, b tlumení a F představuje již přenesenou sílu působící na materiál.

m_{Stack} a m_{Amp} jsou určeny úpravou rovnice:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \gggg \quad m = \frac{k}{\omega_0^2} \quad (6.3)$$

Kde ω_0 představuje vlastní frekvenci, která je pro SMART materiál uvedena v katalogu a pro rám zjištěna modální analýzou.

Tuhost k_{Stack} je pro SMART materiál opět určena katalogem a k_{Amp} pro rám vypočtena pomocí vztahu:

$$F = (k_{Amp} + k_{Stack})\Delta x \quad \gggg \quad k_{Amp} = \frac{F}{\Delta x} - k_{Stack} \quad (6.4)$$

Kde Δx představuje deformaci ve směru SMART materiálu a F již transformovanou sílu působící v ose piezoelektrického resp. magnetostrikčního materiálu.

Tlumení b jsou vypočtena pomocí vztahu pro poměrný útlum 6.5 a vztahu 6.6:

$$b_p = \frac{1}{2Q} \quad (6.5)$$

Kde Q představuje kvality faktor.

$$b = 2b_p m \omega_0 \quad (6.6)$$

V případě zesilovacího rámu byl použit poměrný útlum oceli $b_p = 0.02$
Síla F byla zjištěna při analýze v Ansys Workbench.

7.3 Matematický model piezoelektrického materiálu

7.3.1 Návrh modelu

Níže uvedený matematický model představuje systém s jedním stupněm volnosti [20][23]. Vychází z konstitutivních vztahů (4.1) a (4.2). Pro směr polarizace 33 mají vztahy tvar.

$$S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (6.7)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (6.8)$$

Jednotlivé koeficienty jsou vysvětleny v kapitole 4.3. První rovnice definuje mechanickou část a druhá elektrickou část. Konstitutivní rovnice mohou být dále rozepsány pomocí následujících vztahů.

$$S_3 = \frac{x}{nh} \quad (6.9)$$

$$T_3 = \frac{F}{A} \quad (6.10)$$

$$E_3 = \frac{u}{h} \quad (6.11)$$

$$D_3 = \frac{Q}{nA} \quad (6.12)$$

$$s_{33}^E = \frac{1}{E} \quad (6.13)$$

Kde x je posuv, neboli stlačení materiálu, n a h počet piezoelektrických vrstev a jejich výšku, A průřez, u představuje elektrické napětí, Q elektrický náboj, E v rovnici (6.13) představuje Youngův modul piezoelektrického materiálu a F je celková síla působící na materiál.

Dosazením výše uvedených vztahů do rovnic (6.7) a (6.8) vznikají rovnice.

$$\frac{EA}{nh}x = F + \frac{EAd_{33}}{h}u \quad (6.14)$$

$$Q = nd_{33}F + \frac{n\varepsilon_{33}^T A}{h}u \quad (6.15)$$

Dosazením kapacity (6.16) a tuhosti (6.17) piezoelektrického materiálu

$$C = \frac{n\varepsilon_{33}^T A}{h} \quad (6.16)$$

$$k_{Stack} = \frac{EA}{nh} \quad (6.17)$$

a následnou derivací rovnice (6.15) a úpravou pomocí Ohmova zákona nabývají konstitutivní vztahy tvaru (6.18) a (6.19).

$$kx - nk d_{33}u = F \quad (6.18)$$

$$u + nkR d_{33}\dot{x} + RC\dot{u} = 0 \quad (6.19)$$

Kde R stojí za odporem zátěže.

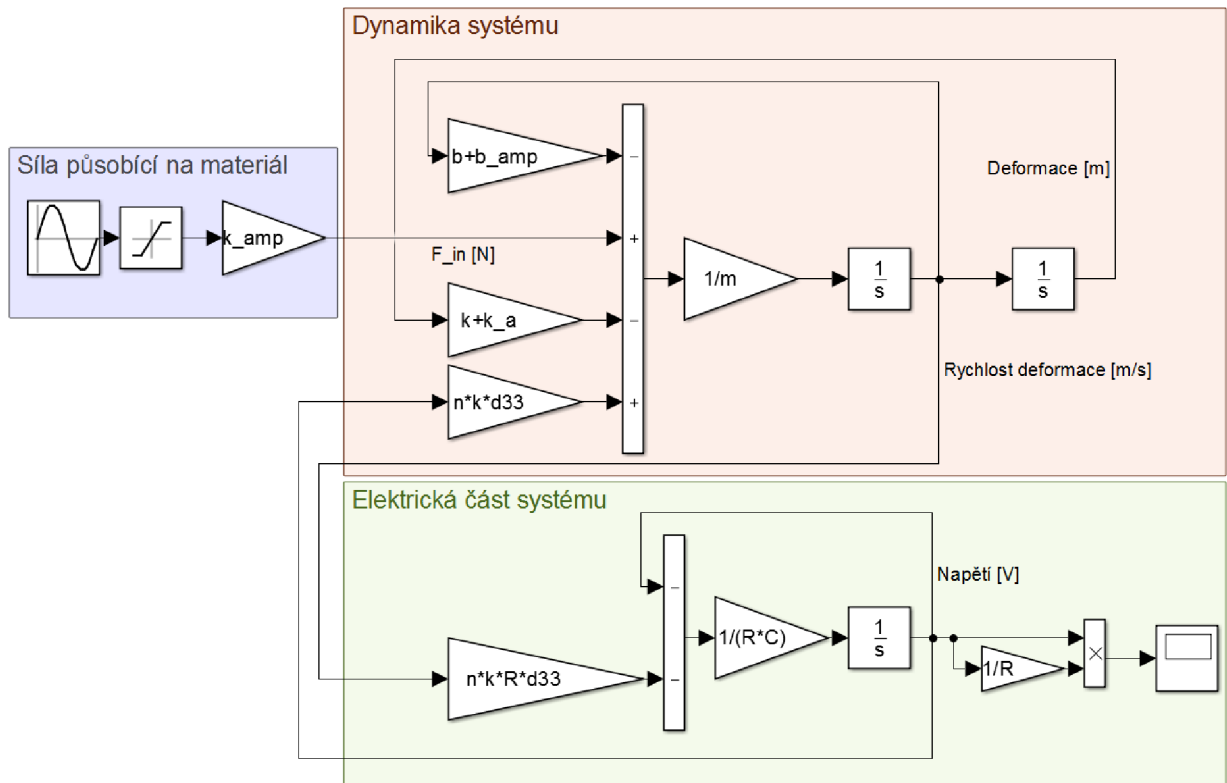
Jelikož F představuje veškeré silové účinky na materiál, můžeme s využitím d'Alembertova principu rovnici (6.18) rozšířit o dynamiku soustavy popsané v kapitole 7.2. Konečné vztahy pro matematický model piezoelektrického materiálu v zesilovacím rámu mají podobu (6.19) a (6.20).

$$k_{Amp}x + k_{Stack}x + b_{Amp}\dot{x} + b_{Stack}\dot{x} - F - nk d_{33}u = (m_{Stack} + m_{Amp})\ddot{x} \quad (6.20)$$

$$u + nkR d_{33}\dot{u} + RC\dot{u} = 0 \quad (6.19)$$

7.3.2 Model piezoelektrického generátoru

Model navržený výše byl dále sestaven a simulován v programu Matlab/Simulink. Schéma modelu lze vidět v obrázku 38. Červená oblast představuje mechanickou část, zelená elektrickou. Model je buzen vychýlením, které je následně přepočítáno na sílu (fialová), to reprezentuje transformaci síly do osy piezoelektrického materiálu. Vstupem do systému je stlačení zesilovacího rámu, které je následně převedeno pomocí tuhostního parametru k_{Amp} na sílu působící ve směru piezoelektrického materiálu. Tato síla následně působí na soustavu a materiál stlačuje, rychlost stlačování materiálu následně vstupuje do elektrické rovnice, z které je počítáno napětí a následně i výkon na zátěži.



Obrázek 38: Model piezoelektrického generátoru

Tabulka níže obsahuje některé parametry charakterizující dynamický systém. Tyto konstanty jsou vypočteny matlabovským skriptem nebo určeny výpočty softwaru Ansys Workbench. Ostatní veličiny, jako odpor zátěže a specifikace piezoelektrického válce budou uvedeny v kapitole 8, není totiž možné je optimálně zvolit bez citlivostní analýzy.

| Význam | Symbol | Hodnota |
|---------------------------|-----------|-----------|
| Tuhost rámu (převod síly) | k_{Amp} | 123 kN/m |
| Síla na rám | F_{in} | 106.6 N |
| Efektivní hmotnost rámu | m_{Amp} | 60 g |
| Tlumení rámu | b_{Amp} | 4 Ns/m |
| Kvality faktor | Q | 30 |
| Youngův modul pružnosti | E | 520 MPa |
| Piezoelektrická konstanta | d_{33} | 6500 pC/N |

7.4 Matematický model magnetostrikčního materiálu

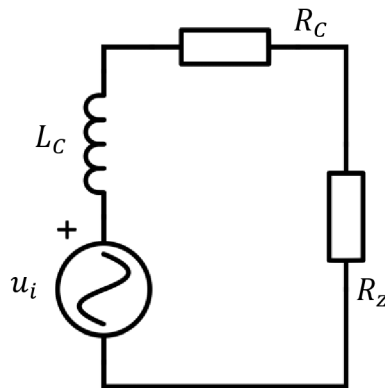
7.4.1 Návrh modelu

Jako jakýkoliv jiný systém, ani tento nelze dokonale matematicky popsat, byla tedy provedena řada zjednodušení, tím nejhlavnějším je uvažování homogenního magnetického pole za terfenolovým válcem. Jak je známo, velikost magnetického pole se vzdáleností klesá podle $1/r^2$ kde r je vzdálenost od zdroje. Pro malé vzdálenosti, je však uvažování homogenního pole dostatečně přesnou aproximací.

Matematický model opět vychází z konstitutivních vztahů, které jsou však použity jen pro určení změny magnetického indukčního toku, základem je model dynamiky soustavy z kapitoly 4.3 a dále diferenciální rovnice pro elektrický obvod určující elektrické veličiny. Vzájemný coupling, neboli propojení elektrické a mechanické rovnice představuje magnetické tlumení magnetostrikčního materiálu b_{Mag} . Jeho vyjádření stojí níže.

$$b_{Mag} = \frac{UI}{x} \quad (6.21)$$

Nejprve bylo nutné vyjádřit elektrickou rovnici soustavy. Obrázek 39 zobrazuje Elektrické schéma, jež ji popisuje. Obsahuje cívku, její odpor, odpor zátěže a indukované napětí vznikající změnou magnetického indukčního toku uvnitř cívky.



Obrázek 39: Elektrický obvod magnetostrikčního generátoru

Podle Kirchhoffova druhého zákona má napěťová rovnice tvar (6.22), dále ji pak můžeme rozepsat s využitím Ohmova zákona (6.23), Faradayova zákona elektromagnetické indukce (6.24) a diferenciální rovnice pro napětí na cívce (6.25) do tvaru (6.26).

$$0 = u_i + u_R + u_L \quad (6.22)$$

$$u = Ri \quad (6.23)$$

$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (6.24)$$

$$u_L = L_c \frac{di}{dt} \quad (6.25)$$

$$0 = -N \frac{d\phi}{dt} + (R_c + R_z)i + L_c \frac{di}{dt} \quad (6.26)$$

Kde N je počet závitů cívky, L_C je indukčnost cívky, R_C a R_Z jsou odpory cívky a zátěže a ϕ představuje magnetický indukční tok, který je třeba vyjádřit z konstitutivních vztahů, ty mají pro směr 33 tvar.

$$S_3 = s_{33}^H T_3 + d_{33} H_3 \quad (6.27)$$

$$B_3 = d_{33} T_3 + \mu_{33}^T H_3 \quad (6.28)$$

Jednotlivé konstanty jsou popsány v kapitole 5.3. Vyjádřením intenzity magnetického pole H_3 z rovnice (6.27) a dosazením do rovnice (6.28) vzniká vztah pro magnetickou indukci.

$$B_3 = d_{33} T_3 + \mu_{33}^T \frac{S_3 - s_{33}^H T_3}{d_{33}} \quad (6.29)$$

Tuto rovnici lze pomocí dříve zmíněných vztahů (6.10), (6.11) a (6.14) rozepsat do tvaru.

$$B_3 = d_{33} \frac{F}{A} + \mu_{33}^T \frac{\frac{x}{L_{Terf}} - \frac{1}{E} \frac{F}{A}}{d_{33}} \quad (6.30)$$

Při uvažování homogenního magnetického pole již není problém vyjádřit magnetický indukční tok jako součin magnetického pole a průřezu cívky A_C .

$$\phi = B_3 A_C \quad (6.31)$$

Tím byla vyřešena elektrická/magnetická část modelu.

Jak bylo zmíněno na začátku podkapitoly, mechanická část je propojena s elektrickou pomocí magnetického tlumení materiálu b_{Mag} . Tvar mechanické rovnice byl tedy vyjádřen jednoduchou úpravou rovnice (6.2).

$$(m_{Stack} + m_{Amp})\ddot{x} = k_{Amp}x + k_{Stack}x + b_{Amp}\dot{x} + b_{Stack}\dot{x} + b_{Mag}\dot{x} - F \quad (6.32)$$

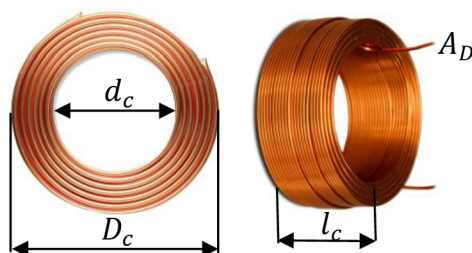
7.4.2 Parametry cívky

Parametry cívky mají dominantní vliv na výstupní elektrické vlastnosti generátoru, z toho důvodu bylo třeba ji delikátně navrhnout, k tomu posloužily následující vztahy.

$$L_C = \frac{\mu_{Terf} N^2}{l_C} A_C \quad (6.33)$$

$$R_C = \frac{\rho l_D}{A_D} \quad (6.34)$$

Kde ρ je rezistivita mědi, l_D je délka navinutého vodiče, A_D průřez vodičem a μ_{Terf} je permeabilita materiálu uvnitř cívky, v našem případě je tímto materiálem Terfenol-D.

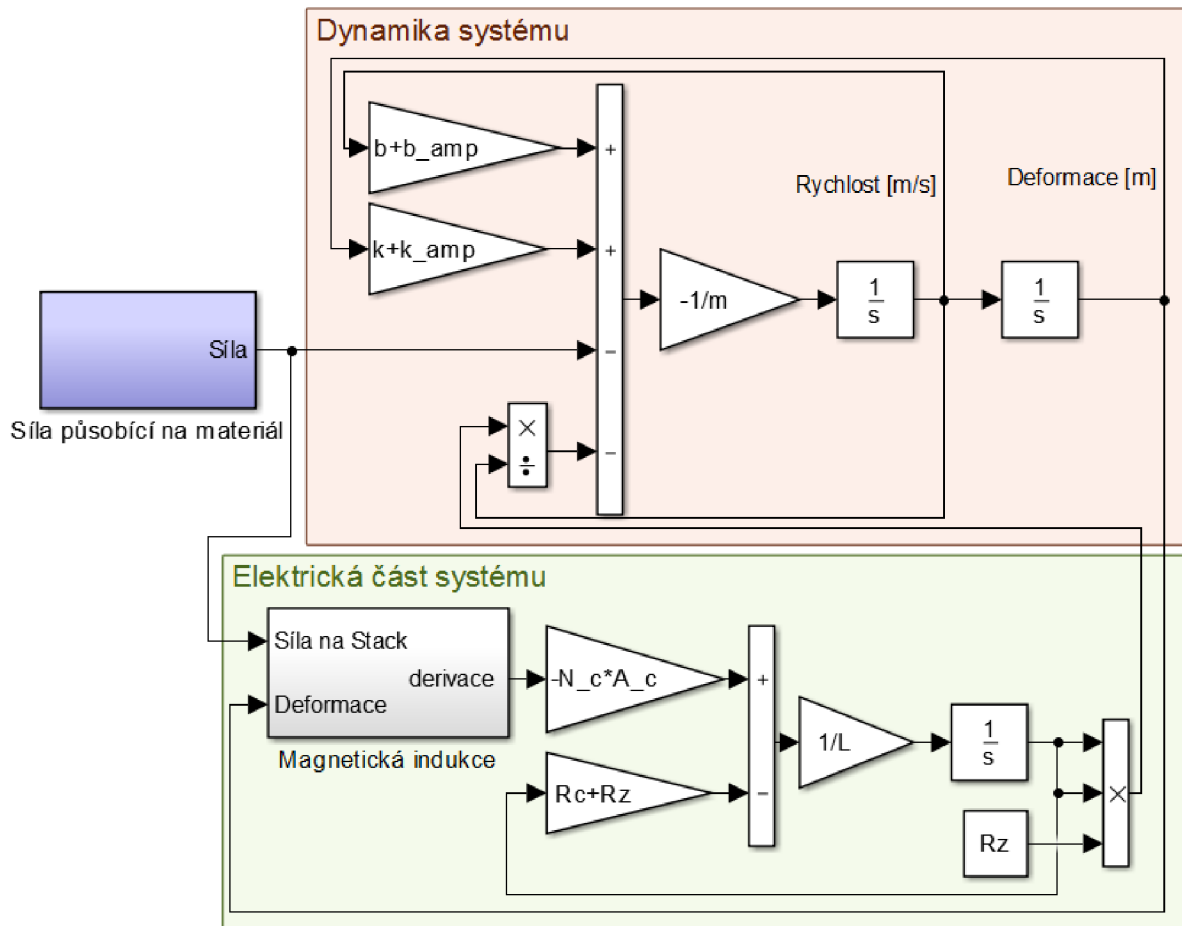


Obrázek 40: Parametry cívky [39][40]

7.4.3 Model magnetostrikčního generátoru

Následně byly rovnice (6.26) a (6.32) vymodelovány v Simulinku, model lze vidět v obrázku 41. Červená oblast opět představuje mechanickou část, zelená elektrickou část systému. Dynamika soustavy magnetostrikčního generátoru je téměř totožná se soustavou piezoelektrického generátoru i zde je tedy vstupem do systému stlačení zesilovacího rámu (fialová), které je následně převedeno pomocí tuhostního parametru k_{Amp} na sílu působící ve směru piezoelektrického materiálu. Tato síla je důležitá jak pro výpočet mechanického chování materiálu, tak pro výpočet magnetického indukčního toku, který na ni podle rovnice (6.30) závisí. Tento výpočet se děje v subsystému, do kterého dále vstupuje stlačení materiálu. Subsystém vypočítá změnu magnetického indukčního toku a posílá ji do elektrické rovnice (6.26) z které již vychází námi požadované elektrické parametry napětí a výkon.

Výpočet změny magnetického toku je proveden pomocí derivace, tento přístup není zcela vhodný zejména kvůli šumu a kmitům, které pak mohou výsledek derivace znehodnotit, nicméně tento krok nešel žádným způsobem obejít. Z tohoto důvodu jsou filtrována jak data vstupující do derivace tak její výstup. A to pomocí bloku „transfer function“, jehož parametry byly nastaveny vhodně tak, aby nedocházelo k velkému zpoždění modelu, které tato funkce přináší.



Obrázek 41: Simulinkovský model magnetostrikčního generátoru

Jak bylo zmíněno v kapitole 5.4.1, Terfenol-D nemá dobré mechanické vlastnosti. V tomto případě je namáhán tlakem, takže při překročení vnitřního mechanického napětí

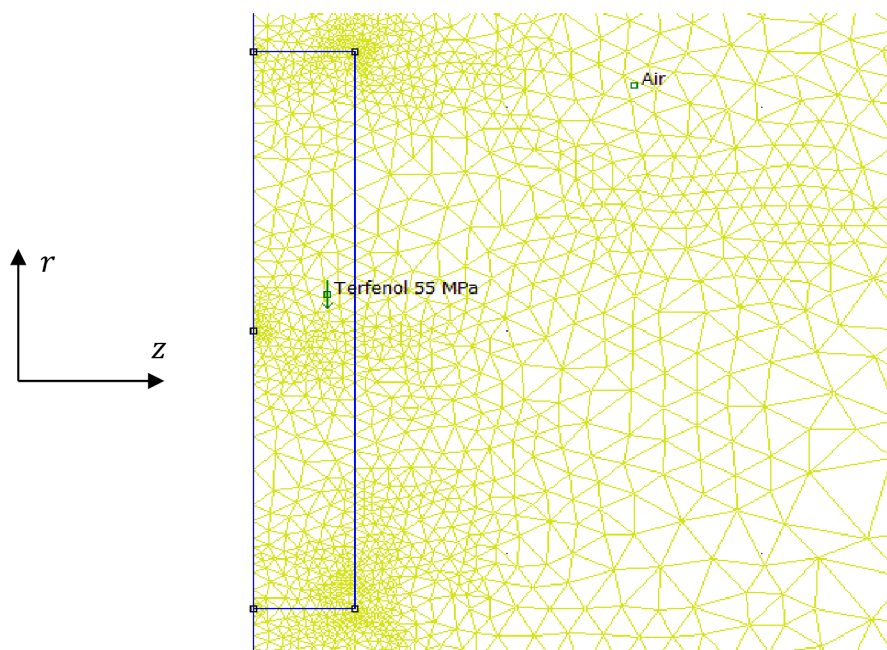
700MPa dojde k jeho destrukci. Proto skript v Matlabu obsahuje podmínku která simulaci přeruší, v případě teoretického porušení materiálu, tato podmínka obsahuje známý vztah (6.10).

Tabulka níže opět zobrazuje některé konstanty a parametry vypočtené v Matlabovském skriptu, ty chybějící budou uvedeny v kapitole 8.

| Význam | Symbol | Hodnota |
|---------------------------|-----------|----------------------|
| Tuhost rámu (převod síly) | k_{Amp} | 123 kN/m |
| Síla na rám | F_{in} | 106.6 N |
| Efektivní hmotnost rámu | m_{Amp} | 60 g |
| Tlumení rámu | b_{Amp} | 4 Ns/m |
| Kvality faktor | Q | 30 |
| Magnetostrikční konstanta | d_{33} | 2000ppm |
| Průměr vodiče | d_d | 0.1 mm |
| Rezistivita mědi | ρ | 0.0169 $\mu\Omega m$ |
| Youngův modul pružnosti | E | 500 MPa |

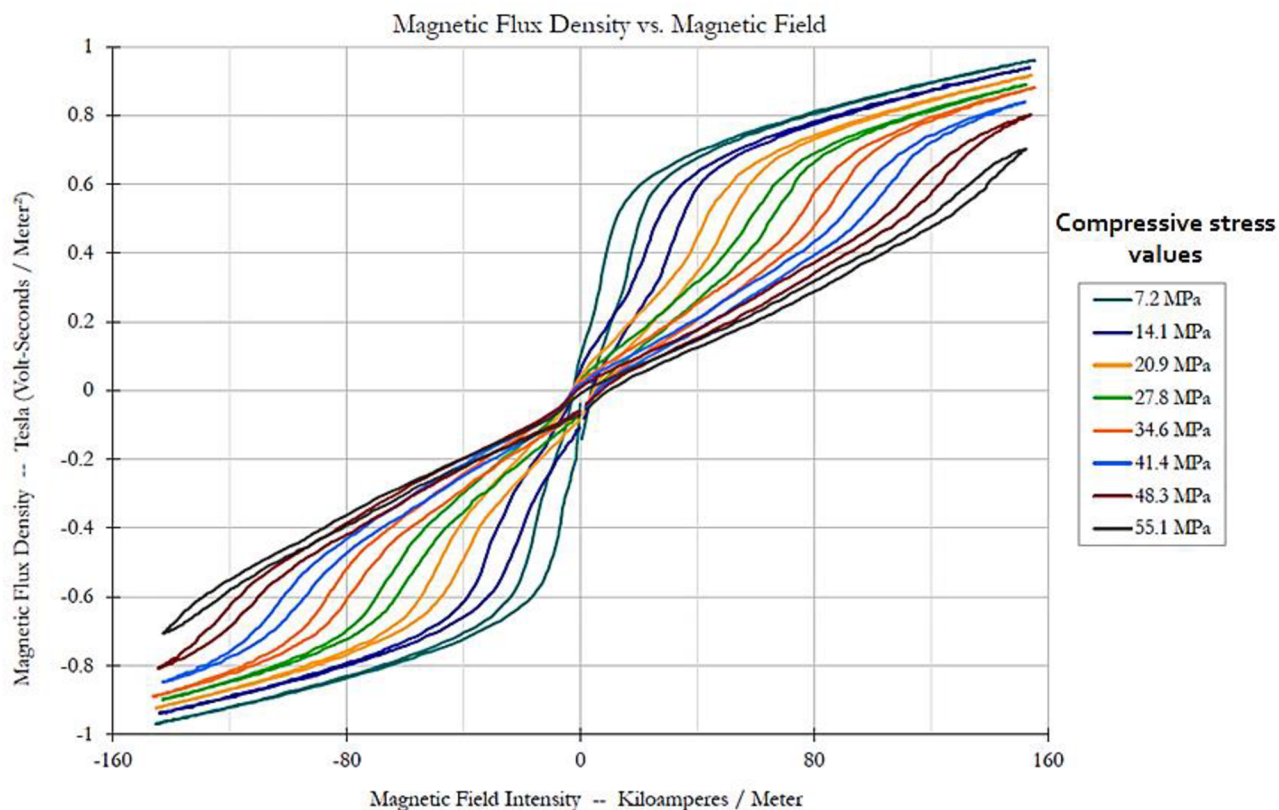
7.4.4 Model magnetostrikčního generátoru ve FEMM

V rámci práce byl při tvorbě magnetostrikčního modelu použit i alternativní přístup s využitím programu FEMM. Tento model také využívá diferenciální rovnici (6.26), avšak výpočtu magnetického indukčního toku ϕ je dosaženo pomocí metody konečných prvků. Terfenolový váleček byl modelován axisymetricky, tedy je nakreslena pouze polovina výřezu, která je následně orotována okolo osy r. viz obrázek 42.



Obrázek 42: Osově symetrický model terfenolového válce ve FEMM

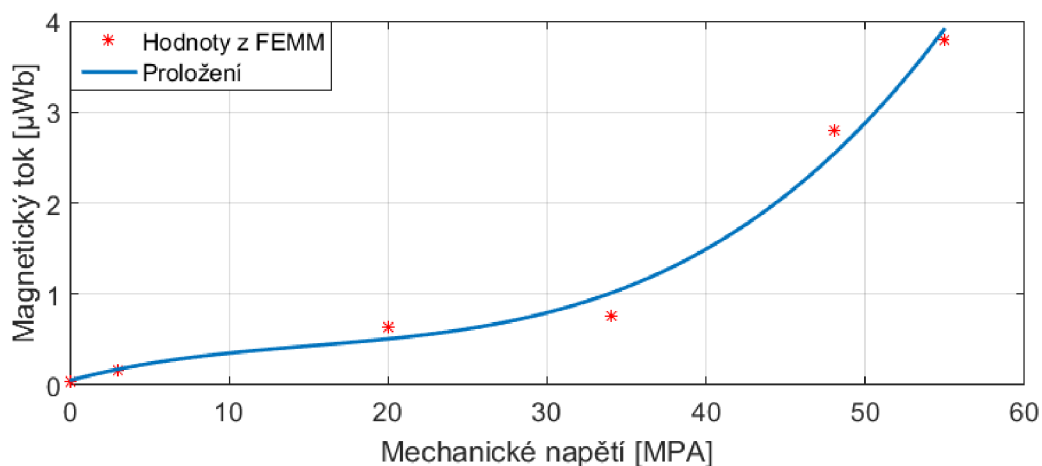
FEMM bohužel neumí řešit magnetostrikční problém, při kterém by počítal změnu magnetického toku v závislosti na zatížení, tento krok tak byl řešen ručně. V grafu na obrázku 43 lze pozorovat B-H charakteristiky Terfenolu v závislosti na vnitřním mechanickém napětí.



Obrázek 43: B-H charakteristiky Terfenolu v závislosti na mechanickém napětí [41]

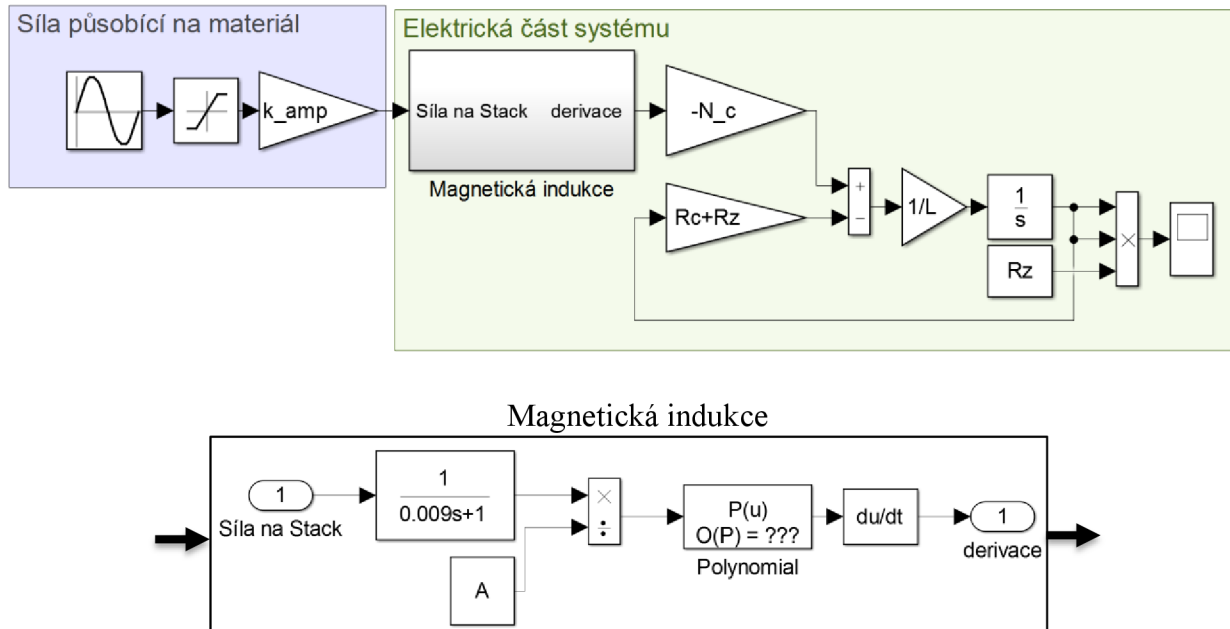
Pomocí těchto křivek byly definovány vlastnosti Terfenolu při jednotlivých mechanických napětích ve FEMM. Následně byl proveden výpočet modelu s vlastnostmi při určitém namáhání, byla odečtena hodnota magnetického toku a celý výpočet se opakoval pro další mechanické napětí a tím i vlastnosti.

Vypočtenými hodnotami magnetického toku byl proložen polynom 3. řádu a vznikla křivka magnetického toku v závislosti na vnitřním mechanickém napětí materiálu, kterou lze vidět v obrázku 44.



Obrázek 44: Charakteristika závislosti magnetického toku na mechanickém napětí

K další simulaci byl již využit Simulink. Schéma modelu je zobrazeno níže v obrázku 45, obsahuje pouze vstupní sílu na materiál a elektrickou část systému. Dále je zde zobrazen subsystem, jehož úlohou je výpočet mechanického napětí v materiálu, toto napětí pak vstupuje do polynomu, z kterého vychází v podobě magnetického indukčního toku. Subsystem uzavírá derivace tohoto toku. Lze si všimnout, že na výstupu z derivace není použit žádný filtr, tak jako u úplného matematického modelu v kapitole 7.4.3. V tomto případě totiž nebyl třeba, výstupní veličina neobsahovala šum a filtr by byl tedy zbytečný.

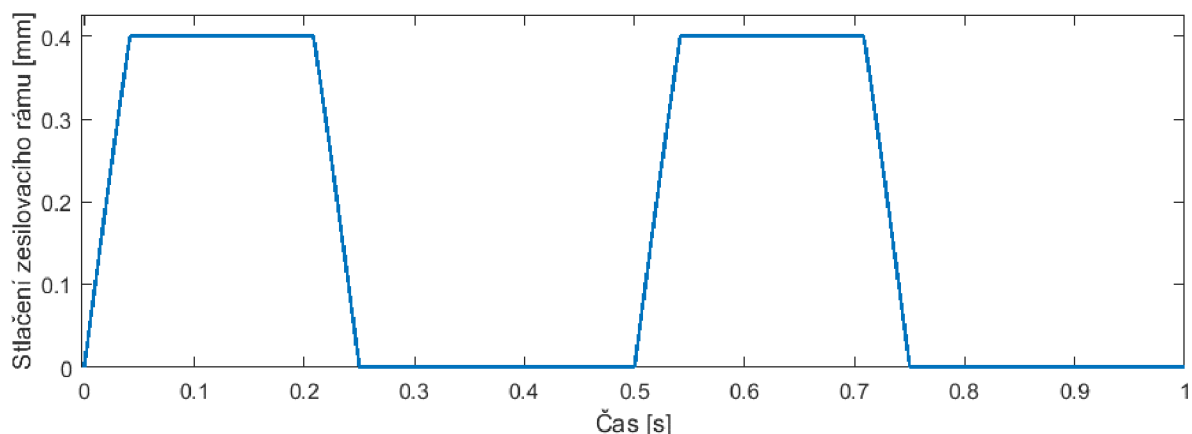


Obrázek 45: Schéma modelu magnetostrikčního generátoru s využitím polynomu magnetického toku

8. Citlivostní analýza SMART generátorů

Některé parametry modelů představených v kapitole 6 není možné jen tak zvolit, ale je třeba je určit s ohledem na výsledný elektrický výkon harvesteru. Tato kapitola se zabývá analýzou vlivu těchto parametrů a jejich určením.

Jak již bylo dříve zmíněno, harvester bude umístěn mezi kolejnicí a pražcem, vstupem do systému pak je posuv kolejnice vzhledem k pražci. V době řešení práce bohužel nebyla dostupná data z průjezdu vlaku, proto byl pro potřeby simulací vytvořen ideální průběh, který by mohl odpovídat, lze jej pozorovat v obrázku 46. Signál představuje posuv kolejnice, tedy i stlačení zesilovacího rámu, o 0,4 mm s frekvencí 2 Hz. Stlačení rámu je přepočítáno pomocí tuhostního parametru k_{Amp} na sílu působící ve směru daného SMART materiálu.

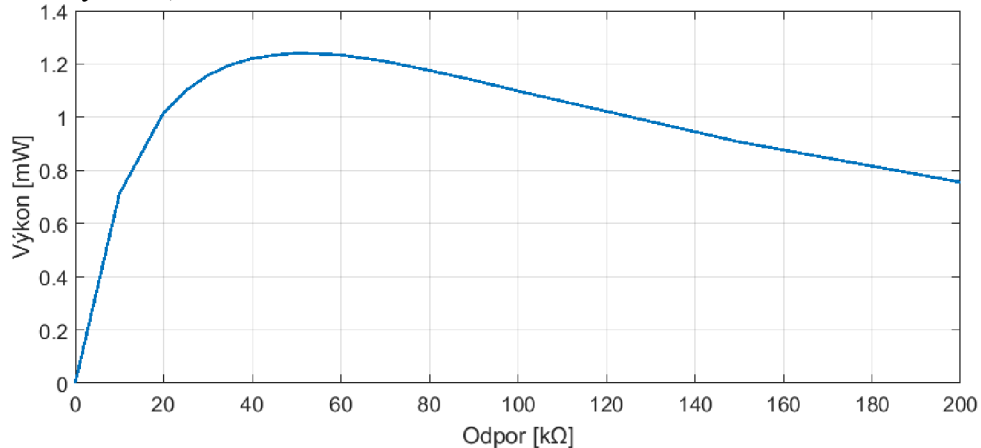


Obrázek 46: Vychýlení vstupující do systému

Data by samozřejmě mohla mít i jinou frekvenci, případně by mohlo být frekvencí více. Vše záleží na dvou faktorech, první z nich je typ nápravy, konkrétně podvozku a druhým je rychlost vlaku. Malý osobní motorový vlak o rychlosti 50km/h s jednoduchým zavěšením bude obsahovat jednu frekvenci a průběh bude podobný jako na obrázku 46. Naproti tomu rychlík o několika vozech s dvounápravovými podvozky může obsahovat i 3 dominantní frekvence. V České Republice, kde je rychlostní limit vlaku 160km/h a jezdí zde vozy s dvounápravovými podvozky by teoreticky maximální frekvence stlačení měla být 20 Hz, tratě po kterých touto rychlostí však může jezdit jsou elektrifikovány, proto zde není žádného harvesteru třeba.

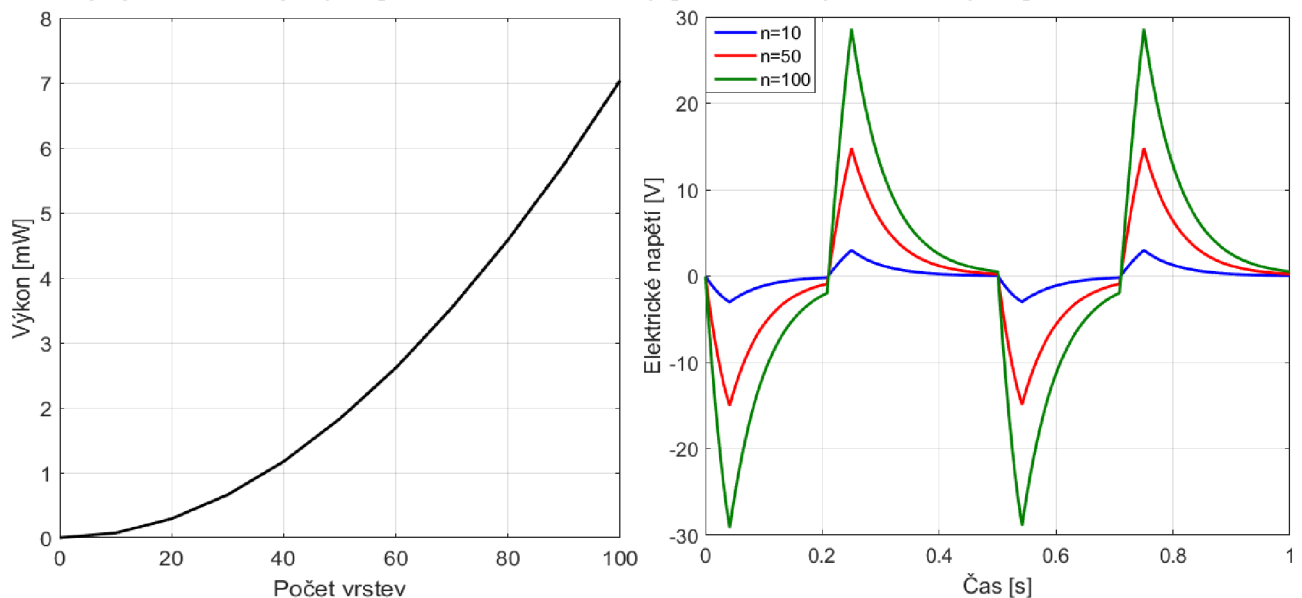
8.1 Piezoelektrický generátor

Nejdůležitějším parametrem každého harvesteru je odpor zátěže, který je pro každé uspořádání jiný. Z charakteristiky závislosti elektrického výkonu na odporu zátěže v grafu na obrázku 47 vychází jako ideální hodnota odporu $45\ 000\ \Omega$, která odpovídá střednímu elektrickému výkonu $1,24\text{mW}$.



Obrázek 47: Závislost středního výkonu na odporu zátěže

Dalšími parametry, s kterými je možné pracovat jsou vlastnosti samotného piezoelektrického válce, jako je počet vrstev piezoelektrického materiálu. Následující grafy zobrazují, jak se chovají výstupní elektrické veličiny při změně výše zmíněných parametrů.

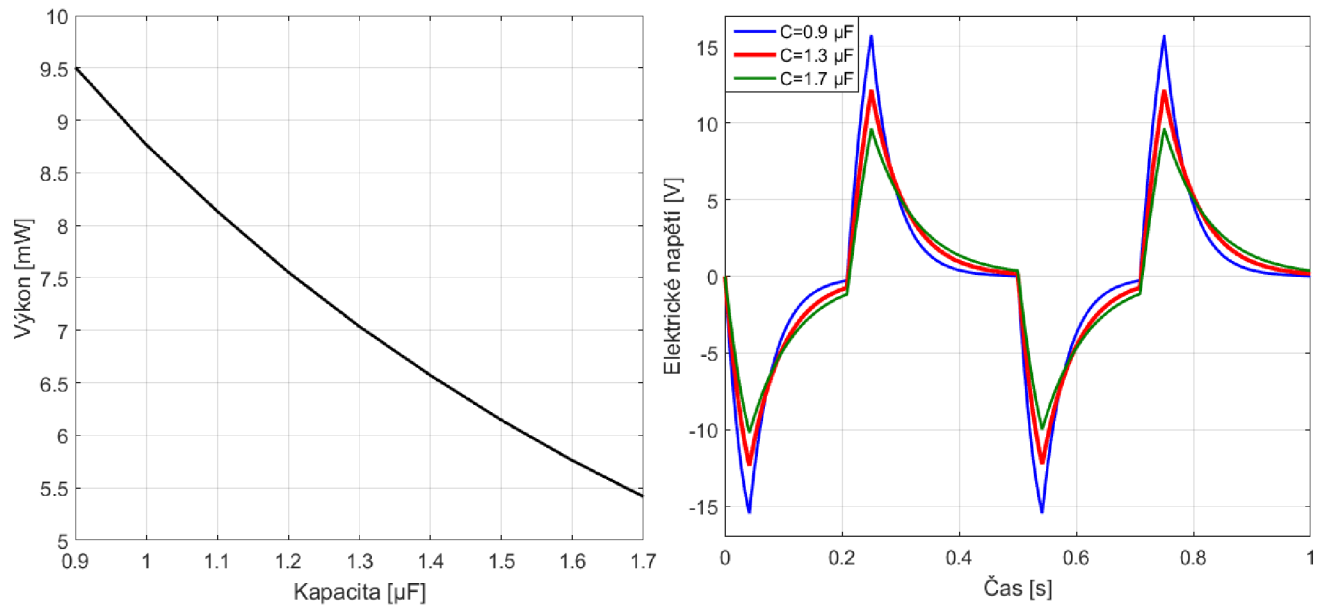


Obrázek 48: Vliv počtu piezoelektrických vrstev na střední výkon a elektrické napětí

V pravé části obrázku 48 lze vidět, jak s rostoucím počtem vrstev piezoelektrického materiálu téměř lineárně roste velikost generovaného napětí, v závislosti na tom je střední výkon na zátěži v grafu nalevo charakterizován kvadratickým růstem. Špičkové napětí pro 10 vrstev je $2,7\text{ V}$, pro 50 vrstev je generováno $14,8\text{ V}$ a pro 100 vrstev je harvester schopen vygenerovat $28,6\text{ V}$.

S počtem vrstev do jisté míry souvisí i kapacita piezoelektrického tělesa. Grafy v obrázku 49 ukazují nepřímou úměru mezi parametry kapacity a středního výkonu, napravo pak generované napětí. Je vidět, že s nižší kapacitou je špičkové napětí vyšší a rychle klesá,

naproti tomu s vyšší kapacitou si piezoelektrický váleček napětí déle uchová, jeho velikost je však nižší.



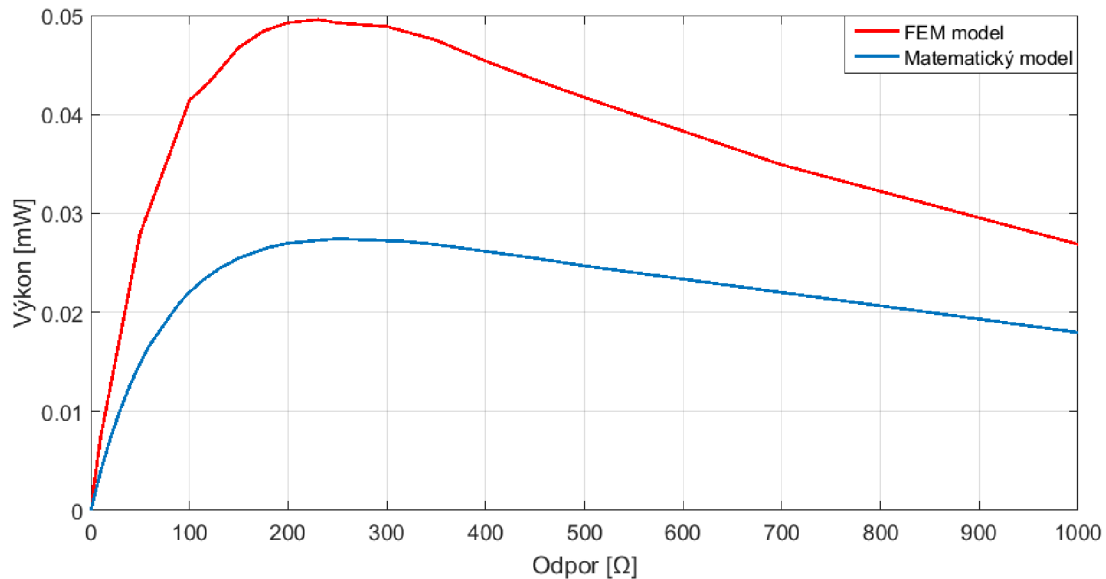
Obrázek 49: Vliv kapacity piezoelektrického stacku na střední výkon a elektrické napětí

Jelikož jsou na sobě parametry počtu piezoelektrických vrstev a kapacity závislé, není možné je nezávisle zvolit a musely být optimálně vybrány z katalogu výrobce PI [24]. Vybraný stack s označením P-016.80 má následující vlastnosti.

| Průměr | Délka | Počet vrstev | Tuhost | Kapacita |
|--------|--------|--------------|----------------|----------|
| 16 mm | 101 mm | 40 | 54 000 000 N/m | 1300 nF |

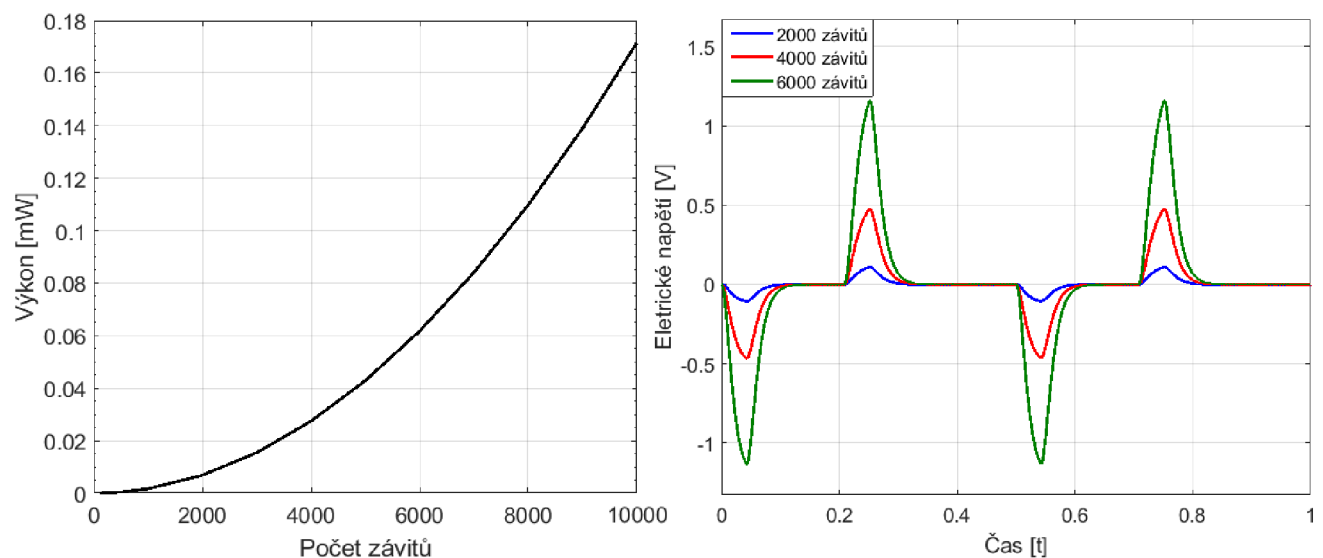
8.2 Magnetostrikční generátor

Stejně jako v případě piezoelektrického generátoru byl zjištěn ideální odpor zátěže, při kterém harvester dosahuje nejvyšší účinnosti. Bylo třeba uvažovat jak odpor zátěže, tak odpor cívky, který závisí na délce vodiče a tedy na počtu závitů. Při použití cívky se 4000 závitů je odpor cívky 259Ω . V grafu na obrázku 50 lze pak vidět závislosti středního výkonu na odporu zátěže pro oba modely magnetostrikčního materiálu. Pro úplný matematický model je střední výkon roven $27,4 \mu\text{W}$ při odporu zátěže 250Ω , nebo-li celkovém odporu 509Ω . Pro model vytvořený za pomoci softwaru FEMM je ideálním odporem zátěže 230Ω tedy celkovým odporem 489Ω při kterém dosahuje středního výkonu $49,6 \mu\text{W}$.



Obrázek 50: Závislost středního výkonu na odporu zátěže

Graf nalevo v obrázku 51 zobrazuje, jak střední výkon stoupá při použití více závitů cívky.



Obrázek 51: Závislost středního výkonu na počtu závitů

Tato křivka však popisuje průběh pouze pro malý počet závitů, podle modelu by teoretický výkon mohl být při dostatečném počtu závitů několik kW, avšak jak bylo zmíněno

v kapitole 7.4.1, matematický model uvažuje homogenní magnetické pole kolem Terfenolu, ve skutečnosti však pole slábne. Přidáním více závitů by sice generovaný výkon rostl, ale mnohonásobně rychleji by rostl i odpor cívky a využitelný výkon by tak klesal.

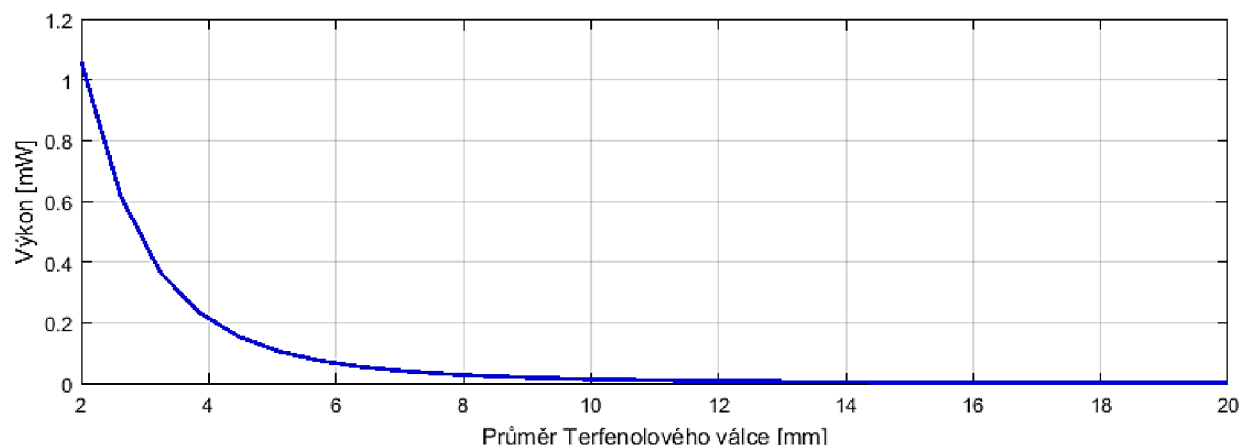
Pravá strana grafu zobrazuje generované napětí, které zákonitě musí také růst, v grafu jsou vykresleny průběhy pro 2000, 4000 a 6000 závitů pro které bylo ve stejném pořadí generováno špičkové napětí 0.1V, 0.47V a 1.16V. V rámci realističnosti byla po dohodě s vedoucím práce zvolena cívka se 4000 závitů.

Na trhu se bohužel nenachází mnoho společností komerčně vyrábějících Terfenol-D v normalizovaných rozměrech a daných vlastnostech. Výše uvedené simulace byly provedeny, s válečkem o následujících specifikacích.

| Průměr | Délka | Tuhost | Magnetostrikce (d_{33}) |
|--------|-------|-------------------|-----------------------------|
| 8 mm | 25 mm | 1 000 000 000 N/m | 2000 ppm |

Průměr byl navrhnout tak, aby maximální napětí v tlaku dosahovalo při průjezdu vlaku přibližně 55MPa a to z důvodu porovnání obou modelů magnetostrikčních generátorů, B-H charakteristika v obrázku 43, kterou je model ve FEMM určen je totiž definována pouze do 55MPa.

V praxi by tak mohl být průměr válečku ještě menší. Jak je vidět v grafu na obrázku 52, od tohoto průměru se také odvíjí střední výkon harvesteru. Výkon závisí čistě na mechanickém namáhání, při zúžení magnetostrikčního válce tak podle vztahu (6.10) stoupá mechanické napětí a s ním i výkon magnetostrikčního generátoru.



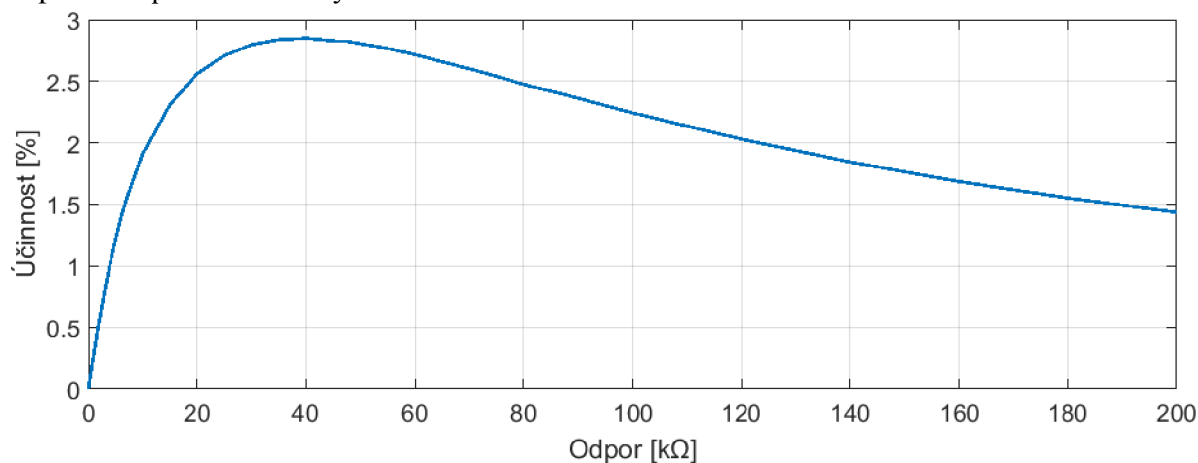
Obrázek 52: Závislost středního výkonu na průměru Terfenolového válce

Analýza závislosti středního výkonu na počtu závitů pro model vytvořený za pomoci FEMM měla stejný průběh jako pro úplný matematický model, proto zde není uvedena.

9. Porovnání SMART generátorů

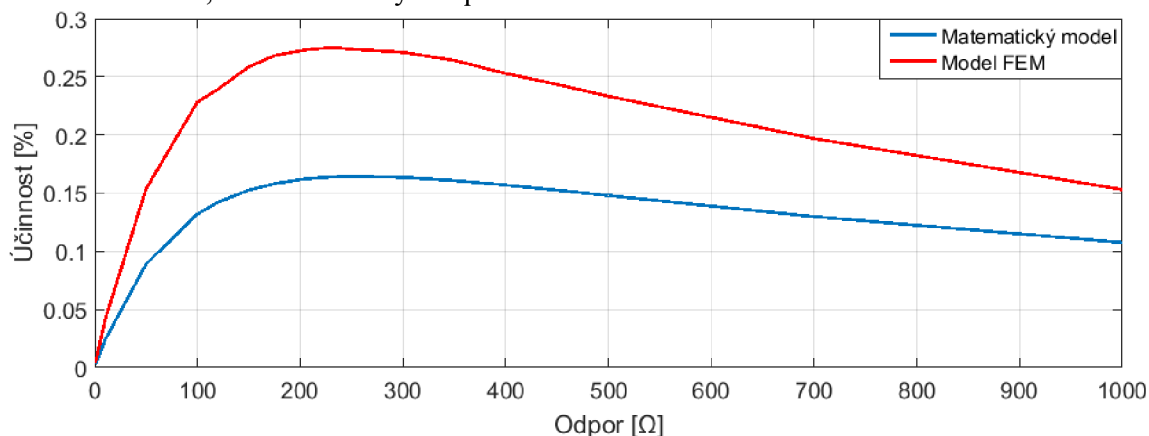
V předchozích částech byly popsány tři matematické modely, jeden piezoelektrického generátoru a další dva magnetostrikčního generátoru. U těchto modelů byla následně provedena citlivostní analýza a byl určen zbytek parametrů. Tato kapitola se věnuje porovnání výkonů a účinností jednotlivých energy harvesterů. Účinností je myšlen poměr energie potřebné ke stlačení harvesteru a vygenerované elektrické energie. Spolu s použitým zesilovacím rámem účinnost není nijak vysoká, ba naopak. Při stlačení rámu se veškerá síla působící vertikálně nepřenese do horizontálního směru. Energie je spotřebována i při horizontální deformaci, už samotný rám tedy účinnost značně snižuje. Dále tu je SMART materiál, v případě piezoelektrického materiálu účinnost značně ovlivňuje piezoelektrický parametr d_{33} a také průřez válce materiálu, čím menší průřez, tím větší je poměr síla na plochu a s tímto poměrem roste i elektrický výkon. V případě magnetostrikčního materiálu, přeměna z mechanického namáhání na elektrické napětí není přímá, ale jsou zde navíc ztráty související s elektromagnetickou indukcí, jako je například vzdálenost od zdroje magnetického pole.

V obrázku 53 je zobrazena charakteristika účinnosti piezoelektrického generátoru v závislosti na odporu zátěže, jak již bylo zmíněno, ideálním odporem je $45\ 000\ \Omega$. Při tomto odporu má piezoelektrický harvester i se zesilovacím rámem účinnost 2.84%.



Obrázek 53: Účinnost piezoelektrického generátoru

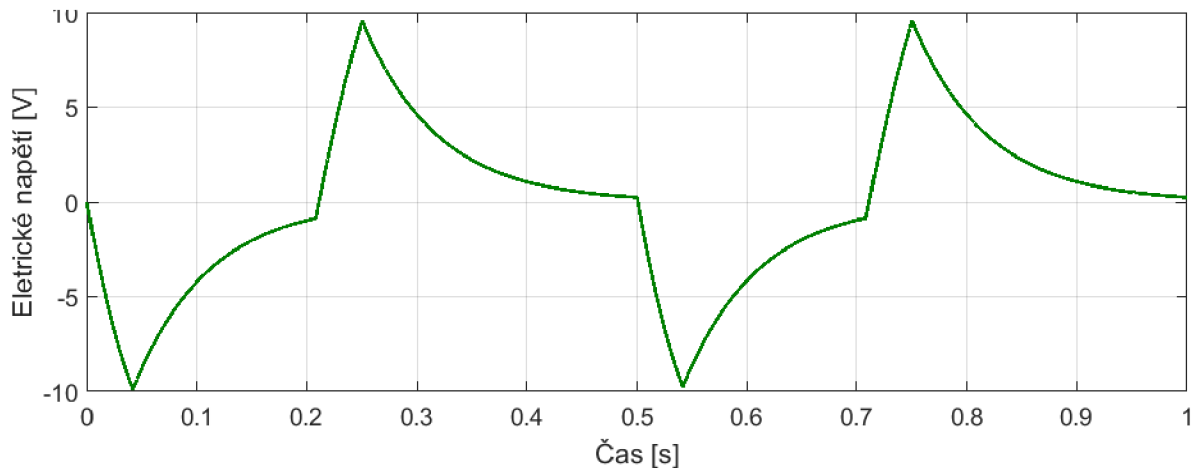
Co se týče magnetostrikčního generátoru, jeho účinnost se pohybuje o řád níže, v případě úplného matematického modelu vyšla 0.16% a podle modelu s využitím FEM je účinnost 0.28%, charakteristiky lze pozorovat v obrázku 54.



Obrázek 54: Účinnost magnetostrikčního generátoru

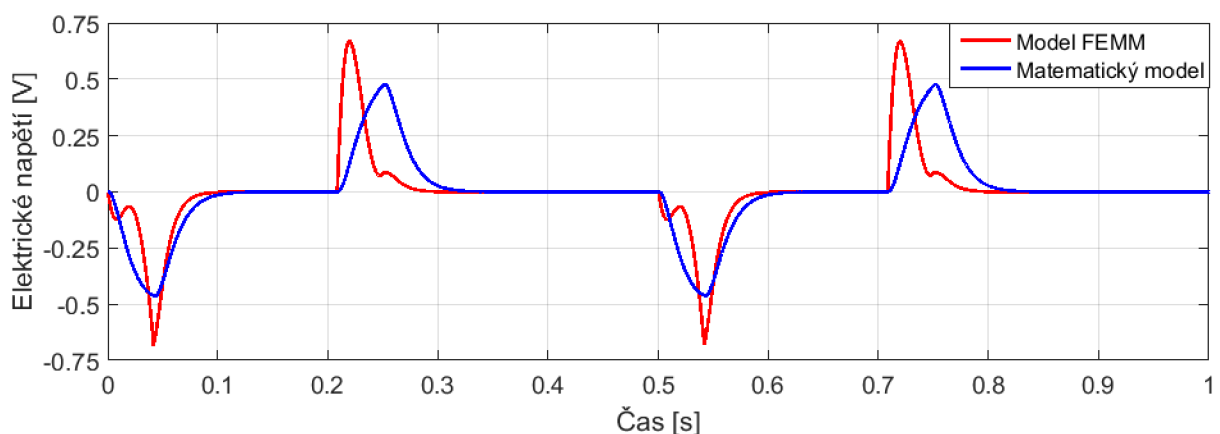
Charakteristiky elektrických veličin popsaných níže byly simulovány se vstupním signálem z kapitoly 8. Obrázek 55 vykresluje průběh napětí piezoelektrického generátoru, obrázek 56 pak průběhy napětí magnetostrikčního generátoru obou modelů.

U piezoelektrického generátoru je možné si všimnout pozvolného ustálení napětí při konstantním zatížení, to souvisí s relativně vysokou kapacitou použitého stacku, dále lze vidět špičkové napětí pohybující se mezi ± 10 V.



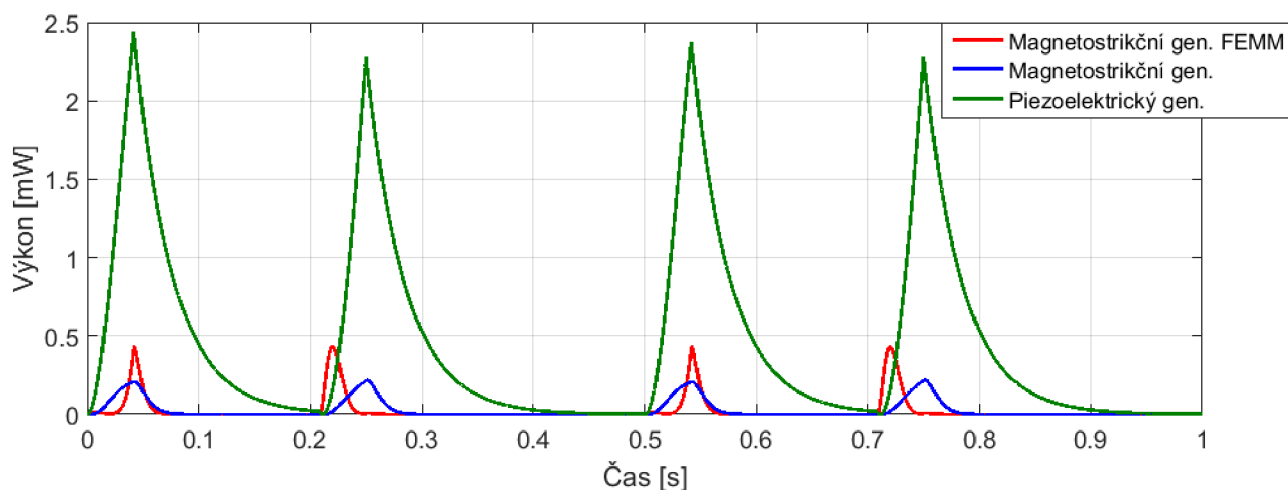
Obrázek 55: Generované napětí - piezoelektrický generátor

V případě magnetostrikčního generátoru je napětí značně nižší a nepřesahuje ani v jednom z matematických modelů ± 0.75 V. Zde lze dobře vidět rozdíl mezi oběma modely, úplný matematický model obsahuje dynamiku rámu, její vliv na materiál a na rozdíl od modelu s využitím FEMM je kompletně lineární. Model ve FEMM se skládá pouze z rovnice elektrického obvodu, a velikost magnetické indukce je určena z charakteristiky určené polynomem 3. řádu, tato charakteristika (obrázek 44) není lineární a spolu s derivací je důvodem proč lze u FEMM modelu v grafu pozorovat při jednom průjezdu dva vrcholky, také si lze všimnout, že při odlehčení materiálu vrcholky obou modelů nesedí nad sebou, ale model z FEMM je rychlejší, tento fakt také souvisí s tvarem polynomu. Matematicky je tento průběh správný, reálně však nenastává.



Obrázek 56: Generované napětí - magnetostrikční generátor

Graf, který nás zajímá nejvíce je vykreslen na obrázku 57, jedná se o průběhy okamžitých výkonů všech modelů. Z proběhlých analýz a simulací není překvapivé, že větší výkon je schopný dodávat piezoelektrický generátor. Co se rozdílu mezi magnetostrikčními modely týče, je zde opět vidět periodické předbíhání modelu z FEMM, jak již bylo psáno, důvodem je tvar křivky popisující závislost magnetické indukce a mechanického napětí určené polynomem 3. řádu.



Obrázek 57: Generovaný výkon – porovnání

Závěrem této kapitoly je tabulka obsahující okamžité elektrické veličiny jednotlivých generátorů, lze si všimnout, že největší výkon je schopný dodávat piezoelektrický generátor s okamžitým výkonem 2.4 mW. Proud, který dodává je však ze všech nejmenší a to z důvodu velkého odporu zátěže. Výkon magnetostrikčního generátoru je o řád menší, avšak hodnoty proudů jsou 5x vyšší než u piezoelektrického generátoru a pohybují se kolem 1mA.

| | Proud [mA] | Napětí [V] | Výkon [mW] |
|--------------------------------|------------|------------|------------|
| Piezoelektrický generátor | ± 0.24 | ± 10 | 2.4 |
| Magnetostrikční generátor | ± 0.94 | ± 0.5 | 0.22 |
| Magnetostrikční generátor FEMM | ± 1.3 | ± 0.67 | 0.43 |

10. Závěr

Tato práce se zabývá analýzou možného využití SMART materiálů jako zdrojů elektrické energie pro monitoring železniční dopravy v místech, kde není možné senzory napájet klasickým způsobem. První částí práce bylo nastínění pojmů energy harvesting a SMART materiály, v této části byly představeny různé způsoby využití pasivní energie a základní rozdělení SMART materiálů. Dále byla provedena rozsáhlá rešerše zaměřená na piezoelektrický a magnetostrikční materiál, popisující původ těchto vlastností, jejich mechanismus, matematický popis chování a materiály, které zmíněnými vlastnostmi disponují. Součástí této části bylo představení některých reálných energy harvesterů, které tyto materiály využívají, jedná se především o koncepty výzkumných center a univerzit.

Po představení konstrukčních řešeních proběhla analýza, které z nich nejvíce vyhovuje zadání problému. Při každém průjezdu vlaku je frekvence odlišná, závisí na jeho rychlosti a typu nápravy, tato skutečnost vyřadila nosníkové konstrukce, které musí mít rezonanční frekvenci naladěny na frekvenci průjezdu vlaku. Vybráno tedy bylo stack-type konstrukční řešení se zesilujícím rámem. Jelikož jsou tyto materiály relativně křehké, není možné je umístit rovnou pod kolej, tíhou vlaku by byl materiál rozdrčen, proto je použit zesilovací rám, který má za úkol transformaci vertikální síly z průjezdu kola, do horizontálního směru kde je umístěn SMART materiál. Rám byl vytvářen ve spolupráci se softwarem Ansys Workbench a byl navrhnout tak aby přenesl maximální sílu se zachováním životnosti pro nekonečný počet cyklů. Z MKP plyne že pro stlačení rámu o 0.4 mm je dostatečným zatížením 106N a díky tvaru rámu jsou tyto parametry transformovány ve velmi malý horizontální posuv, avšak se silou 2730N, rám tak navíc funguje podobně jako páka či kladka a sílu v příčném směru zvyšuje.

Další částí již byla tvorba matematických modelů a to jednoho modelu piezoelektrického generátoru a dvou variant modelu magnetostrikčního generátoru. Úplné matematické modely zahrnují jak samotný SMART materiál, tak celý dynamický systém i se zesilovacím rámem a každý z nich je popsán dvěma diferenciálními rovnicemi uvedenými v kapitolách 7.3.1 a 7.4.1. Druhá varianta modelu magnetostrikčního generátoru je vytvořena ve spolupráci se softwarem FEMM, pomocí kterého byly vypočteny hodnoty magnetických indukčních toků v závislosti na mechanickém namáhání materiálu. Tato charakteristika pak byla ve formě polynomu vložena do simulinkovského modelu a pro hodnoty mechanického napětí v materiálu produkuje ekvivalentní magnetický indukční tok.

Návrh modelů následuje kapitola zabývající se citlivostní analýzou, ve které je uvedeno, které parametry mají dominantní vliv na celkový střední výkon harvesteru, její závěr pak náleží volbě těchto parametrů.

Poslední kapitola patří porovnání účinností a výstupních elektrických veličin generátorů. Ze simulací vychází jako vítěz piezoelektrický generátor s účinností 2.84%, je schopen špičkově generovat výkon 2.4mW při elektrickém napětí ± 10 V. Účinnost magnetostrikčního generátoru se pohybuje o řád níže, model využívající charakteristiku z FEMM dosáhl 0.28% účinnosti a úplný matematický model ještě téměř o 50% méně. Účinnost samotných SMART materiálů není nijak vysoká a je třeba dále uvažovat disipaci energie při deformaci zesilovacího rámu ve vertikálním směru.

V případě úplného matematického modelu magnetostrikčního generátoru by účinnost šla ještě zvýšit volbou užšího průměru Terfenolového válečku. Byla však záměrně zvolena tak, aby mohly být vzájemně porovnány obě varianty magnetostrikčního generátoru. Rozdíl mezi nimi je patrný z grafu v obrázku 56 a obrázku 57. Varianta využívající FEMM je charakterizována polynomem 3. řádu a z toho důvodu obsahuje dva vrcholky, tento fakt je zapříčiněn pouze výsledkem derivace nelineární charakteristiky. To že se velikost elektrických

hodnot tolik liší je s velkou pravděpodobností zapříčiněno použitými daty při zjišťování závislosti magnetického indukčního toku na mechanickém napětí. Přestože byl Terfenol vyvinut v 70. letech minulého století, jedná se o nový materiál, který je stále předmětem zkoumání a není zveřejněno mnoho detailních charakteristik, pomocí kterých by se daly jeho vlastnosti přesně popsat.

Nedostatkem této práce může být nemožnost jakékoliv verifikace výsledných hodnot vypočtených matematickými modely, ať už experimentem, či jinými dostupnými daty. Předmětem dalšího výzkumu by tak mohla být reálná konstrukce piezoelektrického, či magnetostrikčního generátoru. Dále pak je zde možnost rozšíření modelu magnetostrikčního generátoru, jak bylo v práci zmíněno, předpokládá homogenní magnetické pole, to však se vzdáleností od terfenolového válce slábne a ve vnitřních závitech cívky se tedy indukuje jiné napětí než v závitech na vnějším okraji cívky. Bylo by zajímavé vidět jaké má nehomogenní magnetické pole vliv na generovanou energii.

SMART materiál v zesilovacím rámu má relativně kompaktní rozměry a při použití velkého množství takovýchto generátorů by teoreticky generovaná energie na provoz a posílání dat z čidel stačila. Nejedná se však o velmi ekonomické řešení a proto si myslím, že v kontextu energy harvesting a železniční tratě, nejsou SMART zdroje elektrické energie vhodnou variantou.

11. Literatura a použité zdroje

- [1] BATRA, A. K. a Almuatasim ALOMARI. *Power harvesting via smart materials*. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2017. ISBN 9781510608498.
- [2] CZANADI, Jindřich. *CHOVÁNÍ FEROELEKTRIK V TEPLTNÍ OBLASTI*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Zdenka Rozsivalová.
- [3] BODOVÉ GRUPY A KRYSTALOVÉ TŘÍDY, PROSTOROVÉ GRUPY. *Czech and Slovak Crystallographic Association* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kurs/grupy.htm>
- [4] *IEEE Standard on Piezoelectricity*. IEEE, 1988, , -. DOI: 10.1109/IEEESTD.1988.79638. ISSN 0-7381-2411-7.
- [5] LÁN, Radek. *Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [6] KIM, Tae hoon. *Characterization and applications of piezoelectric polymers*. Berkeley, 2015. Výzkumná práce. University of California. Vedoucí práce Ana Claudia Arias.
- [7] JAIN, Anjana, Prashanth K. J., Asheesh Kr. SHARMA, Arpit JAIN a Rashmi P.N. Dielectric and Piezoelectric Properties of PVDF/PZT Composites: A review. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*. 2015, 55(7), 1589-1616. DOI: 10.1002/pen.24088. ISSN 00323888. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.24088>
- [8] ERTURK, Alper, Onur BILGEN, Matthieu FONTENILLE a Daniel J. INMAN. Piezoelectric Energy Harvesting from Macro-Fiber Composites with an Application to Morphing-Wing Aircrafts. In: *19th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*. Ascona, Switzerland, 2008, s. 21. ISSN 1927-7946.
- [9] NAWASH, Jalal M. a Mohammad A. ALKHEDHER. Crystal growth of PMN-PT for energy harvesting applications. *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*. IEEE, 2017, 2017, , 1-6. DOI: 10.1109/IREC.2017.7926039. ISBN 978-1-5090-6751-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7926039/>
- [10] Piezoelektrický děj. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [11] DATTA, Supratik. Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction. In: *Comsol* [online]. 2014 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>
- [12] HANUŠ, Jiří. *Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

[13] OLABI, A.G. a A. GRUNWALD. *Design and application of magnetostrictive materials*. 2008, 29(2), 469-483. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.12.016. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306907000027>

[14] G. BENATAR, Jonathan. *FEM IMPLEMENTATIONS OF MAGNETOSTRICTIVE-BASED APPLICATIONS*. College Park, 2005. Diplomová práce. Faculty of the Graduate School of the Maryland. Vedoucí práce Jonathan G. Benatar.

[15] DENG, Zhangxian a Marcelo J DAPINO. Review of magnetostrictive vibration energy harvesters. *Smart Materials and Structures*. 2017, 26(10), 103001-. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/26/i=10/a=103001?key=crossref.08ffecdb39d350b129e29542fdfcafe0>

[16] ŠUMPELOVÁ, Jana. *Magnetostrikční vibrační generátor*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

[17] WISCHKE, M, M MASUR, M KRÖNER a P WOIAS. Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes. *Smart Materials and Structures*. 2011, 20(8), 085014-. DOI: 10.1088/0964-1726/20/8/085014. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/20/i=8/a=085014?key=crossref.16aa6fadd9ffa10cf505de7884ac8f63>

[18] TIANCHEN, Yuan, Yang JIAN, Song RUIGANG a Liu XIAOWEI. Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles. *Smart Materials and Structures*. 2014, 23(12), 125046-. DOI: 10.1088/0964-1726/23/12/125046. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/23/i=12/a=125046?key=crossref.44f7a291f5ef7b6033a9bc46a6c5ec87>

[19] WANG, Jianjun, Zhifei SHI, Hongjun XIANG a Gangbing SONG. Modeling on energy harvesting from a railway system using piezoelectric transducers. *Smart Materials and Structures*. 2015, 24(10), 105017-. DOI: 10.1088/0964-1726/24/10/105017. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/24/i=10/a=105017?key=crossref.a34dcc2c1205f34f72d96e53309de9d0>

[20] WANG, Ya, Wusi CHEN a Plinio GUZMAN. Piezoelectric stack energy harvesting with a force amplification frame: Modeling and experiment. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016, 27(17), 2324-2332. DOI: 10.1177/1045389X16629568. ISSN 1045-389X. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X16629568>

[21] Vibration-induced energy harvesting system using Terfenol-D. *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. IEEE, 2015, 2015, , 2319-2324. DOI: 10.1109/ICMA.2015.7237848. ISBN 978-1-4799-7097-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7237848/>

[22] YAN, Baiping, Chengming ZHANG a Lili LI. Design and Fabrication of a High-Efficiency Magnetostrictive Energy Harvester for High-Impact Vibration Systems. *IEEE*

Transactions on Magnetics. 2015, 51(11), 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2441295. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7118195/>

[23] FEENSTRA, Joel, Jon GRANSTROM a Henry SODANO. Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2008, 22(3), 721-734. DOI: 10.1016/j.ymssp.2007.09.015. ISSN 08883270. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327007001951>

[24] *Piezoelectric Actuators*. Germany: Physik Instrumente, 2012. 18 s. Dostupné také z: <http://www.piezo.ws/pdf/Piezo.pdf>

[25] *Piezoelectric effect in Quartz* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://theawakenedstate.net/understanding-the-power-of-crystals/>

[26] DE GRUYTER. *Direction index of electromechanical constants in poled piezoelectric ceramics* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/ehs.2017.4.issue-1/ehs-2016-0028/ehs-2016-0028.xml>

[27] *Piezoresponse image of (110)-oriented PMN-33% PT single crystal* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/37/20/020/pdf>

[28] *A 500 gram PMN-PT Crystal* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.hcmat.com/Piezo/Pmn/Pmn.htm>

[29] *A SEM picture of the individual grains in a PZT ceramic* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.rmc-cmr.ca/en/physics-space-science/laboratory-ferroelectric-and-optical-materials>

[30] *SEM images of b-PVDF* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pen.24088>

[31] *MFC transducer construction* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/1/2/68/htm>

[32] *Photomicrograph of the cross section of a macro-fiber composite* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://wikicourses.wikispaces.com/piezo+electric+materials>

[33] *Piezoelectric constants in typical energy-harvesting modes* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Piezoelectric-constants-in-typical-energy-harvesting-modes-93_fig10_263054156

[34] *Structure and contacting of a stacked piezo actuator* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezo-technology/properties-piezo-actuators/electrical-operation/>

[35] *Rectangular cantilever beam* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4755/htm>

[36] *Optical morphologies of transverse sections* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://ac.els-cdn.com/S0925838801017340/1-s2.0-S0925838801017340-main.pdf?_tid=2081da35-0241-433a-a2eb-2387a6163e45&acdnat=1525860243_a32064cdba265400606a3a3833d227a4

[37] *Single Galfenol thin film system* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://ac.els-cdn.com/S0924424709001678/1-s2.0-S0924424709001678-main.pdf?_tid=e3be4c58-fc4a-4bb0-bc53-4f7e6453d097&acdnat=1525860305_da2d2f5456bc2ac78e428da39975852b

[38] *Two schemes for kinetic energy harvesting with magnetostrictive materials* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.sigmaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/kinetic-energy-harvesting.html>

[39] *Coil* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://images.homedepot-static.com/productImages/4d0224ed-8276-4919-8e55-c5917b15bfb7/svn/copper-pipe-pcle-3751020-64_1000.jpg

[40] *Katt rá a felnagyításhoz* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.hangtechnikakft.hu/legmagos-tekeracs-14500mh-3-2150-wire-120mm17awg-od-71-60mm-8605>

[41] *Magnetic Field for Terfenol-D* [online]. In: . [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://tdvib.com/magnetostriction/>

12. Seznam obrázků, grafů a tabulek

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Energetická spotřeba některých zařízení | 13 |
| Obrázek 2: Piezoelektrický efekt na krystalu SiO ₂ [25] | 14 |
| Obrázek 3: Orientace elektrických dipólů před, během a po polarizaci [11] | 15 |
| Obrázek 4: Souřadný systém [26] | 16 |
| Obrázek 5: Struktura krystalu PMN-0.33PT [27][28] | 18 |
| Obrázek 6: Mikrostruktura PZT keramice [29] | 18 |
| Obrázek 7: a) Struktura fáze α [6] b) Struktura fáze β [30] | 19 |
| Obrázek 8: Mikro-vláknový kompozit [31] | 20 |
| Obrázek 9: Řez kompozitem [32] | 20 |
| Obrázek 10: Módy piezo-generátorů [33] | 21 |
| Obrázek 11: Schéma piezoelektrických generátorů [34][35] | 22 |
| Obrázek 12: Schéma a realizace harvesteru [17] | 23 |
| Obrázek 13: Stav kondenzátoru při pracovním cyklu [17] | 23 |
| Obrázek 14: Piezoelektrický generátor [18] | 24 |
| Obrázek 15: Umístění generátoru [18] | 24 |
| Obrázek 16: Výsledky simulace [18] | 24 |
| Obrázek 17: Stack-type piezoelektrický generátor [19] | 25 |
| Obrázek 18: Výsledky experimentu [19] | 25 |
| Obrázek 19: Piezoelektrický generátor se zesilovacím rámem [20] | 26 |
| Obrázek 20: Výsledky simulací a experimentu [20] | 26 |
| Obrázek 21: Poměrné prodloužení v závislosti na magnetickém poli [13] | 27 |
| Obrázek 22: Joulův jev [14] | 27 |
| Obrázek 23: Villariho jev [15] | 28 |
| Obrázek 24: Struktura Terfenolu-D [36] | 29 |
| Obrázek 25: Struktura Galfenolu [37] | 29 |
| Obrázek 26: Provedení magnetostrikčních generátorů [38] | 30 |
| Obrázek 27: Řez GMEG generátorem [21] | 31 |
| Obrázek 28: Výsledky experimentu [21] | 31 |
| Obrázek 29: High impact vibration generator [22] | 32 |
| Obrázek 30: Umístění generátoru | 33 |
| Obrázek 31: Wang, Chen a Guzman piezoelektrický harvester se zesilovacím rámem [20] ... | 33 |
| Obrázek 32: Geometrie zesilovacího rámu | 34 |
| Obrázek 33: Tuhost zesilovacího rámu | 34 |
| Obrázek 34: Okrajové podmínky | 35 |
| Obrázek 35: MKP síť | 36 |
| Obrázek 36: Pevnostní analýza - napětí | 36 |
| Obrázek 37: Dynamické schéma soustavy | 37 |
| Obrázek 38: Model piezoelektrického generátoru | 40 |
| Obrázek 39: Elektrický obvod magnetostrikčního generátoru | 41 |
| Obrázek 40: Parametry cívky [39][40] | 42 |
| Obrázek 41: Simulinkovský model magnetostrikčního generátoru | 43 |
| Obrázek 42: Osově symetrický model Terfenolového válce ve FEMM | 44 |
| Obrázek 43: B-H charakteristiky Terfenolu v závislosti na mechanickém napětí [41] | 45 |
| Obrázek 44: Charakteristika závislosti magnetického toku na mechanickém napětí | 45 |
| Obrázek 45: Schéma modelu magnetostrikčního generátoru s využitím polynomu magnetického toku | 46 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 46: Vychýlení vstupující do systému | 47 |
| Obrázek 47: Závislost středního výkonu na odporu zátěže | 48 |
| Obrázek 48: Vliv počtu piezoelektrických vrstev na střední výkon a elektrické napětí | 48 |
| Obrázek 49: Vliv kapacity piezoelektrického stacku na střední výkon a elektrické napětí | 49 |
| Obrázek 50: Závislost středního výkonu na odporu zátěže | 50 |
| Obrázek 51: Závislost středního výkonu na počtu závitů | 50 |
| Obrázek 52: Závislost středního výkonu na průměru Terfonolového válce | 51 |
| Obrázek 53: Účinnost piezoelektrického generátoru | 52 |
| Obrázek 54: Účinnost magnetostrikčního generátoru | 52 |
| Obrázek 55: Generované napětí - piezoelektrický generátor | 53 |
| Obrázek 56: Generované napětí - magnetostrikční generátor | 53 |
| Obrázek 57: Generovaný výkon – porovnání | 54 |

13. Seznam použitých symbolů

| Symbol | Popis | Jednotka |
|-------------|---|----------|
| A_C | Průřez cívky | m^2 |
| A_D | Průřez drátu | m^2 |
| B_3 | Magnetická indukce | T |
| D_3 | Hustota elektrického náboje | C/m^2 |
| D_C | Vnější průměr cívky | mm |
| E_3 | Intenzita elektrického pole | V/m |
| H_3 | Intenzita magnetického pole | A/m |
| L_C | Indukčnost cívky | H |
| L_{Terf} | Délka Terfenolového válce | m |
| R_C | Odpor cívky | Ω |
| R_Z | Odpor zátěže | Ω |
| S_3 | Přetvoření | - |
| T_3 | Mechanické napětí | Pa |
| b_{Amp} | Tlumení zesilovacího rámu | N/ms |
| b_{Mag} | Magnetické tlumení | N/ms |
| b_{Stack} | Tlumení SMART materiálu | N/ms |
| b_p | Poměrný útlum | - |
| d_{33} | V souvislosti s piezoelektrickým materiálem: Piezoelektrický koeficient | pC/N |
| d_{33} | V souvislosti s magnetostrikčním materiálem: Magnetostrikční koeficient | ppm |
| d_C | Vnitřní průměr cívky | mm |
| k_{Amp} | Tuhost zesilovacího rámu | N/m |
| k_{Stack} | Tuhost SMART materiálu | N/m |
| l_C | Délka cívky | m |
| l_D | Délka drátu | m |
| m_{Amp} | Efektivní hmotnost zesilovacího rámu | kg |
| m_{Stack} | Efektivní hmotnost vícečtu SMART materiálu | kg |
| s_{33}^E | Elastická poddajnost za konstantní intenzity elektrického pole | $1/Pa$ |
| s_{33}^H | Elastická poddajnost za konstantního magnetického pole | $1/Pa$ |
| \ddot{x} | Zrychlení | m/s^2 |
| \dot{x} | Rychlost stlačování SMART materiálu | m/s |
| h | Výška jedné piezoelektrické vrstvy | m |
| A | Průřez SMART materiálem | m^2 |
| C | Kapacita | F |
| E | Yongův modul pružnosti v tahu | Pa |
| F | Přenesená síla působící na SMART materiál | N |
| N | Počet závitů cívky | - |
| Q | Kvality faktor | - |
| i | Elektrický proud | A |
| n | Počet piezoelektrických vrstev | - |
| u | Elektrické napětí | V |
| x | Stlačení SMART materiálu | m |
| r | Vzdálenost od zdroje magnetického pole | m |

| Řecké symboly | Popis | Jednotka |
|-------------------|--|------------------------------|
| σ_{tmax} | Maximální dovolené napětí | <i>Pa</i> |
| σ_{ct} | Maximální dovolené napětí pro nekonečný počet cyklů | <i>Pa</i> |
| ω_0 | Vlastní frekvence | <i>rad/s</i> |
| ϵ_{33}^T | Absolutní permitivita při konstantním mechanickém namáhání | <i>F/m</i> |
| μ_{33}^T | Permeabilita při konstantním mechanickém namáhání | <i>H/m</i> |
| μ_{Terf} | Permeabilita Terfenolu-D | <i>H/m</i> |
| ρ | Rezistivita mědi | <i>Ωm</i> |
| ϕ | Magnetický indukční tok | <i>Wb</i> |

14. Seznam příloh

1. Simulinkovský model a skript s parametry piezoelektrického generátoru
2. Simulinkovský model a skript s parametry magnetostrikčního generátoru
3. Simulinkovský model magnetostrikčního generátoru s polynomem magnetického toku
4. Model Terfenolu-D ve FEMM
5. Model zesilovacího rámu v Ansys Workbench 17.2