



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

MAGNETOSTRIKČNÍ VIBRAČNÍ GENERÁTOR

MAGNETOSTRICTION VIBRATION POWER GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jana Šumpelová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka:	Bc. Jana Šumpelová
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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:

Magnetostrikční vibrační generátor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití magnetostrikce ke generování elektrické energie z vibrací je jednou z potenciálních možností energy harvesting technologií. Magnetostrikční materiál je vhodně umístěn do vibrující struktury a v kombinaci s cívkou a elektronikou lze použít jako nezávislý zdroj elektrické energie. Práce se zabývá popisem této aplikace a na základě simulačních modelů jsou navrženy parametry celé soustavy.

Cíle diplomové práce:

1. Popis autonomního zdroje elektrické energie založeného na magnetostrikčním materiálu.
2. Vytvoření simulačního modelu této mechatronické soustavy.
3. Predikce generovaného výkonu na základě simulačního modelu.
4. Zhodnocení magnetostrikčního generátoru vzhledem k alternativním energy harvesting technologiím.

Seznam literatury:

ENGDAHL a GORAN, 2011. Handbook of Giant Magnetostrictive Materials: Academic Press. ISBN 978-0123885937.

GIBBS, M.R.J., 2001. Modern Trends in Magnetostriction Study and Application. Dordrecht: Springer Netherlands. ISBN 978-0-7923-6717-8.

BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE, 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Measurement Science and Technology, roč. 17, č. 12, s. R175–R195. ISSN 0957-0233.

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

OLABI, A.G. a A. GRUNWALD, 2008. Design and application of magnetostrictive materials. Materials & Design, roč. 29, č. 2, s. 469–483. ISSN 02613069.

FUNCK, Torsten, 2011. Metrology for energy harvesting. In: Joint IMEKO TC11-TC19-TC20 Int. Symp. Metrological Infrastructure, Environmental and Energy Measurement and Int. Symp. of Energy Agencies of Mediterranean Countries, IMEKO-MI 2011. s. 20–22. ISBN 9781618391186.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

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 myšlenkou harvestování energie pomocí vibrací. Popisuje magnetostrikční princip jako možnost získávání elektrické energie. Jedná se o generátor tvořený z nosníku s magnetostrikčním materiálem (Terfenol-D) a cívky. Model tohoto přístroje je vytvářen v prostředí Matlab/Simulink a programu FEMM. Pro různé naměřené hodnoty vibrací jsou poté tyto způsoby porovnávány. V programu FEMM lze zdokonalit získávání energie pomocí modelování různých okolních podmínek a použitím dalších materiálů (například přidáním permanentních magnetů).

Výstup práce vyjadřuje schopnost harvestování energie navrhnutého magnetostrikčního generátoru v porovnání s již vytvořenými modely piezoelektrického a elektromagnetického generátoru. Na základě těchto výsledků lze určit, který generátor je vhodnější pro různé druhy aplikací.

Klíčová slova

Energy harvesting, magnetostricce, Terfenol-D, generátor, Simulink, FEMM, vibrace, elektromagnetické pole, indukce, výkon.

Abstract

This thesis deals with the idea of energy harvesting from mechanical vibration. It describes the magnetostrictive principle as a possibility to obtain an electrical energy. It is about a generator made of a beam with Terfenol-D material and a coil. The model of this device is created in Matlab/Simulink and FEMM application. For various values of measured vibration, these methods are then compared. In FEMM, you can improve energy gain by modeling of various environmental conditions and with using of another materials (e.g. by adding of permanent magnets).

The outcome of the this thesis expresses the ability to harvest the energy with designed magnetostrictive generator compared to the already created models of the piezoelectric and electromagnetic generator. Based on these results, it is possible to determine which generator is more suitable for particular application.

Key words

Energy harvesting, magnetostriction, Terfenol-D, generator, Simulink, FEMM, vibration, electromagnetic field, induction, power.

Bibliografická citace

ŠUMPELOVÁ, J. *Magnetostrikční vibrační generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Magnetostrikční vibrační generátor" vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. 5. 2017

.....
Jana Šumpelová

Poděkování

Mé poděkování patří panu doc. Ing. Zdeněku Hadašovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích během zpracovávání této diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Milanu Kselíkovi za technické konzultace a slečně Bc. Miroslavě Šplíchalové za pomoc při gramatické kontrole práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1. Úvod	11
2. Formulace problému a stanovení cílů	13
3. Energy harvesting	15
3.1. Elektrostatické generátory	16
3.2. Piezoelektrický generátor	16
3.3. Elektromagnetický generátor	17
3.4. Magnetostrikční generátor	18
4. Magnetostrikce	21
4.1. Popis magnetostrikčního jevu	21
4.2. Magnetostrikční materiál Terfenol-D a jeho vlastnosti	23
4.3. Realizované magnetostrikční generátory	27
4.3.1. Generátor Lublin	27
4.3.2. Generátor North Carolina	28
4.3.3. Generátor Kanazawa	29
4.3.4. Generátor North California a Shanghai	29
5. Model magnetostrikčního generátoru	31
5.1. Stavový model generátoru	31
5.1.1. Výpočet napětí v materiálu σ	32
5.1.2. Youngův modul pružnosti E	32
5.1.3. Kvadratický moment průřezu I	33
5.1.4. Elektromechanický parametr G	33
5.1.5. Magnetická indukce a tok	34
5.1.6. Koercivita	34
5.2. Parametry cívky	34
5.3. Reakce Terfenolu-D na tlak	35
5.4. Výsledný model A generátoru	36
5.4.1. Model elektrické části magnetostrikčního generátoru	37
5.4.2. Geometrické parametry modelu A	38
5.4.3. Výsledky simulací modelu A	39
5.5. Model B v prostředí FEMM	43
5.5.1. Zvýšení výkonu pomocí magnetických materiálů	43
5.5.2. Výsledky simulací modelu B	43

5.6. Model C FEMM/Simulink pro výpočet elektromechanického parametru G	44
5.6.1. Výsledky modelu C propojující program FEMM a Matlab/Simulink	46
5.7. Zhodnocení magnetostrikčního nosníku jako energy harvestru	48
6. Porovnání různých typů generátorů	49
6.1. Popis jednotlivých generátorů	49
6.1.1. Magnetostrikční generátor	49
6.1.2. Piezoelektrický generátor	50
6.1.3. Elektromagnetický generátor	50
6.2. Výsledky jednotlivých generátorů	51
6.3. Zhodnocení jednotlivých typů generátorů	53
6.4. Možnosti další práce	53
7. Predikce výkonu z naměřených dat	55
7.1. Magnetostrikční generátor model A Simulink	55
7.2. Srovnání vygenerované energie pro různé typy generátorů	56
8. Závěr	59
Použitá literatura	61
Příloha A: ETREMA	67

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Jednotka	Strana
a_{in}	Vnitřní výška cívky	[m]	34
a_{out}	Vnější výška cívky	[m]	34
B	Magnetická indukce	[T]	22
b_p	Poměrný útlum	[-]	32
B_r	Remanence	[T]	26
C	Součinitel mechanického tlumení	[Ns/m; kg/s]	31
d, d^*	Magnetostrikční koeficienty	[m/A]	22
E^H	Celkový Youngův modul pružnosti při konstantním H	[Pa]	22
$E_{t,m}$	Youngův modul pružnosti Terfenolu-D, mědi	[Pa]	32
G	Elektromechanický převod	[-]	31
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]	22
h	Výška nosníku	[m]	32
H_c	Koercivita	[A/m]	26
h_m	Výška mědi	[m]	32
h_t	Výška Terfenolu-D	[m]	32
i	Indukovaný proud	[A]	31
I	Proud závitem cívky	[A]	33
J_y	Deviační moment	[m ⁴]	31
K	Tuhost nosníku	[N/m]	31
k	Coupling faktor	[-]	15
l	Délka nosníku	[m]	32
l_c	Délka cívky	[m]	34
l_l	Vzdálenost od vetknutí ke středu zátěže	[m]	32
l_m	Délka mědi	[m]	32
l_t	Délka Terfenolu-D	[m]	32
M	Celková hmotnost nosníku	[kg]	31
M_o	Ohybový moment	[Nm]	32
N	Počet závitů cívky	[-]	33
Q	Kvalita	[-]	32
r	Výchylka nosníku	[m]	31
R	Odpor zátěže	[Ω]	31
\ddot{r}	Zrychlení kmitání nosníku	[m/s ²]	32
\dot{r}	Rychlost kmitání nosníku	[m/s]	31
R_L	Vnitřní odpor cívky	[Ω]	31
S_c	Plocha průřezu cívky	[m ²]	33
s^H	Elastická poddajnost	[m ² /N]	22
S_m	Plocha průřezu mědi	[m ²]	33
S_t	Plocha průřezu Terfenolu-D	[m ²]	33

t	Čas	[s]	33
u	Napětí	[V]	31
w	Šířka nosníku	[m]	32
w_{in}	Vnitřní šířka cívky	[m]	34
w_m	Šířka mědi	[m]	34
W_o	Modul průřezu v ohybu	[m ³]	32
w_{out}	Vnější šířka cívky	[m]	34
w_t	Šířka Terfenolu-D	[m]	34
\ddot{y}	Budící vibrace	[m/s ²]	32

Řecké znaky	Popis	Jednotka	Strana
ε	Přetvoření	[Δm/m]	21
μ^σ	Permeabilita za konstantního σ	[H/m]	22
ρ	Resistivita mědi	[Ωm]	34
σ	Napětí nosníku	[Pa]	22
ϕ	Magnetický tok	[Wb]	33
Ω_0	Vlastní frekvence	[rad/s]	32

Zkratka	Popis	Jednotka	Strana
Co	Kobalt	[-]	23
Db	Dysprosium	[-]	23
Fe	Železo	[-]	23
FEMM	Finite element method magnetics	[-]	13
MEG	Magnetostrikční elektrický generátor	[-]	21
MEMS	Mikro-elektro-mechanický systém	[-]	15
MKP	Metoda konečných prvků	[-]	13
MSM	Magnetostrikční materiál	[-]	13
NOL	Naval Ordnance Laboratory	[-]	23
ppm	Part per milion	[-]	23
RMS	Root mean square	[-]	28
Tb	Terbidium	[-]	23

1. Úvod

V současné době, kdy elektrická energie představuje nedílnou součást lidských životů, považujeme objevování nových možností pro její získávání za nesmírně důležité, především jde-li o energii získanou pomocí energy harvesting. Takto získaná elektrická energie může být využita nejen díky úsporám finančním (získávání energie z přírodních zdrojů jako jsou solární panely či větrné elektrárny a další), ale také například díky úspoře kabeláže pro napájení mnoha senzorů rozmístěných ve větších vzdálenostech či na strojích kde by váha kabeláže způsobovala problémy.

Takovéto senzory jsou soběstačné a ekonomické. Bez-bateriové provedení umožňuje rapidně snížit váhu i velikost zařízení a je tak dán prostor ke zmenšování a vylepšování dosavadní elektroniky senzorů. Kvalitní a výkonná elektronika je pro senzory napájené pomocí energie harvestingu velmi důležitou součástí. Z harvestrů lze běžně čerpat napětí okolo jednoho voltu, avšak někdy i méně. Běžná elektronika potřebuje pro svůj rozběh v ideálním případě napětí alespoň jeden volt, proto je takováto elektronika a její vývoj mnohdy náročnější a dražší než samotný harvestr. Je tedy nutné zvážit kde a za jakých podmínek harvestr použít a zda je energeticky i ekonomicky výhodný ať už s využitím externí baterie či bez ní.

Z jakých zdrojů lze získávat elektrickou energii popisuje obrázek 1.1 z článku [1]. Využit lze elektromagnetické vlny, vodní, větrnou a solární energii, teplotu zemského jádra a rozpálené střechy či rozkládajícího se kompostu. V dnešní době je nejvyužívanější a zatím nejvýkonnější vodní a solární energie.



Obrázek 1.1: Využitelné zdroje pro energy harvesting [1]

Jedním ze způsobů využití energy harvestingu je získávání energie z vibrací. Mezi nejvyužívanější zdroje vibrací patří jakékoliv mechanické vibrace strojů (vibrace ocasu vrtulníku, kmity podvozku automobilu či vibrace z domácích spotřebičů jako je například automatická pračka). Dalším snadno získaným zdrojem vibrací je lidské tělo. Využit se dají vibrace při chůzi, běhu či nabíjení hodinek z kmitů ruky.

Vibrace jsou nejčastěji přenášeny pomocí nosníku se zatížením na jeho konci. Dalším možným způsobem je zavěšení zátěže na pružinu. Touto metodou lze získávat energii s využitím piezoelektrického, magnetoelektrického, magnetostrikčního jevu a dalších.

Právě magnetostrikční jev je znám od roku 1842 a v současné době se staví do popředí díky svým jedinečným vlastnostem a chováním sjednocujícím výhody piezoelektrického a elektromagnetického principu. V jak velké míře toto platí, by měla ukázat následující studie.

2. Formulace problému a stanovení cílů

Tato práce se zaměřuje na využití magnetostrikčního generátoru jako zdroje energie a jeho zhodnocení v porovnání s piezoelektrickým či magnetoelektrickým generátorem. Neopomenutým parametrem zůstává závislost na váze a rozměrech výsledného generátoru.

Magnetostrikčními materiály, jejich vlastnostmi a použitím se zabývá velké množství článků. Z těchto pramenů bylo čerpáno pro pochopení chování a principů při získávání energie z kmitání MSM¹ Terfenolu-D. Základem problému je mechanická soustava - vetknutý nosník se zatížením na jeho konci a cívkou umístěnou přibližně do jedné třetiny nosníku v adekvátní vzdálenosti. Nosič s Terfenolem-D tvoří jádro této cívky. Při kmitání nosníku jsou mechanické síly přetvářeny díky napětí v materiálu na síly magnetické (viz. Kapitola 4. Magnetostrikce). Vzniklá magnetická indukce poté v cívce indukuje napětí.

Vytvořené modely popisují chování nosníku pouze v teoretické rovině. Parametry materiálu byly buď vypočteny, nebo pro základní materiálové vlastnosti vybrány dle nejběžnějších parametrů udávaných výrobcem nebo otestovaných autory vědeckých článků.

Vzhledem k mnoha faktorům ovlivňujícím parametry a chování takovýchto materiálů (hlavně způsob výroby a čistota materiálu) je pravděpodobné, že každý sestavený generátor bude poskytovat odlišné výsledky.

Pro výchozí model generátoru byl použit program Matlab/Simulink s využitím elektromechanické analogie. Speciálně v podprogramu Simulink spouštěným přes prostředí Matlab lze pomocí bloků řešit soustavy rovnic v grafickém rozhraní. Pomocí bloků v Simulinku byla vytvořena jak mechanická, tak i elektrická část generátoru se zadanými parametry z prostředí Matlab.

Pro další modely byl zvolen program FEMM², který umožňuje modelovat magnetické materiály a jejich vlastnosti. Výhodou programu je jeho kompatibilita a možnost ovládní pomocí příkazů přes rozhraní Matlab. Program FEMM využívá k řešení problému MKP³. Program slouží pro simulace magnetických a elektrostatických polí, tepelných a proudových toků, ovšem pouze ve 2D. Jelikož jeho knihovna obsahuje pouze klasické materiály, parametry pro Terfenol-D musejí být do programu přidány stejně tak jako jeho B-H křivky. Tyto parametry byly čerpány z dat nejznámějšího výrobce senzorů s magnetostrikčními materiály ETREMA dle přílohy A. Jak tvořit modely ve FEMM popisují návody [2] a [3]. Pro tento program bylo nutné znát rozložení napětí v nosníku. To lze získat jak z předešlého modelu v Simulinku, či nezávisle na něm pomocí programu ANSYS. Tento program využívá metody konečných prvků pro získání rozložení napětí a průhybu vetknutého nosníku ze zadaných materiálů a jejich vlastností. Dle rozložení napětí jsou tedy v programu FEMM zvoleny B-H křivky a další parametry, díky nimž získáme rozložení magnetické indukce v okolí celého nosníku. Tyto hodnoty lze jednoduše vložit zpět do Matlabu a vyjádřit tak indukované napětí podle parametrů zvolené cívky. Poté již velmi zjednodušeným modelem v Simulinku získáváme výsledný proud a výkon tohoto modelu. Z generovaného indukovaného napětí pak lze ověřit parametr převodu elektrické a mechanické energie G.

Jako třetí způsob modelace lze využít inverzní úlohu v programu FEMM, kde navrhne nosník nezatížený vibracemi avšak v magnetickém poli cívky s proudem z předešlých simulací. Materiál magnetostrikčního nosníku by pak měl generovat ve svém okolí stejnou magnetickou indukci jako v předešlých modelech.

V posledním případě lze v programu FEMM namodelovat nosník s pomocnými permanentními magnety či jinými slabě magnetickými materiály pro možné zvýšení výkonu. V následujících kapitolách je popsáno, jak jednotlivé modely vznikaly.

¹ MSM – Magnetostrikční materiál

² FEMM - Finite element method magnetics

³ MKP – Metoda konečných prvků

Výsledky získaných výkonů ze simulovaných soustav navržených v této práci budou zhodnoceny nejen vůči sobě, ale i vůči dalším způsobům získávání elektrické energie za pomoci vytvořených modelů piezoelektrického a elektromagnetického generátoru. Porovnávanou veličinou bude jejich výkon při co nejpodobnější vlastní frekvenci a podobných rozměrových a materiálových parametrech.

3. Energy harvesting

Pojem energy harvesting zahrnuje přeměnu jakékoliv energie na využitelnou energii elektrickou. Nejčastěji pomocí záření, přenosu tepla a mechanické energie. Tato práce pojednává výhradně o energii získávané z vibrací, tedy přeměnu mechanické energie na magnetickou a nakonec na využitelnou elektrickou energii. Tuto energii lze získávat i z lidského těla. Jak již bylo zmíněno v úvodu, výhoda energy harvestingingu spočívá ve využitelnosti pro bezdrátové senzory. V dnešní době tyto senzory potřebují pro svůj provoz stále méně energie. Energy harvestry mohou, ale nemusí být opatřeny přídatnou baterií pro uchovávání energie. Přídatná baterie umožňuje získanou energii v případě soběstačnosti zařízení uchovávat a v případě nedostatku energie z harvestru napájet zařízení. Generátor plně závislý na okolních vibracích (tedy bez baterie) nazýváme autonomním systémem.

Energii z vibrací působících na nosník lze získávat několika metodami za pomoci různých materiálů. Pro porovnání vlastností generátorů byly zvoleny principy magnetostrikce, kterou se velká část této práce zabývá, piezoelektrického, elektromagnetického a elektrostatického jevu. Elektrostatický jev využívá kondenzátoru s polarizovaným dielektrikem. Elektromagnetický jev pracuje na principu elektromagnetické indukce. Piezoelektrický jev je schopnost krystalů materiálu generovat elektrické napětí při deformaci materiálu. Pokud skloubíme vlastnosti elektromagnetického a piezoelektrického jevu, dostáváme jev magnetostrikce, tedy že při deformování materiálu vzniká v jeho okolí elektromagnetická indukce. Jednoduché srovnání z článku [4] popisuje tabulka 4.1.

	Výhody	Nevýhody
Elektrostatický jev	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nepotřebuje chytré materiály ○ Pro napětí 2-10 V ○ Kompatibilní s MEMS 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Potřebuje externí zdroj napětí ○ Má mechanické omezení ○ Kapacita
Elektromagnetický jev	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nepotřebuje chytré materiály ○ Nepotřebuje zdroj energie 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Rozměry – cívka a magnet ○ Špatná kompatibilita s MEMS⁴ ○ Maximální napětí 0.1 V
Piezoelektrický jev	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nepotřebuje zdroj energie ○ Pro napětí 2-10V ○ Kompatibilní s MEMS ○ Jednoduchá konstrukce 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Polarizace ○ Křehká vrstva piezomateriálu ○ Nízký coupling koeficient⁵ ○ Ztráty energie ○ Vysoká výstupní impedance
Magnetostrikční jev	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vysoký coupling koeficient > 0.9 ○ Bez polarizačních problémů ○ Vysoká flexibilita ○ Vhodné i pro vysoké frekvence 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Nelineární efekt ○ Cívka ○ Možná potřeba přídatného magnetu ○ Špatná kompatibilita s MEMS

Tabulka 3.1: Srovnání principů získávání energie z vibrací [4]

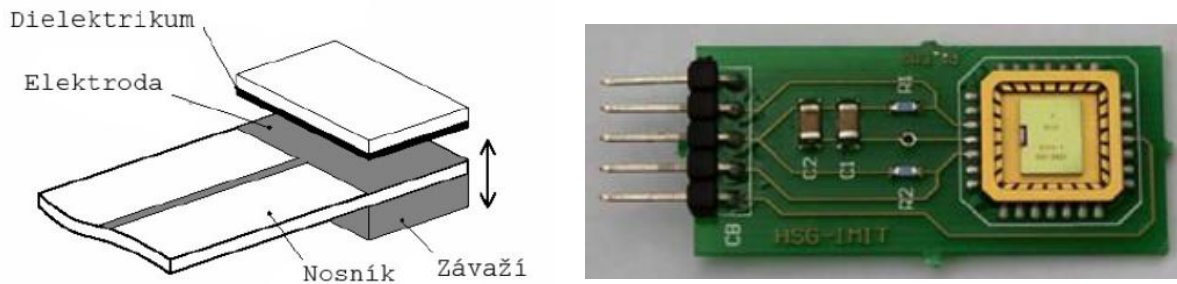
⁴ MEMS - mikro-elektro-mechanický systém

⁵ Coupling koeficient je bezrozměrná veličina určující poměr celkové magneto-elastické energie k průměru elastické a magnetické energie (rovnice 4.9)

3.1. Elektrostatické generátory

Konstrukci tvoří dvě elektrody oddělené dialektikem (vzduch, vakuum, izolant). Vzájemný relativní pohyb elektrod pomocí vibrací vytváří elektrickou energii. Konstrukci generátoru a jeho umístění na desce znázorňuje obrázek 3.1 z článků [5] a [6].

Problém však vyjadřuje skutečnost, že pro prvotní přeměnu energie je nutný externí zdroj energie pro nabití generátoru. Elektrostatické generátory se nejčastěji umísťují do MEMS zařízení. Taková zařízení popisují články [7], [6], [8], ovšem ve všech těchto případech je výsledný výkon ze soustav v řádu desítek μW . Z těchto dvou negativ bylo vyvozeno, že pro porovnání s magnetostrikčním generátorem jsou tyto výsledky nedostatečné.



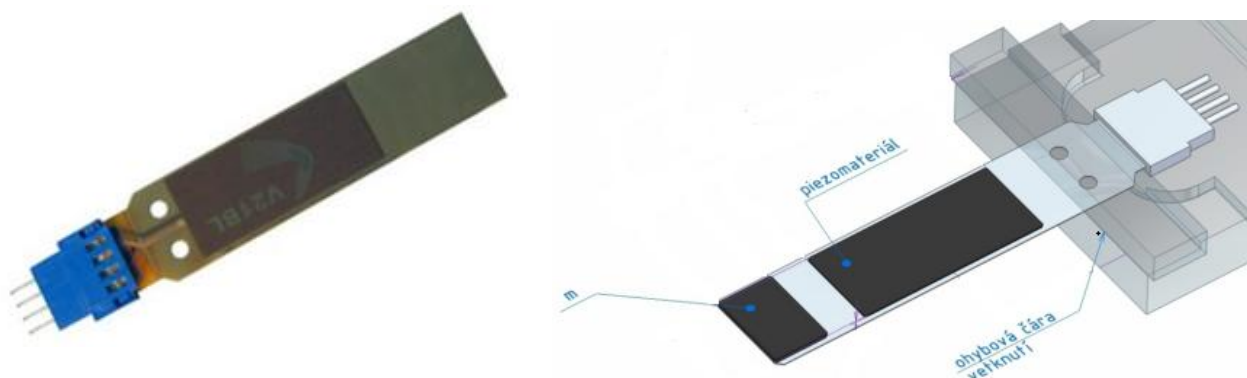
Obrázek 3.1: a) Konstrukce generátoru [5], b) Uložení MEMS [6]

3.2. Piezoelektrický generátor

Princip piezoelektrického generátoru popisuje práce [9]. Při působení tlaku se jednotlivé stejně orientované náboje shlukují a na stranách materiálu vzniká různý potenciál. Ten je pomocí elektrod po stranách převáděn do obvodu.

Základem nosníku je vždy vrstva z neaktivního materiálu se zátěží na konci. Bimorfnní konstrukce zobrazená na obrázku obsahuje dvě vrstvy piezomateriálu, z každé strany jednu. Uniformní konstrukci chybí vrchní či spodní vrstva a pokud počet vrstev znásobíme, vzniká polymorfnní konstrukce.

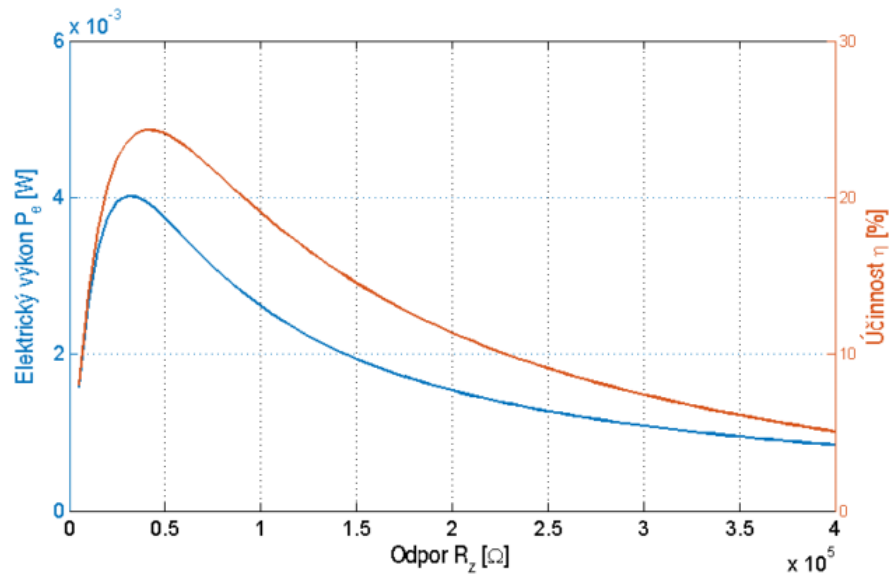
Komerčně využívaným generátorem je nosník od firmy MIDE [10], jehož parametry ověřuje práce [11]. Jedná se o bimorfnní nosník s elektrodami z každé strany. Na konec nosníku lze přidávat zvolenou zátěž m . Obrázek 3.2 popisuje MIDE V21BL a jeho schematickou konstrukci z článků [10] a [11].



Obrázek 3.2: a) Piezoelektrický generátor MIDE V21BL [10], b) Konstrukce generátoru [11]

Při simulaci generátoru s čistě harmonickým signálem při buzení amplitudou 1 g, je velikost generovaného výkonu zhruba 4 mW a jeho účinnost okolo 20 % [11], která odpovídá katalogovým hodnotám. V článku [12] dosahují účinnosti až k 40 %. Nutno podotknout, že v reálném prostředí takto dokonalých výsledků získat nelze, nejen díky neperiodicitě většiny vibrací, ale i faktu, že zatížení 1g je neadekvátní (reálné zdroje vibrací budí soustavu v hodnotách okolo 0,1-0,3 g) a pro takto křehký nosník destruktivní.

Obrázek 3.3 popisuje závislost velikosti elektrického výkonu P_e a účinnosti η na velikosti zatěžovacího odporu z článku [11]. Z grafu je patrné, že maximum hodnot odpovídá přibližně 20 000 Ω na zátěži. Tento generátor je vhodné porovnávat s modelem vytvořeným pro magnetostrikční generátor.

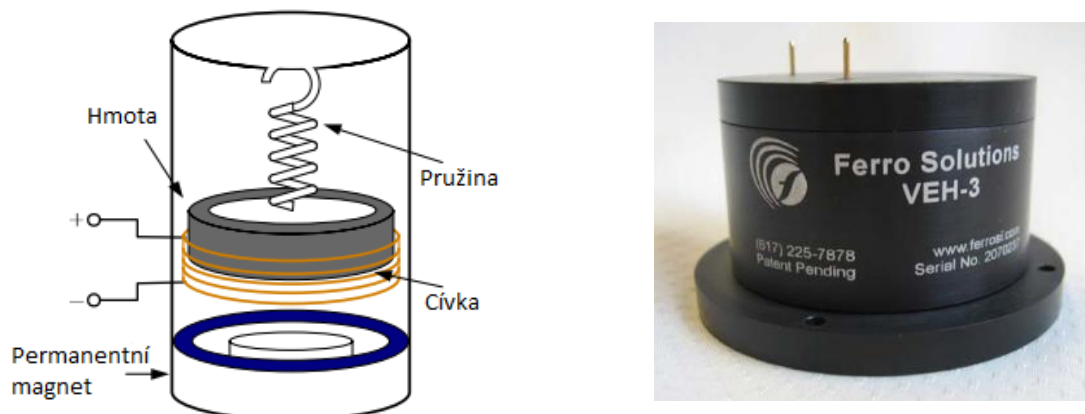


Obrázek 3.3: Porovnání výkonu P a účinnosti η v závislosti na velikosti odporu zátěže R_z [11]

3.3. Elektromagnetický generátor

Elektromagnetický jev je založen na Faradayově zákoně. Základem vždy musí být magnet pohybující se v magnetickém poli cívky či obráceně.

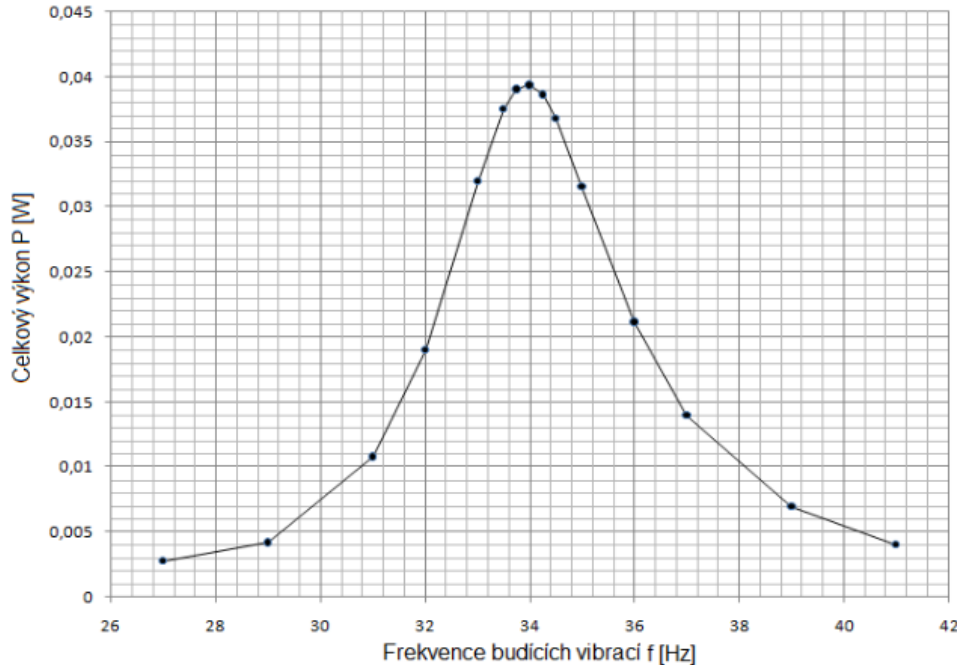
Konstrukci typického elektromagnetického harvestru, popsaného v článku [13], a reálný generátor firmy Ferro Solution zobrazuje obrázek 3.4. Základem je permanentní magnet a vodivá hmota na pružině kmitající podle vibrací v prostoru cívky.



Obrázek 3.4: a) Konstrukce generátoru [13], b) Elektromagnetický harvester firmy Ferro Solution [13]

Výkony elektromagnetických generátorů dosahují hodnot v řádech mW, jak udává práce [14] srovnávající i jednotlivé výrobce a univerzity.

Obrázek 3.5 dle práce [15] zobrazuje maximální výkon simulovaného elektromagnetického generátoru skoro 40 mW při 0,3 g a 34 Hz. Pro buzení pouze 0,1 g by maximální výkon dosahoval maximálně 5 mW. Proto je tento model také vhodný pro porovnání s magnetostrikčním generátorem.

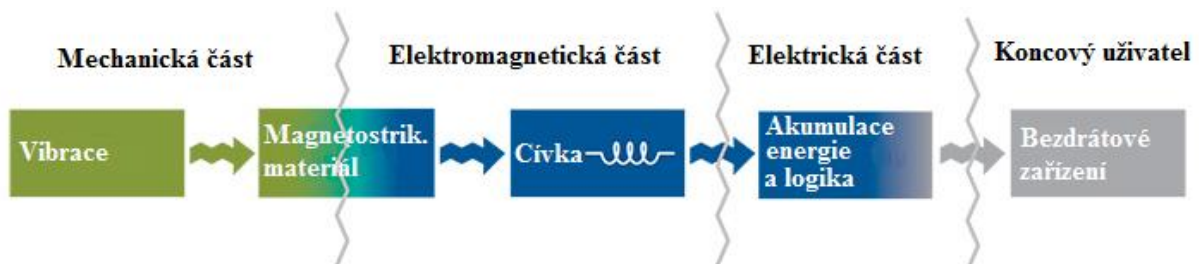


Obrázek 3.5: Závislost výkonu na budících frekvencích z článku [15]

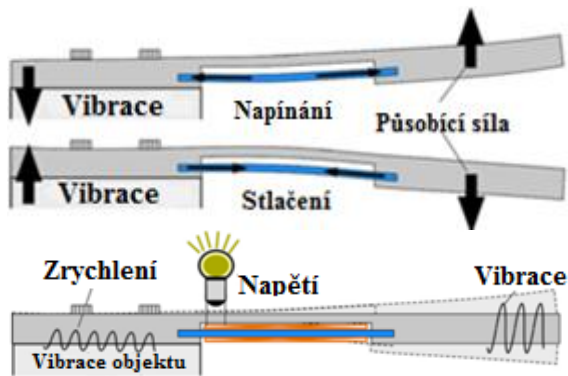
3.4. Magnetostrikční generátor

Problematikou magnetostrikčních generátorů či aktuátorů se zabývá celá řada odborných článků. Obecné vysvětlení magnetostrikce a magnetostrikčních materiálů popisuje kapitola 4. Dvě nejrozšířenější možnosti získávání energie z magnetostrikčních materiálů jsou pomocí stlačování materiálu a ohybu z vibrací. Tato diplomová práce popisuje druhou z metod, tedy působení vibrací. Jak zjednodušený magnetostrikční energy harvester vypadá, popisuje obrázek 3.6 dle [16]. Šipky zobrazují tok energie.

Základní princip takto získané energie [17] vyjadřuje obrázek 3.7, kde malý plátek magnetostrikčního materiálu zakomponovaný do většího nosníku a omotaný cívkou napojenou na spotřebič vyrábí elektrickou energii. Jak taková soustava vypadá ve skutečnosti, zobrazuje obrázek 3.8 z článku [18]. Zde MSM leží přímo na nosníku. Z obrázku je patrné, že notnou část masy generátoru tvoří právě cívka.



Obrázek 3.6: Schéma magnetostrikčního generátoru [16]



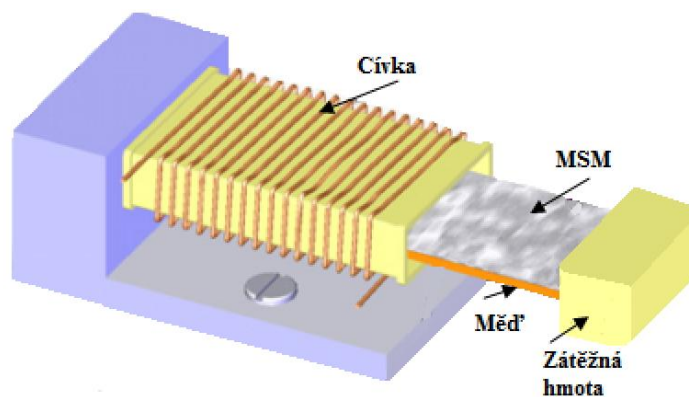
Obrázek 3.7: Princip získávání elektrické energie z vibrací [17]



Obrázek 3.8: Reálný magnetostrikční vibrační generátor [18]

Ze současných studií vyplývá, že pomocí magnetostrikčního generátoru lze získávat výkony v jednotkách mW a při velkých tlakových zatíženích i více.

Konstrukce magnetostrikčního vibračního generátoru vyplývá z konstrukce piezoelektrického generátoru s tím rozdílem, že MEG⁶ je uniformní. Jedná se tedy o vetknutý nosník s cívkou namotanou přibližně do dvou třetin délky nosníku v několika řadách, vždy v bezpečné vzdálenosti od nosníku (tak, aby se cívka nedotýkala nosníku). Konstrukcí cívky se zabývá další část této práce. Nejvýznamnější vlastnosti má MSM přímo u vetknutí, což znamená, že pokud prodloužíme vrstvu MSM až na konec nosníku, je to spíše z důvodu zátěže nosníku a jeho lineárního kmitání, než z magnetostrikčních vlastností. Na konec nosníku musí být přidáno zatížení adekvátní rozměrům nosníku a vstupním vibracím. Obrázek 3.9 z článku [19] zobrazuje, jak by modelovaný generátor vypadal ve skutečnosti.



Obrázek 3.9: Konstrukce magnetostrikčního nosníku [19]

⁶ MEG - magnetostrikční elektrický generátor

4. Magnetostrikce

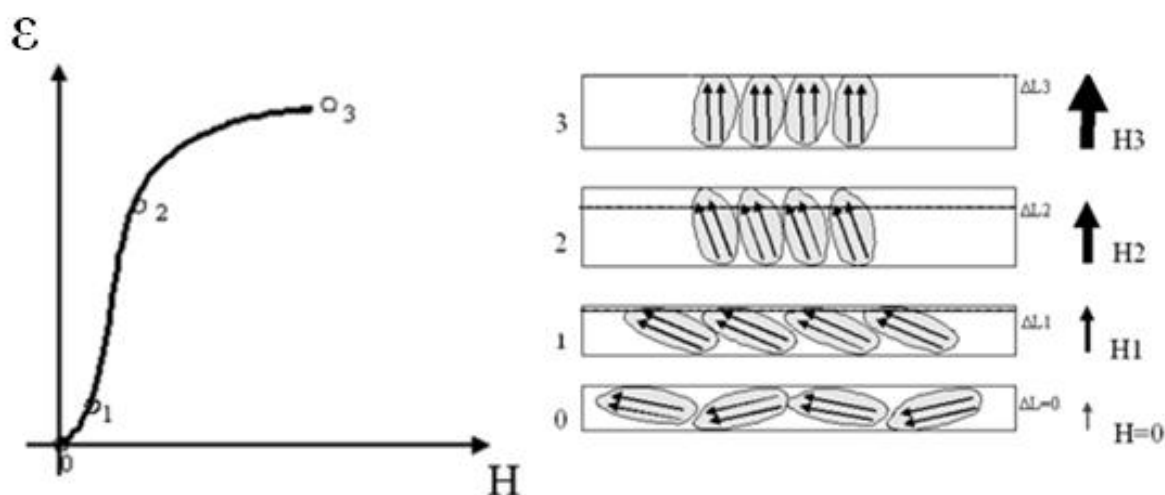
Jako první objevil magnetostrikci James P. Joule v roce 1842. Termín magnetostrikce popsal jako jakoukoliv změnu rozměrů magnetického materiálu způsobenou změnou okolního magnetického pole. Na rozdíl od klasického piezomateriálu nemění magnetostrikční materiál svoje vlastnosti v čase. Po roce 1960 bylo tohoto efektu hojně využíváno pro zdroje energie z vibrací pro sonary, mechanické aktuátory či senzory. Dnes je využíván především v oblasti nazývané energy harvesting k získání elektrické energie pro napájení elektronických zařízení, systémy MEMS, robotiku a další. Magnetostrikce se nejvíce používá při získávání energie z vibrací, což je založeno na interakci mezi magnetickým a elektrickým polem tzv. elasticitě magnetostrikčního materiálu.

Základem pro MEG je opačný efekt k Joulovu, tedy Villary efekt objevený v roce 1865, který říká, že magnetizace podél směru působení mechanického napětí materiálu závisí na hodnotě magnetostrikce. Magnetický tok v materiálu vyvolává elektromagnetické pole v cívice okolo materiálu. Tento účinek je založen na skutečnosti, že při mechanickém namáhání vzorku dojde ke změně hustoty magnetického toku, který proudí skrze vzorek v důsledku vytvoření magnetického pole. Změna hustoty toku může být detekována snímací cívkou a je přímo úměrná úrovni aplikovaného mechanického napětí.

Magnetostrikční generátory jsou velmi výhodné pro nízké frekvence a pro použití v podvodních sonarech. [6,8].

4.1. Popis magnetostrikčního jevu

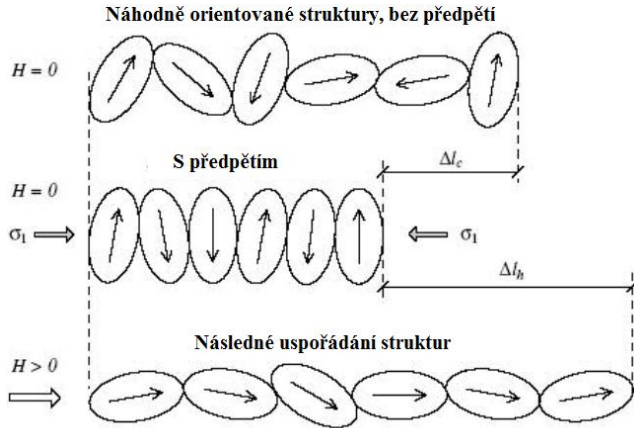
Jev magnetostrikce obsahuje dva po sobě jdoucí procesy [21]. V prvním z nich se materiál přesouvá podle aktuálního magnetického pole a v druhém kroku jde již jen o správnou orientaci či přetočení, opět dle aktuálního směru magnetického pole H . Magnetostrikční chování změny délky materiálu (neboli přetvoření ε) v závislosti na magnetickém poli zobrazuje obrázek 4.1 z článku [22].



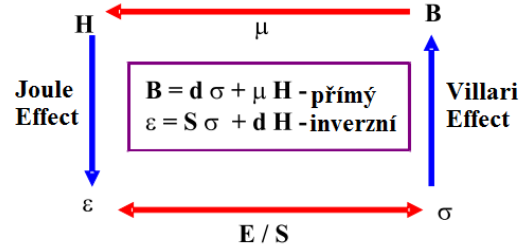
Obrázek 4.1: Magnetostrikce způsobující přesun a přeorientování materiálu [22]

Pokud jsou krystaly materiálu na začátku ve stlačeném stavu, jak ukazuje obrázek 4.2 z článku [23], efekt magnetostrikce je největší. Při použití vetknutého nosníku se zátěží na konci vlastní tíha tohoto nosníku způsobuje zmíněné předpětí [23].

Jak již bylo řečeno, magnetostrikční jev nastává, pokud krystaly mění tvar materiálu v magnetickém poli. Magnetostrikce je v podstatě přeměna mezi energiemi mechanickými a magnetickými. Základní fyzikální efekty vztahující se k tomuto jevu zobrazuje obrázek 4.3 z článku [21], který popisuje dva základní principy magnetostrikce, tedy rovnice pro Villary a Jouleho efekt.



Obrázek 4.2: Magnetostrikční materiál s a bez předpětí [23]



Obrázek 4.3: Princip magnetostrikce [21]

Obrázek 4.3 a rovnice 4.1 a 4.2 představují základní vlastnosti magnetostrikčních materiálů, které lze vyjádřit pomocí dvou konstitutivních vztahů [20]. První znázorňuje Villaryho a druhý Jouleho efekt.

$$B = d_{33}^* \sigma + \mu^\sigma H \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = s^H \sigma + d_{33} H \quad (4.2)$$

Kde B představuje magnetickou indukci, H intenzitu magnetického pole, ε přetvoření, σ mechanické napětí, s^H elastickou poddajnost jako převrácenou hodnotu Youngova modelu E^H při konstantním H , μ^σ magnetickou permeabilitu při konstantním σ , d_{33} (konstantní σ) a d_{33}^* (konstantní H) magnetostrikční koeficienty. Rovnice $\varepsilon = s^H \sigma$ reprezentuje Hookův zákon a $B = \mu^\sigma H$ magnetickou indukci. Zbylé členy $d_{33}^* \sigma$ a $d_{33} H$ poté reprezentují samotou elektromechanickou přeměnu energií.

$$s^H = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{E^H} \quad (4.3)$$

$$d_{33} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \quad (4.4)$$

$$d_{33}^* = \frac{\partial B}{\partial \sigma} \quad (4.5)$$

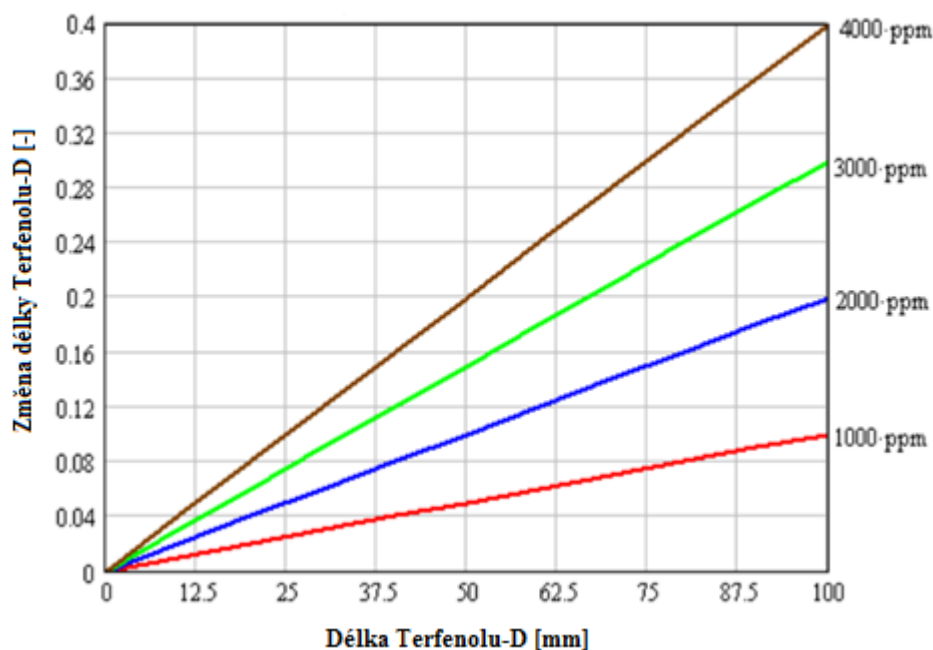
$$\mu^\sigma = \frac{\partial B}{\partial H} \quad (4.6)$$

4.2. Magnetostrikční materiál Terfenol-D a jeho vlastnosti

Vývoj magnetostrikčních materiálů započal v roce 1960 A.E. Clark. Jako nejlepší alternativa při použití dostupných materiálů se jevila slitina terbidia *Tb*, železa *Fe* a dysprosiumu *Db*. Sloučením těchto názvů spolu se společností vyvíjející tento materiál (NOL – Naval Ordnance Laboratory) vznikl v roce 1970 název Terfenol-D. Tento materiál vykazuje dle článku [22] nejlepší hodnoty v poměru změny délky materiálu i při nízkých hodnotách magnetického pole. Právě tento efekt lze u jednotlivých materiálů porovnávat díky jednotkám ppm⁷, popisující materiálové schopnosti změny délky. Takové vlastnosti má materiál jen pouze v případě, že je jeho teplota pod hodnotou Curieho teploty. Magnetostrikční vlastnosti u různých materiálů popisuje tabulka 4.1 a speciálně pak pro Terfenol-D obrázek 4.4 z článků [21] a [22].

Materiál	Magnetostrikce (ppm)	Curieho teplota (K)
Fe	14	633
Ni	33	1043
Co	50	350
DyFe ₂	650	635
TbFe ₂	2630	703
Tb _{0,3} Dy _{0,7} Fe _{1,92} ⁸	2400	653

Tabulka 4.1: Magnetostrikční schopnost materiálů [21]



Obrázek 4.4: Závislost délky Terfenolu-D na jeho protažení [22]

Magnetostrikční jev pro Terfenol-D popisujeme již zmíněnými konstitučními vztahy (rovnice 4.1 a 4.2). Následně lze vztahy ještě podrobněji rozepsat do rovnic 4.7 a 4.8, které je možno využít k trojrozměrnému modelování nosníku z Terfenolu-D pomocí MKP. Popsané konstanty a materiálové parametry v různých směrech materiálu použité v [24] popisuje

⁷ppm (parts per milion) výraz pro jednu miliontinu celku (1% je 10 000ppm)

⁸Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92} – Terfenol-D

tabulka 4.2. Dolní indexy u veličin označují prostorové osy, které daná konstanta propojuje. Pokud tyto koeficienty označíme například ij pak $ij=ji$. V rozepsaných rovnicích tedy platí, že $s^H_{12}=s^H_{21}$ a tak dále. Horní konstanta například u s^H (jak již bylo řečeno výše) popisuje, že hodnota zadaného parametru platí pro konstantní hodnotu H .

Elastická poddajnost ($\times 10^{-12} m^2/N$)					Magnetostrikční koeficienty ($\times 10^{-9} m/A$)			Permeabilita ($\times 10^{-6} H/m$)	
s^H_{11}	s^H_{33}	s^H_{44}	s^H_{12}	s^H_{13}	d_{31}	d_{33}	d_{15}	μ_{11}	μ_{33}
17.9	17.9	26.3	-5.88	-5.88	-5.3	11	28	6.29	6.29

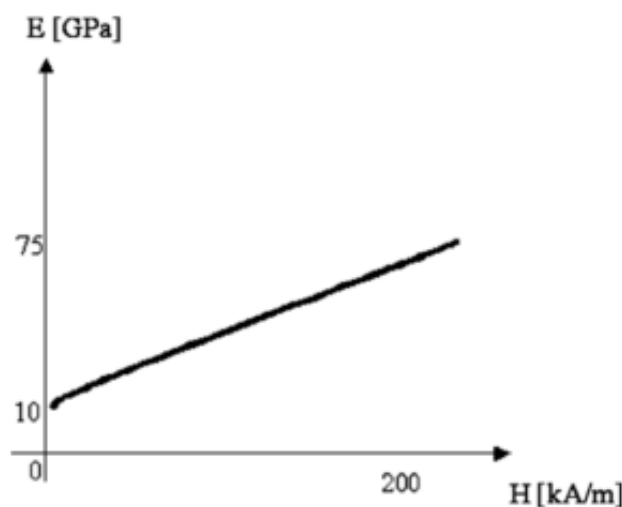
Tabulka 4.2: Materiálové vlastnosti Terfenolu-D [24]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s^H_{11} & s^H_{12} & s^H_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s^H_{12} & s^H_{11} & s^H_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s^H_{13} & s^H_{13} & s^H_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s^H_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s^H_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s^H_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{Bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

4.2.1. Youngův modul a coupling faktor

U většiny parametrů magnetostrikčních materiálů se setkáváme s nelinearitou, není tomu jinak ani u Youngova modulu. Obrázek 4.5 zobrazuje zvětšující se Youngův modul s rostoucím magnetickým polem z článku [8]. Pro určité případy, kde pracujeme v malém rozmezí magnetického pole, lze však tento parametr považovat za konstantní.



Obrázek 4.5: Youngův modul versus magnetické pole [8]

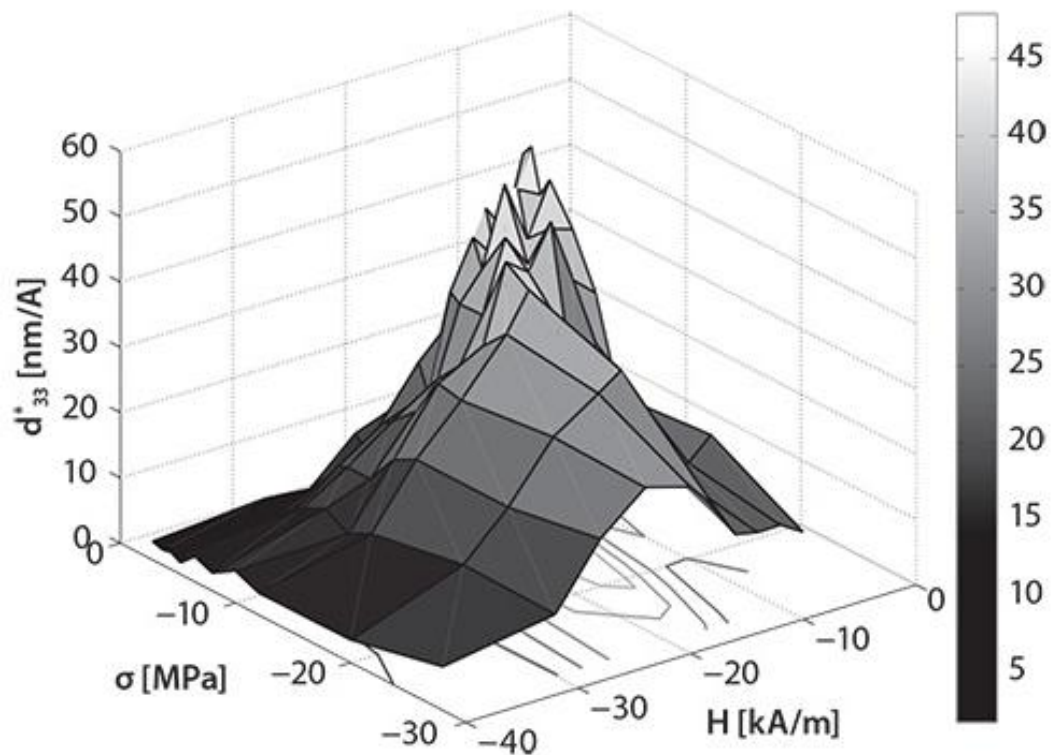
Důležitým magnetostrikčním parametrem je dle [25] coupling koeficient, matematicky vyjádřen jako poměr celkové magneto-elastické energie k průměru elastické a magnetické energie. Coupling koeficient považujeme za účinnost přeměny těchto energií. Pokud je tento faktor vztahován k vetknutému nosníku, počítá se jen v jednom směru dle rovnice 4.9. Nejvýhodnější je mít tento koeficient co největší, až 0,9 tedy účinnost 90 %. Tím pádem musí být vysoký i magnetostrikční parametr d_{33} . Oba tyto parametry závisí jak na napětí, tak i na účincích magnetického pole.

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\mu_{33}^{\sigma} s_{33}^H} \quad (4.9)$$

4.2.2. Magnetostrikční koeficienty d_{33} , d_{33}^*

Magnetostrikční koeficienty d_{33} , d_{33}^* uvádí výrobce. Oba parametry jsou si numericky velmi blízké, avšak totožné nejsou, dle rovnic 4.4 a 4.5. Pokud budeme uvažovat parametr d_{33} za konstantního napětí, lze využít udávanou hodnotu například v tabulce 4.2. Hodnota d_{33}^* je rychlost změny magnetické indukce s ohledem na napětí při konstantním magnetickém poli.

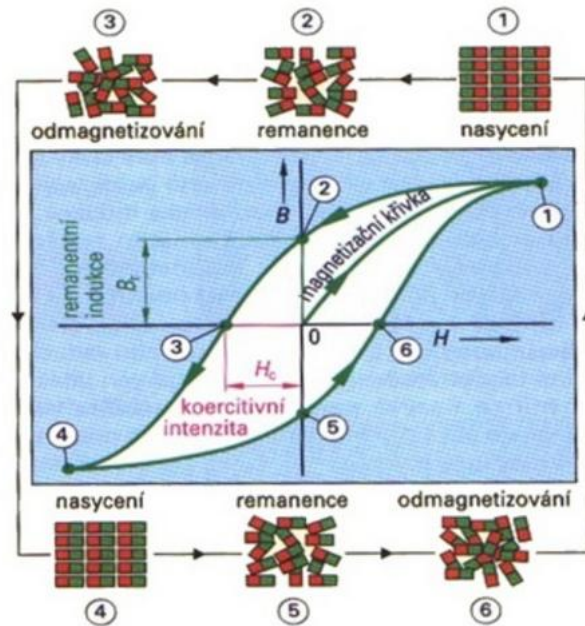
Jelikož tento parametr potřebujeme k výpočtu koercivity, jak je uvedeno v dalším textu, je lepší si tento parametr numericky vypočítat. Jak tento parametr ovlivňuje dle [26] magnetické pole ukazují obrázky 4.6.



Obrázek 4.6: Vliv magnetostrikční koeficient d_{33}^* na magnetické pole H [26]

4.2.3. B-H křivky, permeabilita, remanence a koercivita

B-H křivka (hysterezní smyčka [27]) je závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H ve feromagnetické látce. Pokud je tato křivka uzavřená, látka prošla procesem zmagnetování i odsmagnetování. Hysterezní smyčka obecně popisuje vliv vnějšího magnetického pole na magnetické vlastnosti materiálu nacházejícího se v takovémto poli. Udává informaci o vlastnostech materiálu. Nezávisí jen na druhu použitého materiálu, ale i na způsobu výroby, provozní teplotě a dalších. Obecnou hysterezní smyčku z článku [27] zobrazuje obrázek 4.7.

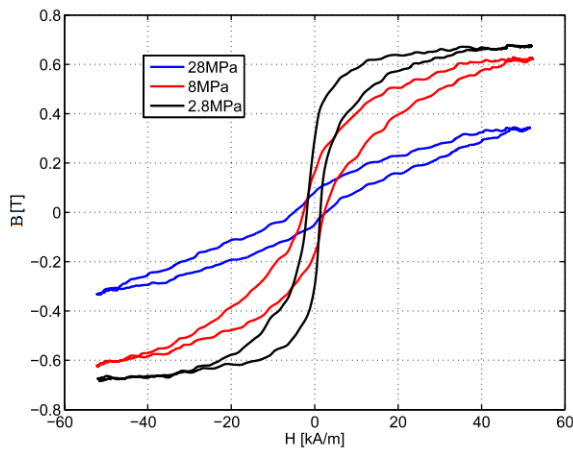


Obrázek 4.7: Obecná hysterezní smyčka [27]

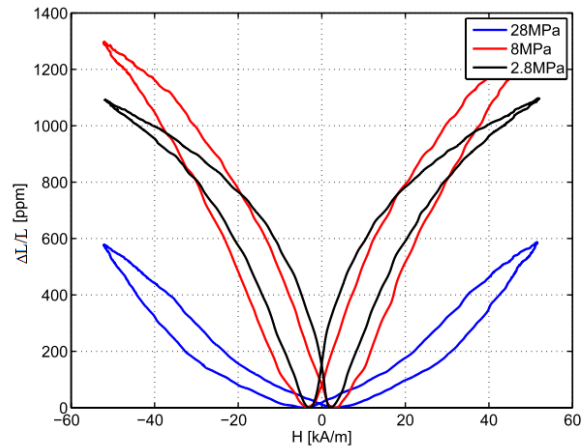
Ocitne-li se materiál v magnetickém poli, začne se přesouvat do bodu nasycení po magnetizační křivce (1). Po odstranění magnetického pole zůstane materiál částečně zmagnetizovaný a vzniká tzv. remanentní zbytkový magnetismus B_r (2). Je to hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole. Pokud začneme na látku působit opačným magnetickým polem, remanence zaniká a látku demagnetizujeme. K odstranění remanence je vynaložena síla tzv. koercitivní intenzita H_c (3), která je mírou odolnosti magnetu proti odsmagnetování (vnějším polem i vlastní demagnetizací). Ta je důležitým parametrem při modelování materiálu v programu FEMM. Při pokračování se dostáváme až na další bod nasycení s opačným znaménkem polarity (4). Poté nastává opět demagnetizace a hysterezní smyčka se uzavírá. Pro magneticky měkké látky jako je Terfenol-D je hysterezní smyčka úzká a její obsah, odpovídající výkonovým ztrátám, je malý.

Relativní permeabilita μ je další z parametrů závislých na počátečním předpětí a frekvenci zatěžování. Relativní permeabilita značí míru magnetických vlastností materiálu B/H . Obecně magnety mají vysokou permeabilitu. Pro Terfenol-D se tato hodnota pohybuje mezi 6-12 při konstantním napětí [28]. Při použití většího předpětí se relativní permeabilita Terfenolu-D zmenšuje z důvodu, kdy pro pohyb částic materiálu musí být vynaloženo větší síly a zmenšuje se poměr B/H (obrázek 4.8), kde je zřejmé i zvětšování koercivity s rostoucím napětím. Další možností jak graficky vyjádřit hysterezní křivky pro Terfenol-D je v závislosti přetvoření na magnetickém poli (obrázek 4.9). Tyto výsledky byly čerpány z práce [29].

Jak vypadají hysterezní křivky komerčně vyráběného Terfenolu-D firmou ETREMA a základní informace jsou uvedeny v příloze A.



Obrázek 4.8: B-H křivka Terfenol-D [29]



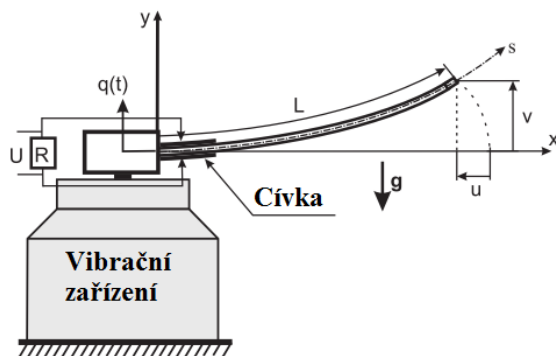
Obrázek 4.9: Hysterezní křivka Terfenol-D v závislosti přetvoření na magnetickém poli [29]

4.3. Realizované magnetostrikční generátory

4.3.1. Generátor Lublin

Realizovaný magnetostrikční generátor polské univerzity v Lublinu dle článku [18] z roku 2016 popisuje obrázek 4.10 a obrázek 4.11 ukazuje, jak reálné zapojení generátoru vypadá. V práci byly testovány různé módy ohybu pro tři různé materiály, a to Terfenol-D, Galfenol a Metglass. Generátor byl umístěn na zdroji vibrací a testován pro dvě různá vstupní buzení o hodnotách 1 a 2 g, jak popisuje obrázek 4.12. Důvodem pro využití takto velkých vstupních vibrací je zejména velká tuhost materiálu, jelikož jeho plocha průřezu byla 48 mm^2 . Nosník byl umístěn v objemné cívce o 23 000 závitů s indukčností 832 mH.

Obrázek 4.13 popisuje výsledný maximální výkon RMS⁹ dosahující hodnoty 0,8 mW v oblasti frekvence okolo 110 Hz a odporu zátěže 100 k Ω .

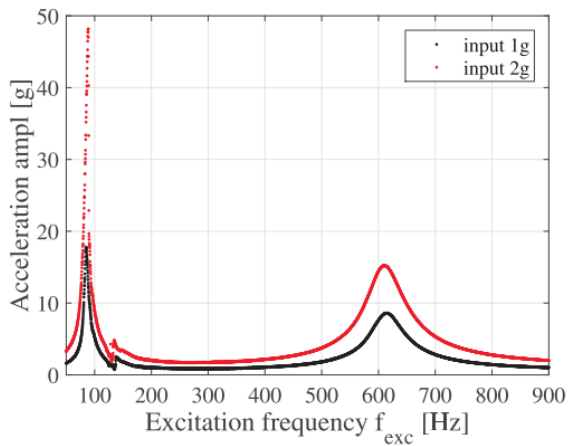


Obrázek 4.10: Schéma realizovaného generátoru [18]

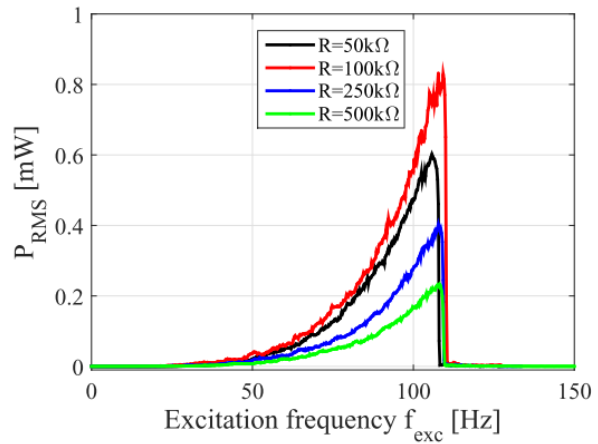


Obrázek 4.11: Reálný magnetostrikční generátor a jeho zapojení [18]

⁹ RMS – Root mean square



Obrázek 4.12: Amplitudová odezva na zrychlení [18]



Obrázek 4.13: Efektivní hodnota výkonu [18]

4.3.2. Generátor North Carolina

Obrázek 4.14 zobrazuje další reálně testovaný generátor o podstatně menších rozměrech, ovšem stále s velkou tuhostí podle článku [4] z roku 2008 z USA. Práce se opět zabývá různými módy ohybu materiálu nosníku a jako magnetostrikční materiál využívá Metglass. Detailnější pohled je zde věnován i elektronice tvořené kvadruprelem a ultrakapacitorem.

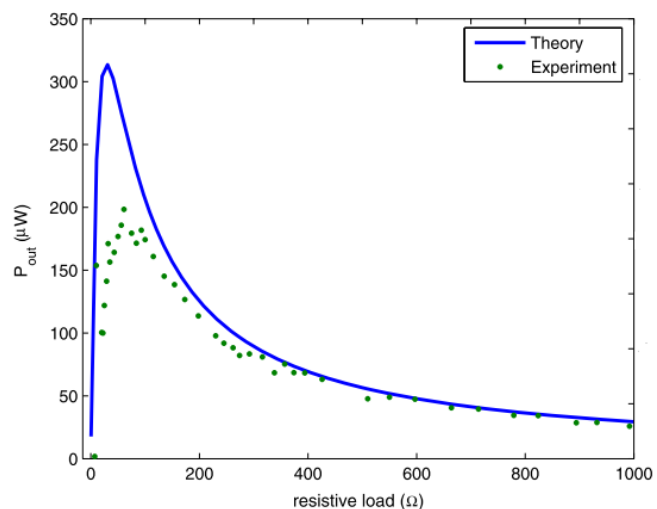
Soustava byla testována s amplitudou 1 g a její vlastní frekvence byla 58 Hz při odporu zátěže přibližně 80 Ω .

Obrázek 4.15 ukazuje teoretická a pomocí experimentu naměřená data pro výstupní výkon, která při reálním měření dosahovala 0,2 mW.

Při použití správně navržené elektroniky a především ultrakapacitoru lze tento výkon zdvojnásobit, ovšem za podmínky větší vstupující frekvence, a to až hodnoty okolo 1 kHz.



Obrázek 4.14: Reálný magnetostrikční generátor a jeho zapojení [4]

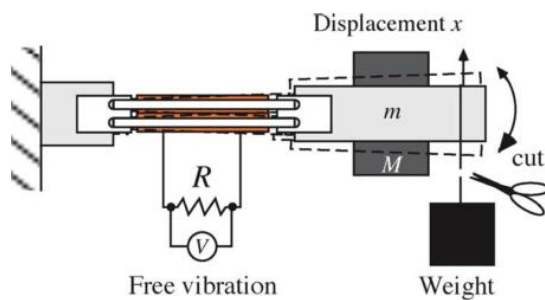


Obrázek 4.15: Výsledný výkon generátoru [4]

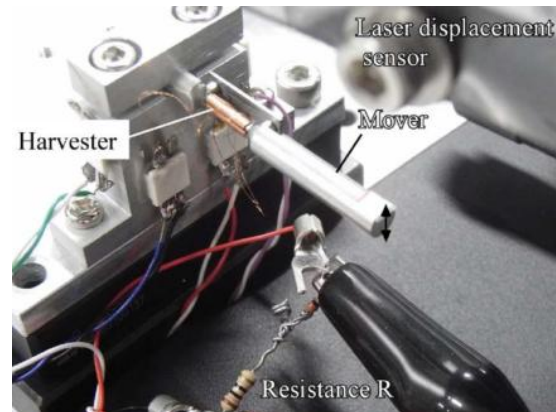
4.3.3. Generátor Kanazawa

Další reálně sestavený generátor v roce 2011 byl konstruován na univerzitě v Japonsku dle článku [30]. Obrázek 4.16 představuje geometrii generátoru odlišnou od předešlých dvou ukázek. Obrázek 4.17 ukazuje reálné zapojení tohoto typu generátoru. Jako magnetostrikční materiál zde byl použit Galfenol jehož dva plátky byly paralelně upevněny do konstrukce nosníku. V publikaci je uveden maximální výkon 2 mW pro 395 Hz, ovšem systém byl buzen pouze skokem pomocí přídavné zátěže na konci nosníku, která byla v čase nula odstříhnutá.

Z podstaty své zajímavé konstrukce by takovýto generátor mohl být předmětem dalších studií a testování, vzhledem k různým možnostem uložení magnetostrikčního materiálu.



Obrázek 4.16: Schéma realizovaného generátoru [30]



Obrázek 4.17: Reálný magnetostrikční generátor a jeho zapojení [30]

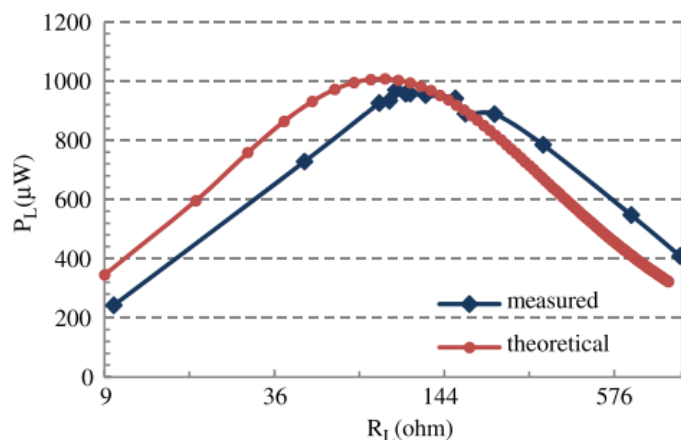
4.3.4. Generátor North California a Shanghai

O posledním příkladu zrealizovaného magnetostrikčního generátoru pojednává článek [19] vědců z USA a Číny. Obdobně, jako některé předchozí články se i tento zabývá použitou elektronikou s využitím ultrakapacitoru i kvadrupleru. Teoretické výsledky zkoumá z pohledů více módů ohybu a je zde zmíněna i možnost vrstvení tenkých plátek materiálu, kdy od určitého počtu zůstává výsledné napětí konstantní, jelikož vzrůstá mechanické tlumení a vlastní frekvence.

Obrázek 4.18 znázorňuje velmi jednoduchý generátor a obrázek 4.19 porovnání výkonů za použití ultrakapacitoru při měření i simulaci. Generátor byl opět buzen amplitudou překračující 1 g, avšak hodnoty výsledného výkonu dosahovali maximálně 1 mW.



Obrázek 4.18: Reálný generátor [19]



Obrázek 4.19: Výsledný výkon za použití ultrakapacitoru [19]

5. Model magnetostrikčního generátoru

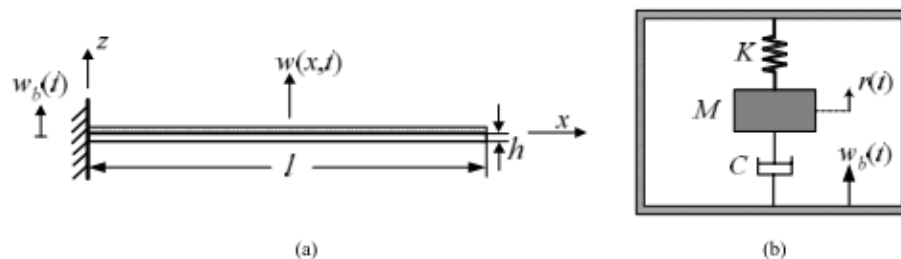
Magnetostrikční generátor byl modelován třemi způsoby s různými obměnami. První model A vycházející ze stavového modelu byl tvořen pouze v Simulinku ve dvou variantách. V první byla soustava modelována pouze pomocí vypočtených parametrů a v druhé byly použity bloky z Simscape Electronics pro přesnější modelování elektroniky.

Druhý model B je inverzní model ve FEMM, kde se do generátoru cívky pouští proud zjištěný z prvního modelu v Simulinku. Nezátžený nosník by pak měl v magnetostrikčním materiálu generovat magnetickou indukci opět shodnou s prvním modelem v Simulinku. Tato varianta může sloužit pro ověření výsledků prvního modelu.

Třetí varianta model C získává data z programu FEMM, kde se namodeluje zatížený nosník, který okolo sebe generuje magnetickou indukci. Ta je poté přenášena do programu Simulink a s použitím parametrů elektroniky určuje výsledný výkon generovaný v prostoru cívky. Tyto hodnoty pak lze porovnávat s prvním modelem.

5.1. Stavový model generátoru

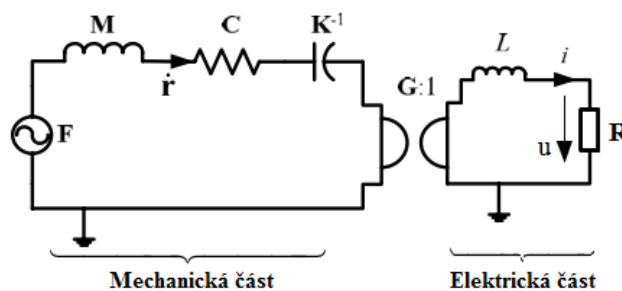
Pro simulaci vetknutého nosníku je nutné popsat jeho geometrii a mechanické vlastnosti. Samotný nosník se skládá z měděného základu a vrstvy Terfenolu-D jehož mechanickým ekvivalentem je soustava o hmotnosti M s tlumičem C a pružinou K , jak popisuje obrázek 5.1 z článku [4].



Obrázek 5.1: a) Geometrie vetknutého nosníku [4], b) Ekvivalentní mechanická soustava [4]

Takto sestavenou ekvivalentní mechanickou soustavu vyjadřuje obrázek 5.2 pomocí náhradního schématu [4]. Mechanickou část generátoru, tedy samotný kmitající nosník, popisuje levá část obvodu. Každá elektrická komponenta představuje určitou mechanickou vlastnost. Jedná se o klasický RLC článek, kde rezistor představuje tlumení nosníku C , cívka hmotnost M a kapacita tuhost K . Zdrojem obvodu je působící síla F . Ekvivalentem k napětí v tomto obvodu je rychlost nosníku \dot{r} .

Pravá strana poté charakterizuje zjednodušenou elektrickou část generátoru. Vedle indukčnosti L cívky omotané okolo nosníku musíme brát v potaz i její vnitřní odpor R_L . Zátěž R je tedy zařízení odebírající výkon generátoru. V této části i a u zobrazují skutečné proudy a napětí. Přeměnu mechanické energie na elektrickou znázorňuje převodní poměr G .



Obrázek 5.2: Ekvivalentní obvod [4]

Ze získaných náhradních schémat lze snadno vytvořit diferenciální rovnice 5.1 a 5.2 popisující obvod pomocí Kirchhoffových zákonů. V mechanické části napětí odpovídá rychlost \dot{r} . Elektrická část obsahuje zátěž R , indukčnost cívky L a navíc vnitřní odpor cívky R_L . Z těchto rovnic vychází model v Simulinku.

$$F = M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr + Gi \quad (5.1)$$

$$u = G\dot{r} - L\dot{i} - R_L i - Ri \quad (5.2)$$

Hmotnost M je celková hmotnost nosníku se zátěží a \ddot{r} jeho zrychlení. Pro tlumení nosníku C je nutné znát hodnotu poměrného útlumu b_p a vlastní frekvenci systému Ω_0 [31] dle rovnic 5.3 a 5.4. Rovnice 5.5 popisuje samotný výpočet tlumení C . Většina podobných systémů má faktor kvality Q okolo hodnoty 35, avšak pro magnetostrikční materiály bývá tato hodnota i nižší [22]. Tuhost K nosníku zatíženého hmotou na konci vyjádříme pomocí známého vztahu 5.6, kde E je celkový Youngův modul nosníku, I jeho kvadratický moment a l délka. Rovnice 5.2 obsahuje dva parametry cívky, vlastní indukčnost L a vnitřní odpor cívky R_L . Pro sílu F platí Newton zákon obsahující hmotnost M a vstupní zrychlení \ddot{y} .

$$b_p = \frac{1}{2Q} \quad (5.3)$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5.4)$$

$$C = 2b_p M \Omega_0 \quad (5.5)$$

$$K = \frac{EI}{l^3} \quad (5.6)$$

5.1.1. Výpočet napětí v materiálu σ

Pro výpočty napětí v nosníku v prostředí Simulink lze využít známé vzorce z pružnosti pevnosti [32]. Maximální napětí závisí na ohybovém momentu M_o a modulu průřezu v ohybu W_o . Ohybový moment závisí na síle působící na délku nosníku. Tato síla působí v těžišti zátěže hmoty, tedy ve vzdálenosti l_l od vetknutí. Modul průřezu v ohybu odpovídá deviačnímu momentu J_y pro obdélníkový průřez, ku polovině výšky průřezu. Po sobě jdoucí vztahy uvádí rovnice 5.7.

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{Fl_l h}{2J_y} = \frac{6Fl_l}{wh^2} \quad (5.7)$$

5.1.2. Youngův modul pružnosti E

Z kapitol 4.2.1 a 4.2.2 víme, že Youngův modul pružnosti závisí na hodnotě magnetického pole. V případě kmitajícího nosníku se velikost magnetického pole mění s rychlostí kmitů, avšak stejně jako výchylka nosníku je jeho změna malá. Youngův modul pružnosti pro Terfenol-D E_t tedy získáme z rovnice 4.3 a pro podklad z mědi z matematicko-fyzikálních tabulek. Celkový Youngův modul vyjádříme podle rovnice 5.8. Využíváme poměru Youngových modulů a tloušťek materiálů Terfenolu-D h_t a mědi h_m .

$$E = E_t \left(\frac{h_t}{(h_t + h_m)} + pom \left(1 - \frac{h_t}{(h_t + h_m)} \right) \right) \quad (5.8)$$

5.1.3. Kvadratický moment průřezu I

Obecně známí vzorec pro výpočet kvadratického momentu průřezu z rovnice 5.9 je nutno upravit dle kompozice materiálu, podobně jako u Youngova modulu. Výsledný vzorec tedy bude mít podobu rovnice 5.10. Kde I_t a I_m jsou kvadratické průřezy momentů jednotlivých materiálů, x znázorňuje vzdálenost od základny, w a h šířku a výšku materiálu a b je vzdálenost od ohybové čáry nosníku k polovině tloušťky materiálu Terfenolu-D.

$$I_{t,m} = \int_S x^2 dS = \frac{w_{t,m} h_{t,m}^3}{12} \quad (5.9)$$

$$I = I_t + h_t * w_t * b^2 + pom * I_m \quad (5.10)$$

5.1.4. Elektromechanický parametr G

Tato veličina vyjadřuje přeměnu mechanické energie na elektrickou, přesněji mechanické zrychlení \dot{r} na napětí u . Pro její zjištění budeme vycházet z rovnice pro napětí a magnetický tok ϕ 5.11. Hodnotu napětí však přetvoříme v mechanické zrychlení vynásobená převodním parametrem G . Po úpravě a vyjádření magnetického toku pomocí magnetické indukce dostáváme rovnici 5.12. Kde S_t je plocha průřezu Terfenolu-D.

$$u = \frac{d\phi}{dt} = G\dot{r} \quad (5.11)$$

$$\frac{r}{dt} G = \frac{B}{dt} S_t N \quad (5.12)$$

Ze znalostí chování kmitajícího nosníku a pružnosti pevnosti známe rovnici pro průhyb nosníku 5.13. S pomocí rovnice 4.1, 5.6 a Ampérova zákona pro hustotu magnetického pole 5.14, kde I je proud jedním závitěm cívky, lze sestavit rovnici 4.15.

$$r = \frac{F}{K} \quad (5.13)$$

$$H = \frac{NI}{l} \quad (5.14)$$

$$\frac{2\sigma l_t^2}{3E_t h_t} G = \left(d_{33}\sigma + \eta \frac{NI}{l_t} \right) S_t N \quad (5.15)$$

Po vyjádření napětí σ z rovnice 4.2 a dosazením do 5.15 dostáváme výsledný vztah 5.16, který závisí na rozměrech Terfenolu-D, magnetostrikčním koeficientu d_{33} , jeho Youngově modulu a počtu závitů cívky.

$$G = \frac{3 d_{33} S_t N E_t h_t}{2 l_t^2} \quad (5.16)$$

Tento vztah porovnáme se vztahem 5.17 uváděným v publikacích typu [19], [4], kde lze pomocí poměných η a λ počítat převod pro různé i módy ohýbání. V našem případě připouštíme pouze první mód, ve kterém jsou tyto konstanty přibližně jedna.

$$G' = \frac{2d_{33}S_tNE_t b}{l_t^2} (-1)^{i+1} \eta_i \lambda_i \quad (5.17)$$

5.1.5. Magnetická indukce a tok

Pro výpočet magnetické indukce [33] podél závitů v ose cívky slouží jednoduchý vzorec 5.18 z Ampérova zákona. I značí proud procházející jedním závitěm cívky a μ permeabilitu jejího jádra, tedy Terfenolu-D. Tuto vypočtenou hodnotu ze Simulinku lze posléze porovnávat s hodnotami z programu FEMM. Integrací magnetické indukce po ploše závitů dostáváme magnetický tok ϕ podle rovnice 5.19, ze kterého lze následně vypočítat indukované napětí dle vztahu 5.11 s vynásobením počtem závitů N .

$$\int_0^l B dl = \mu IN \quad (5.18)$$

$$\phi = \int_S B dS \quad (5.19)$$

5.1.6. Koercivita

Koercivitu H_c , lze vypočítat ze základních rovnic 4.1 a 4.5 při $B = 0$ tak, jak je patrné z průsečíku s osou v obrázku 4.8. Čím bude větší zatížení Terfenolu-D, tím větší bude po jeho přerušení hodnota zbytkového magnetického pole. Tato hodnota je důležitý parametr pro materiálové vlastnosti v programu FEMM.

5.2. Parametry cívky

Cívka převádí magnetickou energii na elektrickou pomocí Faradayova zákona indukčnosti. Cívka by měla přiléhat co nejtěsněji k nosníku. Musíme tedy zvážit velikost výchylky nosníku dle jeho použití tak, aby se cívka nedotýkala nosníku v případě výchylek vibrací. Adekvátně navržená cívka hraje významnou roli při harvestování energie z magnetostrikčního materiálu. Od dobře zvoleného průřezu drátu až po délku samotné cívky, která by neměla přesahovat dvě třetiny délky nosníku.

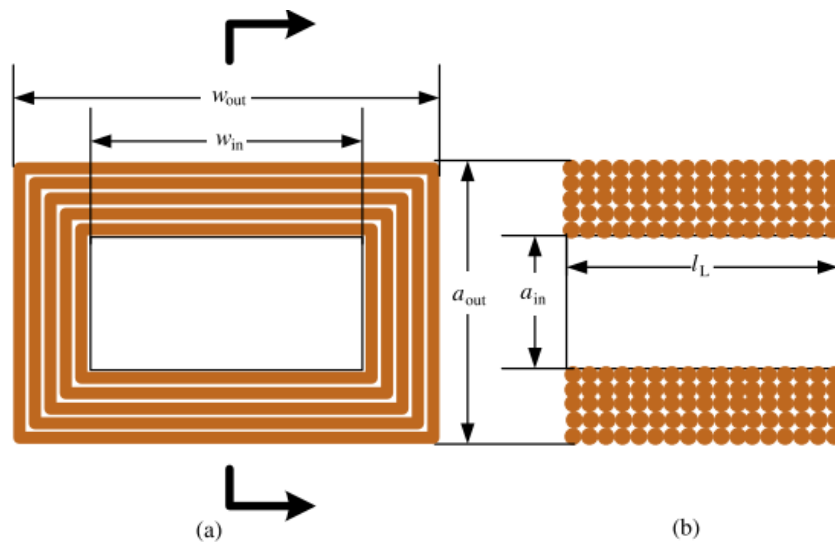
Indukčnost a vnitřní odpor cívky jsou obsaženy již ve stavových rovnicích systému a vypočítáme je dle rovnic 5.20 a 5.21. Hodnoty poddajnosti s_h a permeability μ jsou známy z tabulky 4.2, N odpovídá počtu závitů, S_c a S_d obsahu průřezu cívky a drátu. Rezistivita mědi odpovídá ρ a hodnoty l_c a l_d jsou délka cívky a délka drátu cívky. Kde délku drátu cívky l_d s více vrstvami vypočítáme jako rovnicí 5.22. Pro správný návrh cívky a ověření rozměrů je dobré spočítat faktor plnění cívky K_u dle rovnice 5.23 znázorňující, jak hustě jsou dráty cívky na sebe namotány a kolik prostoru tedy zabírá drát a kolik vzduch či lak. Parametry w_{in} , w_{out} , a_{in} a a_{out} popisují vnitřní a vnější rozměry cívky pro šířku a výšku z článku [19], jak popisuje obrázek 5.3.

$$L = \frac{\mu N^2}{l_c} S_c \quad (5.20)$$

$$R_L = \frac{\rho l_d}{S_d} \quad (5.21)$$

$$l_d = 2N \left(\frac{w_{out} + w_{in}}{2} + \frac{a_{out} + a_{in}}{2} \right) \quad (5.22)$$

$$K_u = \frac{2NS_d}{l_c(a_{out} - a_{in})} \quad (5.23)$$



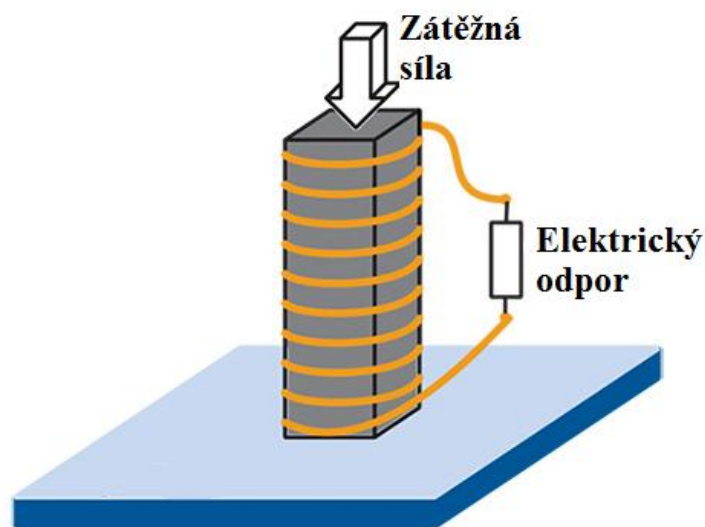
Obrázek 5.3: a) Pohled do jádra cívky b) Vertikální pohled průřezu cívky [19]

5.3. Reakce Terfenolu-D na tlak

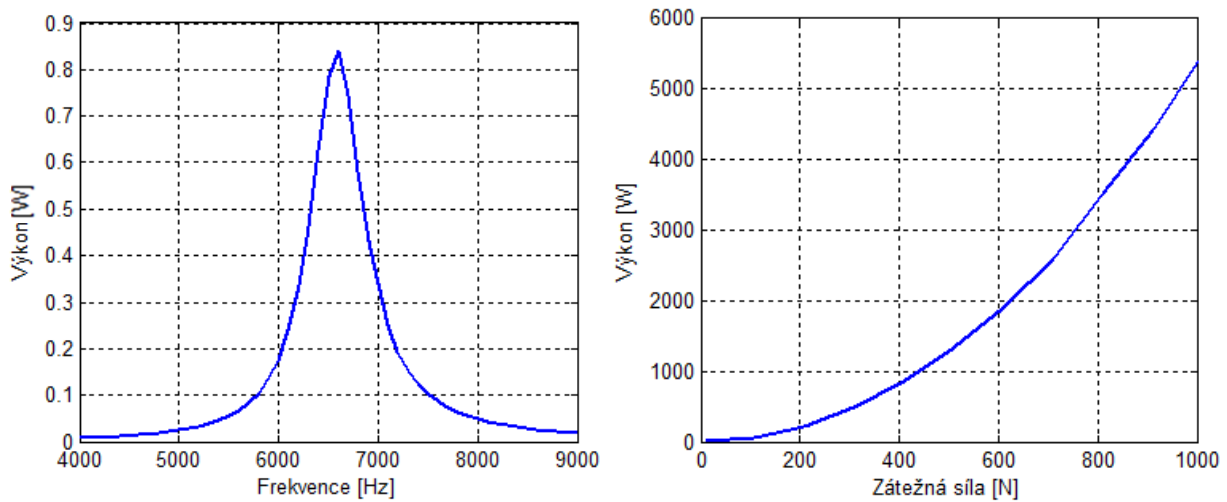
Pro zjednodušení a pochopení chování magnetostrikčního materiálu při jeho zatěžování lze začít s jednoduchým příkladem na zatěžování pouze periodickou tlakovou silou, jak zobrazuje obrázek 5.4 [16]. Kvádr Terfenolu-D o rozměrech 50x5x5 (VxŠxD) milimetrů s přidanou zátěží 5 gramů je stlačován silou 10 N s různě velkými frekvencemi dle grafu 5.5a. Z grafu je patrné, že vlastní frekvence takhle tuhého kvádru je okolo 6600 Hz.

Model takovéto soustavy je zjednodušen díky lineárnímu mechanickému napětí, které zde odpovídá podílu síly a plochy na kterou tato síla působí. Přetvoření tělesa v tomto případě odpovídá změně délky tělesa při zatížení k jeho délce celkové.

Výsledný graf 5.5b zobrazuje nárůst elektrické energie při působení různě velké síly na kvádr při jeho vlastní frekvenci. Z grafu lze říci, že závislost mezi působící silou a výsledným generovaným výkonem je téměř lineární.



Obrázek 5.4: Kvádr Terfenolu-D zatíženého na tlak [16]



Obrázek 5.5: a) Závislost generovaného výkonu na frekvenci při síle 10 N b) Závislost generovaného výkonu na velikosti zatěžující síly při vlastní frekvenci

5.4. Výsledný model A generátoru

Výsledný matematický model vychází z rovnic 5.1 a 5.2. Je tvořen pomocí rovnic 4.1 a 4.2 s parametry z rovnic 5.5, 5.6, 5.17, 5.20 a 5.21. Po dosazení parametrů do rovnic 5.1 a 5.2 získáváme zápis rovnic 5.24 a 5.25, které ve stavovém prostoru zobrazují matice v 5.26.

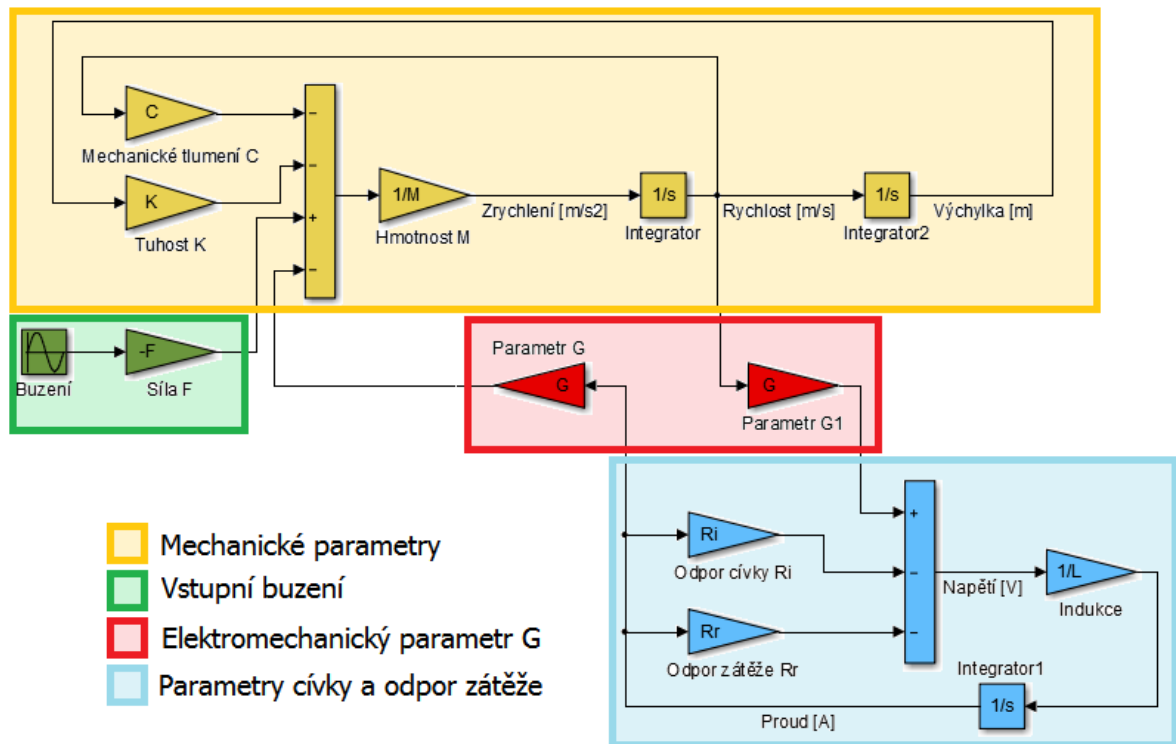
$$M\ddot{y} = M\dot{r} + 2b_p M\Omega_0 \dot{r} + \frac{Ewh^3}{l^3} r + \frac{3 d_{33} S_t N E_t h_t}{2 l_t^2} i \quad (5.24)$$

$$u = \frac{3 d_{33} S_t N E_t h_t}{2 l_t^2} \dot{r} - \frac{\mu N^2}{l_c} S_c \dot{i} - \frac{\rho l_d}{S_d} \dot{i} - R i \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \dot{r} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2b_p \Omega_0 & -\frac{Ewh^3}{l^3 M} & -\frac{3 d_{33} S_t N E_t h_t}{2 l_t^2 M} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{3 d_{33} S_t N E_t h_t l_c}{2 l_t^2 \mu N^2 S_c} & 0 & -\frac{(\frac{\rho l_d}{S_d} + R) l_c}{\mu N^2 S_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ r \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad (5.26)$$

Model systému v programu Simulink, obrázek 5.6, vyjadřují rovnice 5.24 a 5.25. Zelená část znázorňuje vstup do systému (buzení), žlutá znázorňuje mechanické parametry nosníku (hmotnost, tuhost a mechanické tlumení) a modrá parametry cívky a zátěže (indukčnost, odpor cívky a odpor zátěže). Právě tuto modrou část lze nahradit pomocí bloků ze Simscape Electronics a nasimulovat tak přesnější hodnoty elektrických veličin. Červená část představuje elektromechanický parametr G sloužící pro převod mechanické energie na elektrickou a zpět. Přesněji pro převod rychlosti nosníku na indukované napětí cívky a zpět proud v cívce na sílu působící na nosník.

Model čerpá parametry ze skriptu v Matlabu, které popisuje tabulka 5.1. Systém byl buzen periodickým signálem o vlastní frekvenci nosníku, lze ho však budít i neperiodickými naměřenými daty. Model byl doplněn o subsystemy obsahující pomocné výpočty či ověřování parametrů pro další výpočty, jako kontrolu magnetické indukce pro program FEMM nebo jednoduchý výpočet mechanického napětí v nosníku v čase.

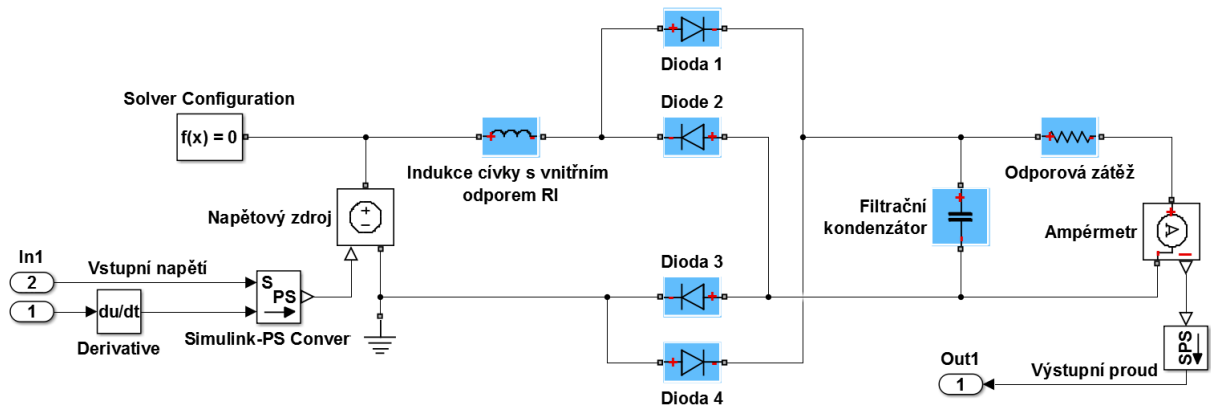


Obrázek 5.6: Model A v programu Simulink

5.4.1. Model elektrické části magnetostrikčního generátoru

Při reálných aplikacích vibračního generátoru by elektronika měla obsahovat napěťový kvadrupler [34]. Jelikož většina generátorů je schopna dodat řádově jednotky milivoltů, musí být toto napětí pomocí kvadrupleru vynásobeno a usměrněno na stejnosměrné, aby ho bylo možné využít pro stejnosměrný spotřebič. Model popsany v předcházející části však dodával napětí již dostatečné pro použití bez kvadrupleru.

Modrou část systému lze modelovat pomocí knihovny Simscape Electronic rovnou jako elektronické součástky, jak ukazuje obrázek 5.7. Do elektroniky vstupuje napětí tvořené parametrem G a rychlostí systému. K napěťovému zdroji přidáme reálnou cívku s vnitřním odporem a vzniklé napětí necháme projít přes diodový dvoucestný usměrňovač. Díky filtračnímu kondenzátoru udržíme napětí na ustálené hodnotě. Vzniklý proud prochází přes zátěž tvořenou odporem.



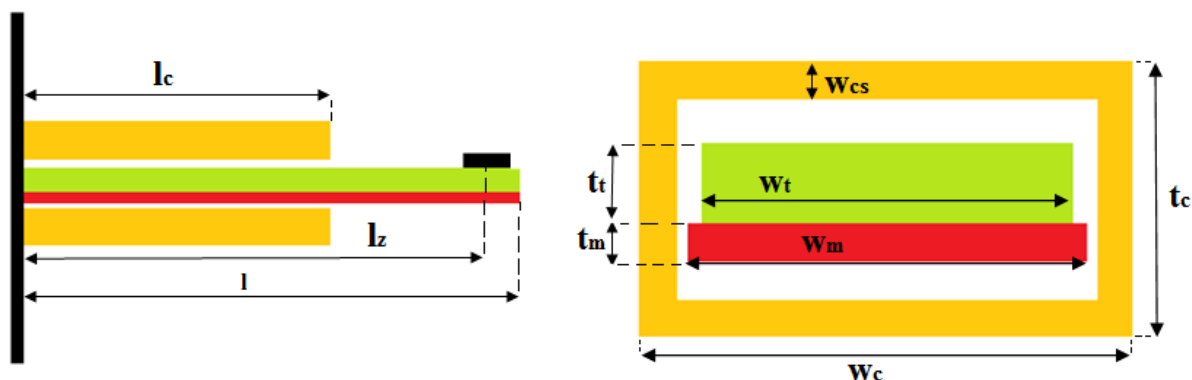
Obrázek 5.7: Model elektrické části magnetostrikčního generátoru

5.4.2. Geometrické parametry modelu A

Model byl testován vstupním periodickým signálem s různou amplitudou a vlastní frekvencí 32 Hz. Parametry modelu uvádí tabulka 5.1. Nejdůležitějším z nich je elektromechanický převod G . Pro modelování byla použita hodnota 12,36 z vyjádřeného vzorce 5.16. Hodnota 11,35 plyne ze vzorce 5.17, který je uváděn v publikacích. Při použití této hodnoty se výsledky modelu mění jen nepatrně. Parametry modelu byly upraveny tak, aby je bylo možné použít na porovnání s dalšími modely jiných typů generátoru v následujících kapitolách. Obrázek 5.8 představuje geometrii nosníku s označením podle tabulky 5.1. Zelená část představuje materiál Terfenol-D se zátěží na konci (černá), červená barva představuje měděný základ nosníku a žlutá barva představuje prostor cívky.

Název	Hodnota	Označení
Celková délka nosníku	53 mm	l
Tloušťka měděného podkladu	0,2 mm	t_m
Tloušťka Terfenolu-D	0,55 mm	t_t
Šířka měděného podkladu	14,8 mm	w_m
Šířka Terfenolu-D	14 mm	w_t
Vzdálenost od těžiště zátěže	48 mm	l_z
Délka cívky	35 mm	l_c
Tloušťka stěny cívky	2,7 mm	w_{cs}
Celková výška cívky	10,1 mm	t_c
Celková šířka cívky	22,1 mm	w_c
Průměr drátu cívky	0,1 mm	d
Vlastní hmotnost	5,4 g	M_t
Hmotnost zátěže	3 g	M_z
Tuhost nosníku	285,1 Nm^{-1}	K
Celkový Youngův modul	47,7e9 MPa	E
Mechanické tlumení	0,0156 Nsm^{-1}	C
Indukčnost cívky	104 mH	L
Odpor cívky	920 Ω	R_l
Odpor zátěže	4000 Ω	R_z
Parametr G (odvozený)	12,36	G
Parametr G' (vzorec z článků)	11,35	G'

Tabulka 5.1: Parametry modelu A v Simulinku

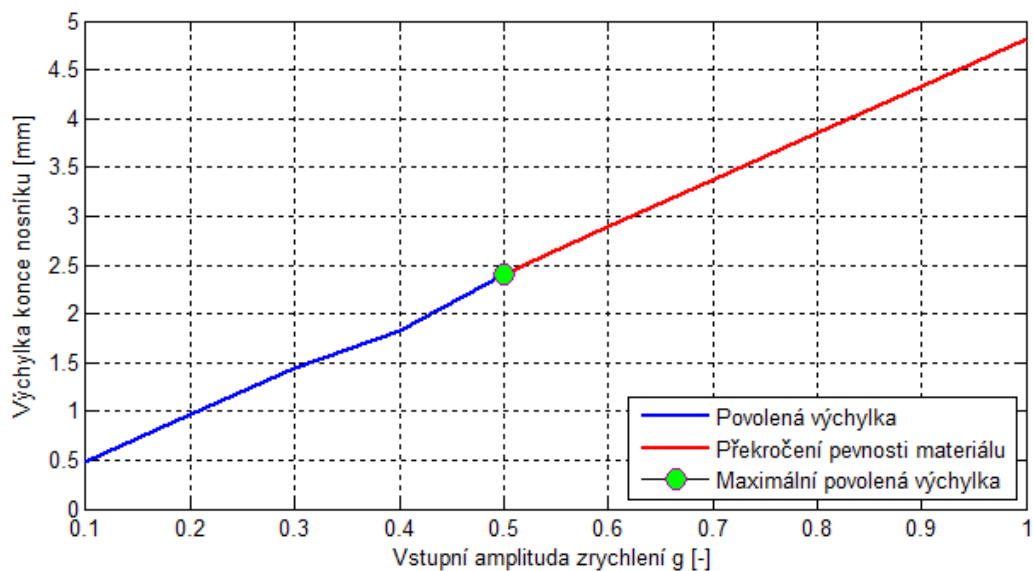


Obrázek 5.8: Geometrie nosníku

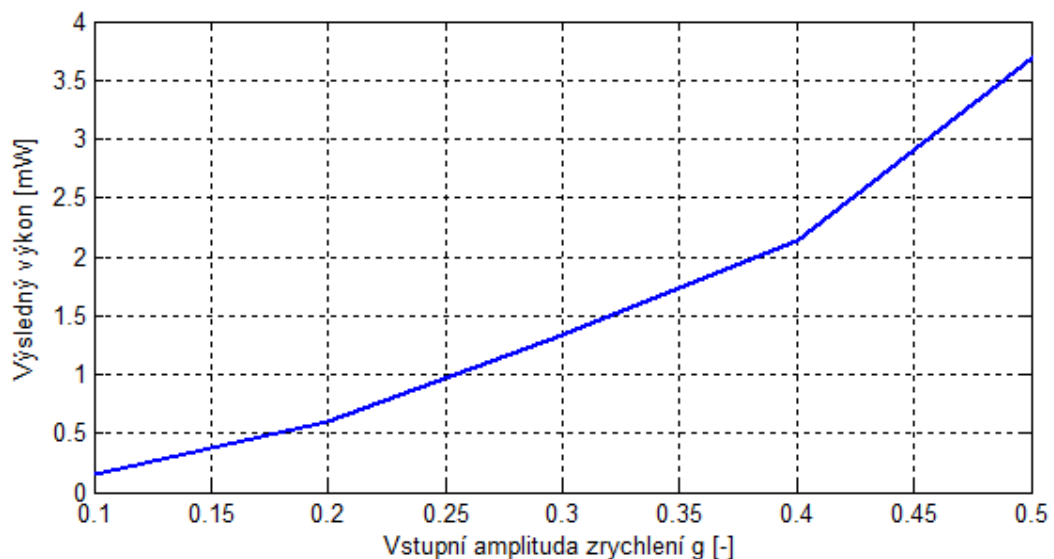
5.4.3. Výsledky simulací modelu A

Rozměry cívky musely být voleny s ohledem na tloušťku a průhyb nosníku v místě jejího konce. Výchytky na konci nosníku jsou závislé na vstupním buzení a z materiálového hlediska mohou dosahovat hodnot až $\pm 2,5$ mm, což je mezní hodnota pro bezpečné provozování generátoru. Při neadekvátním zatížení by mohlo docházet k popraskání materiálu, oddělení vrstvy Terfenolu-D od měděného základu, k nárazům nosníku do konce cívky a v mezním případě až k úplné destrukci nosníku.

Maximální výchytky nosníku ukazuje obrázek 5.9 v závislosti na vstupní amplitudě buzení. Z testování vyplývá, že maximální možná vstupní amplituda je 0,5 g. Tato hodnota odpovídá mechanickým vibracím na motorech velkých strojů. Nejběžnějšími vstupními hodnotami ze zdrojů vibrací jak lidských, tak běžných spotřebičů je rozmezí 0,1 až 0,2 g. Harvestr vyprodukuje větší množství elektrické energie při větších vstupních vibracích, ideálně alespoň 0,25 g, při kterých obrázek 5.10 ukazuje výsledný generovaný výkon 1 mW. Při vystavení nosníku maximální hodnotě buzení 0,5 g získáváme výkon přes 3,5 mW.



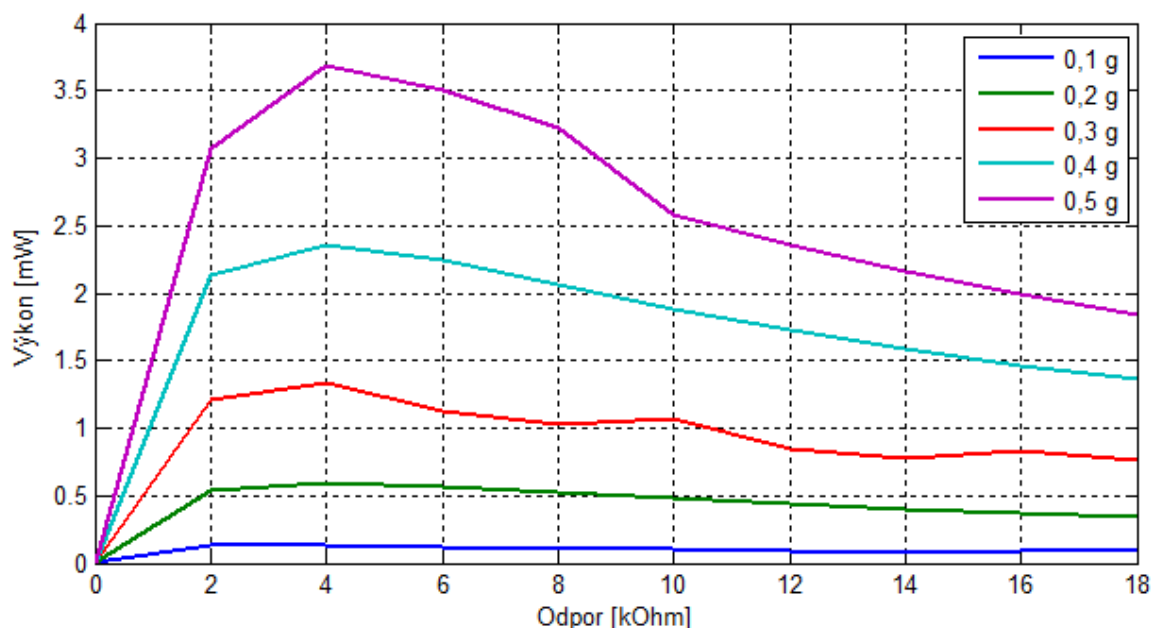
Obrázek 5.9: Maximální povolené výchytky konce nosníku při různé vstupní amplitudě



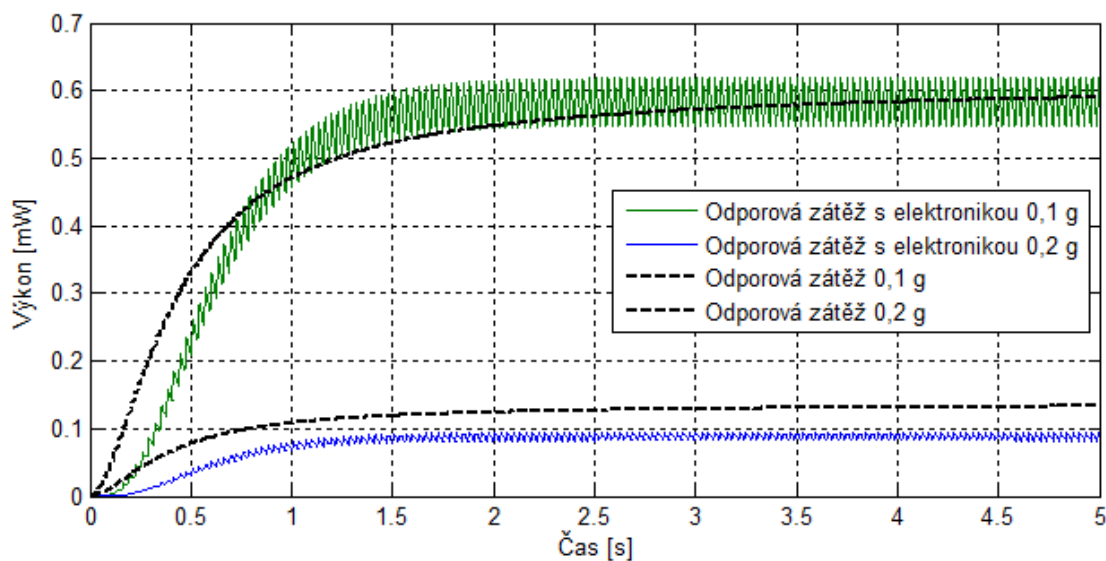
Obrázek 5.10: Výsledný výkon soustavy závislý na vstupní amplitudě buzení pro odporovou zátěž 4 kΩ

Důležitým parametrem pro získání maximálně možného výkonu je odpor spotřebiče neboli zátěže připojené ke generátoru. Model byl testován na různá vstupní zatížení g s různými hodnotami odporů. Obrázek 5.11 zaznamenává nejvýhodnější hodnotu odporu pro všechna vstupní buzení na 4 k Ω . Reálný model generátoru by tedy bylo vhodné připojit ke spotřebiči se vstupním odporem mezi 2 až 8 k Ω .

Obrázek 5.12 zobrazuje časový náběh výkonů při spuštění generátoru pro hodnoty vstupního buzení 0,1 a 0,2 g (černé průběhy). Graf je doplněn výsledky z modelu elektroniky v Simscape Electronics, jak představoval obrázek 5.7. V obvodu byly zapojeny klasické usměrňovací diody s úbytkem napětí přechodu 0,6 V a kondenzátorem o hodnotě 0,5 mF. Model elektroniky reálně zachycuje zákmity výkonu plynoucí z použitého filtračního kondenzátoru, avšak modrý průběh pro buzení 0,1 g zcela nestačí na modelovanou velikost výkonu. Takto navržená elektronika by se tedy více hodila pro buzení 0,2 g dle zeleného průběhu.

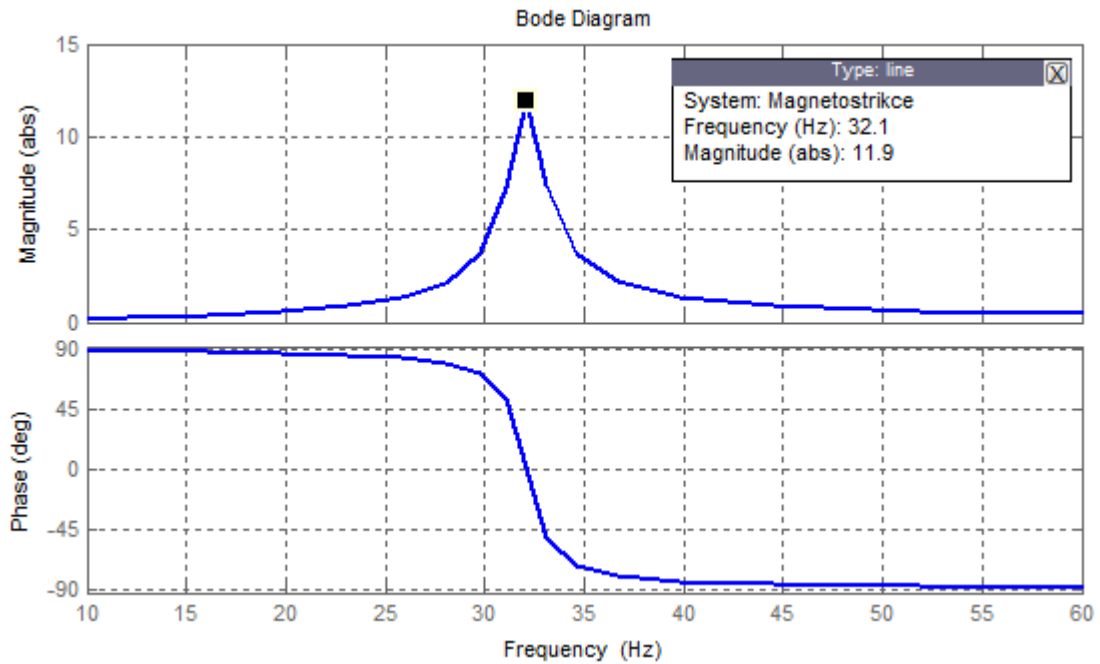


Obrázek 5.11: Závislost generovaného výkonu na připojené zátěži



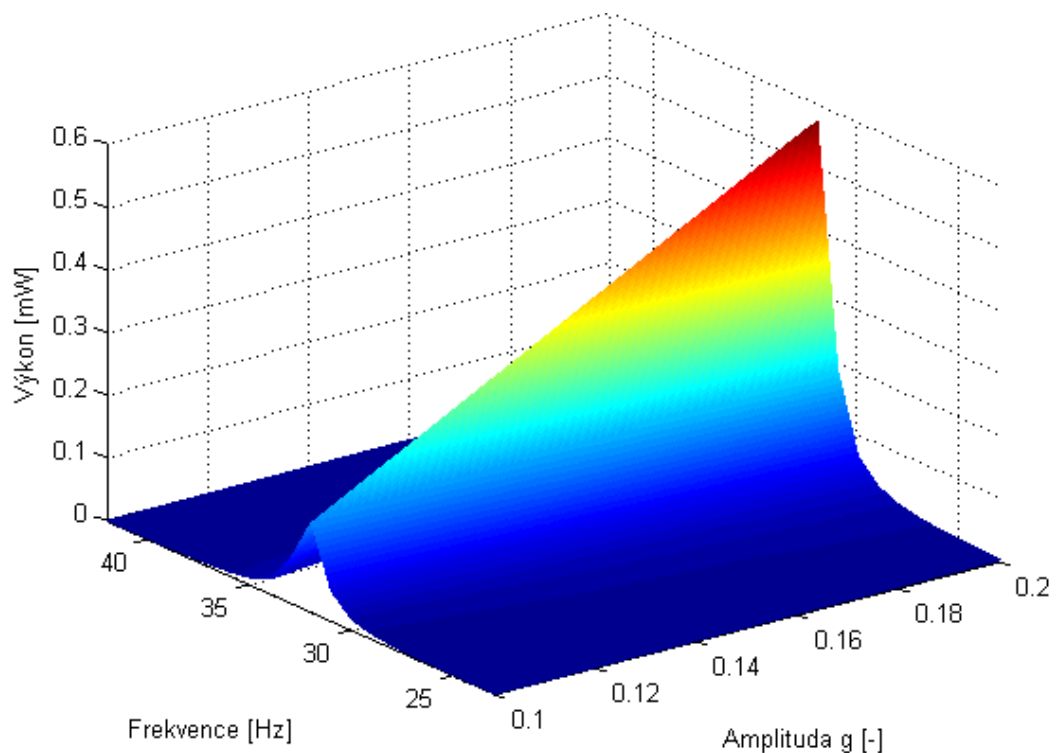
Obrázek 5.12: Náběh generátoru na odporové zátěži, porovnání simulačního modelu (černé křivky) s návrhem elektroniky pro 0,1 a 0,2 g (modrá a zelená křivka)

Frekvenční charakteristika (obrázek 5.13) vytvořená pomocí rovnice 5.26 popisuje vztah mezi vstupními a výstupními parametry soustavy. Ze vztahu mezi fází a frekvencí je patrná vlastní frekvence systému 32 Hz.



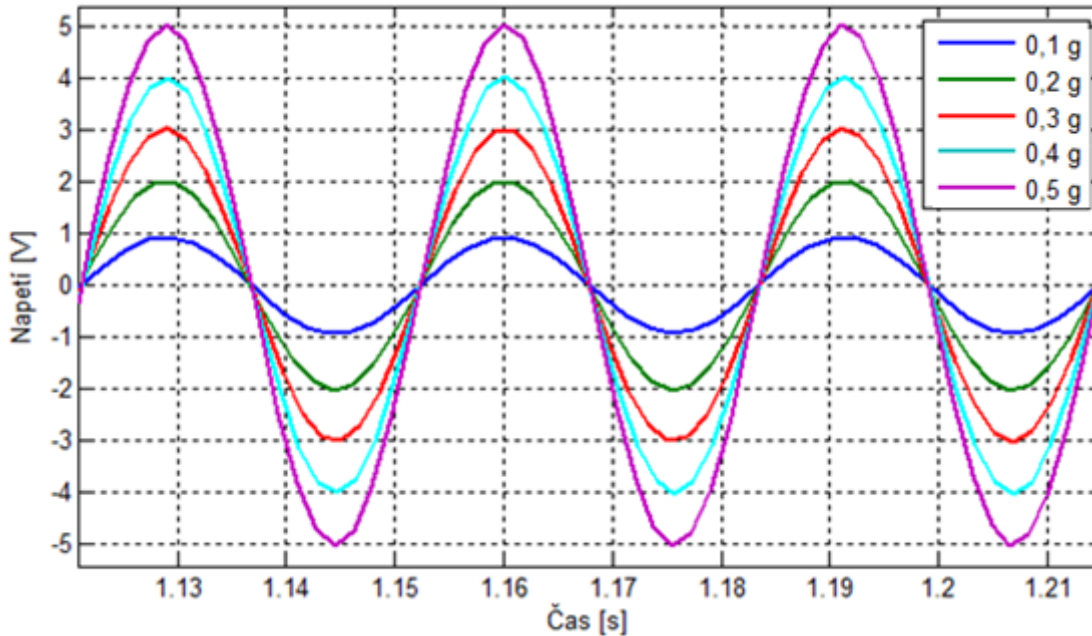
Obrázek 5.13: Přenosová a fázová charakteristika systému

Pro ukázkou závislosti budící frekvence a vstupní amplitudy kmitů byl zpracován obrázek 5.14, na kterém je patrná právě vlastní frekvence a výsledný generovaný výkon soustavy. V grafu je patrná zmíněná vlastní frekvence 32 Hz.



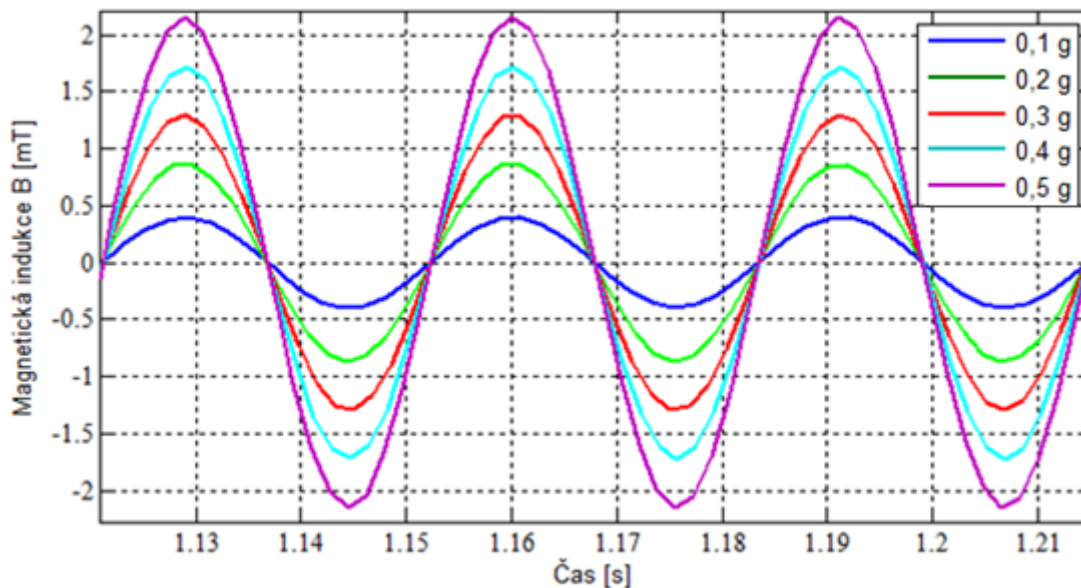
Obrázek 5.14: Závislost t budící frekvence a amplitudy na výsledném výkonu v rozmezí běžných vibrací 0,1 až 0,2 g pro odporovou zátěž 4 kΩ

Obrázek 5.15 ukazuje průběhy výsledného indukovaného napětí plynoucího z modelu pro různé vstupní buzení. Maximální amplituda napětí dosahovala až 5 V pro buzení 0,5 g, což je hodnota, kterou lze použít pro běžnou elektroniku a z pohledu energy harvestingu je to použitelný výsledek. Pro napětí generované při buzení 0,1 g, které dosahuje maximálně 1 V, by již stálo za zvážení použití násobiče (quadrupleru), avšak i s běžným návrhem elektroniky jsme se k této hodnotě přiblížili.



Obrázek 5.15: Průběh napětí pro různá vstupní buzení

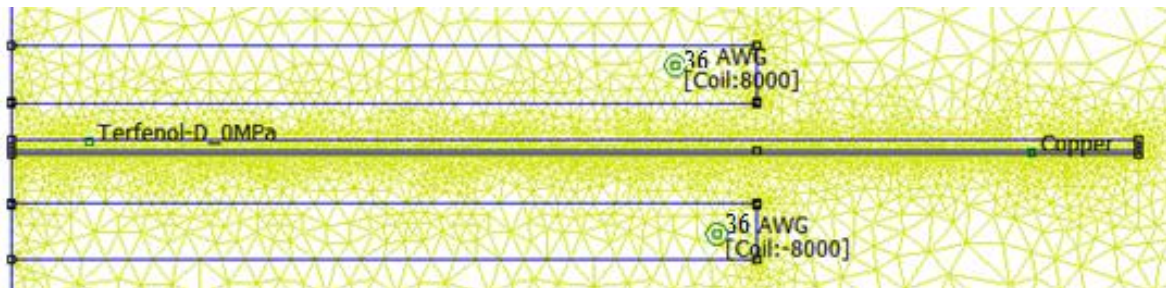
Obrázek 5.16 popisuje maximální aktuální hodnotu magnetické indukce po střednici nosníku podle rovnice 5.18, která v následující kapitole slouží pro porovnávání hodnot magnetické indukce z programu FEMM.



Obrázek 5.16: Průběh magnetická indukce pro různá vstupní buzení

5.5. Model B v prostředí FEMM

V programu FEMM lze vytvořit geometrický model nosníku i cívky s příslušnými parametry materiálu. Podklad nosníku tvoří měď obsažená v knihovně programu. U parametru cívky rozhoduje průřez drátu a počet závitů. Jako okolní prostředí je brán vzduch. Parametry Terfenolu-D, nutné k přidání do knihovny programu, jsou koercivita a B-H křivka. Výsledný model s připravenou sítí ukazuje obrázek 5.17.



Obrázek 5.17: Model nosníku s cívkou v programu FEMM

V inverzním přístupu k modelu je brán nezátížený nosník, jehož koercivita bude nulová a pro malé hodnoty magnetického pole je B-H křivka lineární. Pro relativní permeabilitu materiálu se nastavuje stejná hodnota jako pro výpočty v programu Simulink.

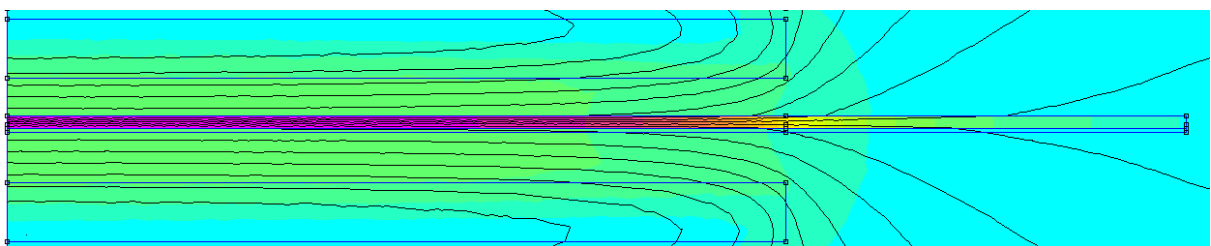
Inverzní model tedy nekmitá a nevytváří magnetické pole, které by vytvářelo indukované napětí v cívce. Naopak do cívky proudí zvolený proud (maximální hodnota odvozená v modelu A Simulink, která se pro buzení 0,5-0,1 g pohybuje mezi 1,25-0,25 mA) a její magnetické pole způsobuje magnetickou indukci v materiálu Terfenolu-D. Pokud je systém správně namodelován, měly by hodnoty magnetické indukce z elektromechanického modelu v Simulinku a elektromagnetického modelu ve FEMM být velmi podobné.

5.5.1. Zvýšení výkonu pomocí magnetických materiálů

Pro zvýšení magnetické indukce v okolí Terfenolu-D lze k navedení magnetických siločar zpět do obvodu vhodně přidat další magnetický materiál okolo cívky. Generátor byl namodelován ve FEMM tak, že cívka byla uložena v magneticky měkkém pouzdře z čistého železa o tloušťce jednoho milimetru. Ovšem toto řešení zvýšilo výkon maximálně o 5 %. Pro maximálně možný získaný výkon by bylo vhodné otestovat několik materiálů s různým uložením okolo či v generátoru. Zde lze navázat v dalších pracích.

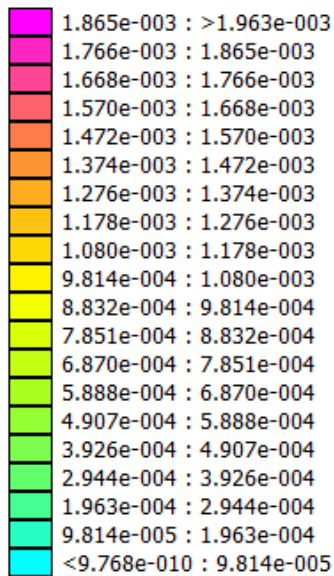
5.5.2. Výsledky simulací modelu B

Obrázek 5.18 znázorňuje grafické řešení úlohy v programu FEMM pro maximální možné buzení tedy 0,5 g. Čím tmavší (růžovější) barva, tím je v tomto prostoru větší hodnota magnetické indukce dle stupnice uvedené níže (obrázek 5.19).

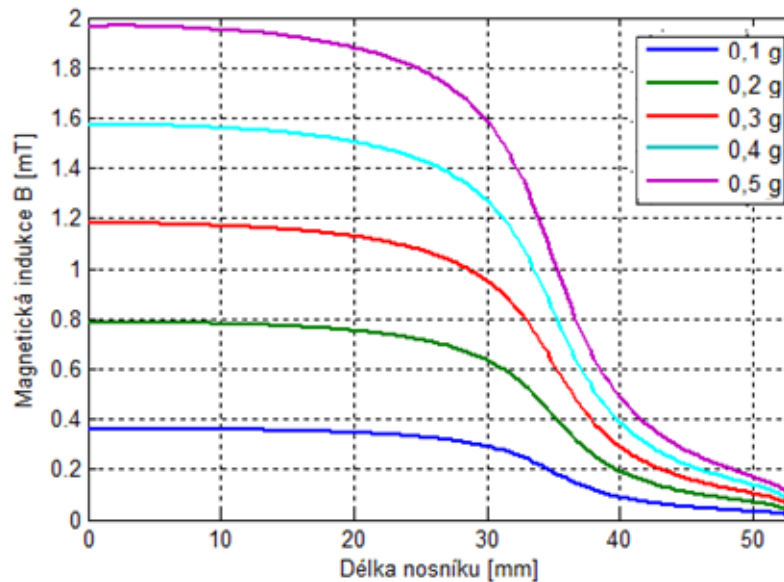


Obrázek 5.18. Rozložení magnetické indukce v Terfenolu-D z programu FEMM

Jak vypadají hodnoty magnetické indukce po délce nosníku přesně ve středu cívky, představuje obrázek 5.20. Opět byly otestovány povolené vstupní parametry pro jednoduché srovnání s daty z předešlého grafu (obrázek 5.16). Z dat stupnice pro buzení 0,5 g je patrné, že průměrná hodnota z programu FEMM (po délce cívky 0-35 mm) je přibližně o 0,2 mT nižší než ze Simulinku. Jak již zmíněno, hodnoty magnetické indukce jsou brány přesně ve středu cívky, což ovšem není střed Terfenolu-D.



Obrázek 5.19: Stupnice magnetické indukce pro 0,5 g

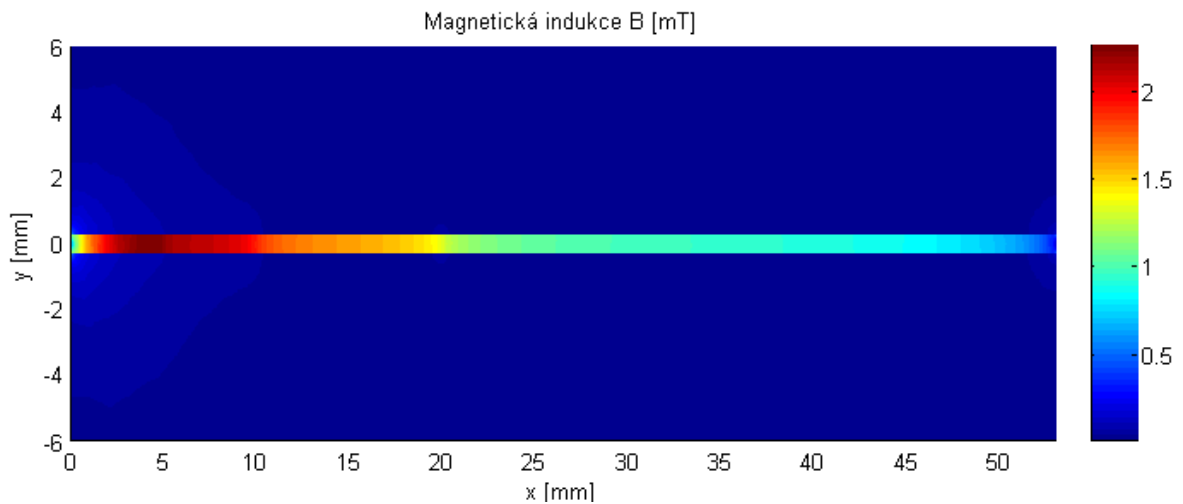


Obrázek 5.20: Hodnoty magnetické indukce podél středu cívky

5.6. Model C FEMM/Simulink pro výpočet elektromechanického parametru G

Poslední model obsluhuje program FEMM z prostředí Matlabu. Pomocí speciální knihovny příkazů lze v Matlabu spustit program FEMM a nastavit tak geometrii nosníku se všemi parametry. Oproti inverznímu modelu zde bude nosník rozdělen na několik částí dle zatížení. Jednotlivým úsekům tedy budou patřit speciální B-H křivky, které lze získat z dat výrobce, například jako v příloze A či z různých naměřených hodnot (například obrázek 4.8). Právě z důvodu adekvátních B-H křivek byl model buzen s amplitudou 0,2 g, jelikož pro nižší hodnoty se již s B-H křivkami velice přibližujeme nezatíženému nosníku. Nejdůležitější parametr, tedy koercivitu, získáme jako hodnotu magnetického pole při nulové magnetické indukci. Cívka v tomto modelu v programu FEMM potřebná není. Zabýváme se jen magnetickou indukcí vytvořenou v okolí nosníku při zadaných parametrech Terfenolu-D, které simulují jeho vnitřní napětí, tedy kmitající soustavu. Hodnoty magnetické indukce v každém bodě zvoleného prostoru předáme z programu FEMM do Matlabu.

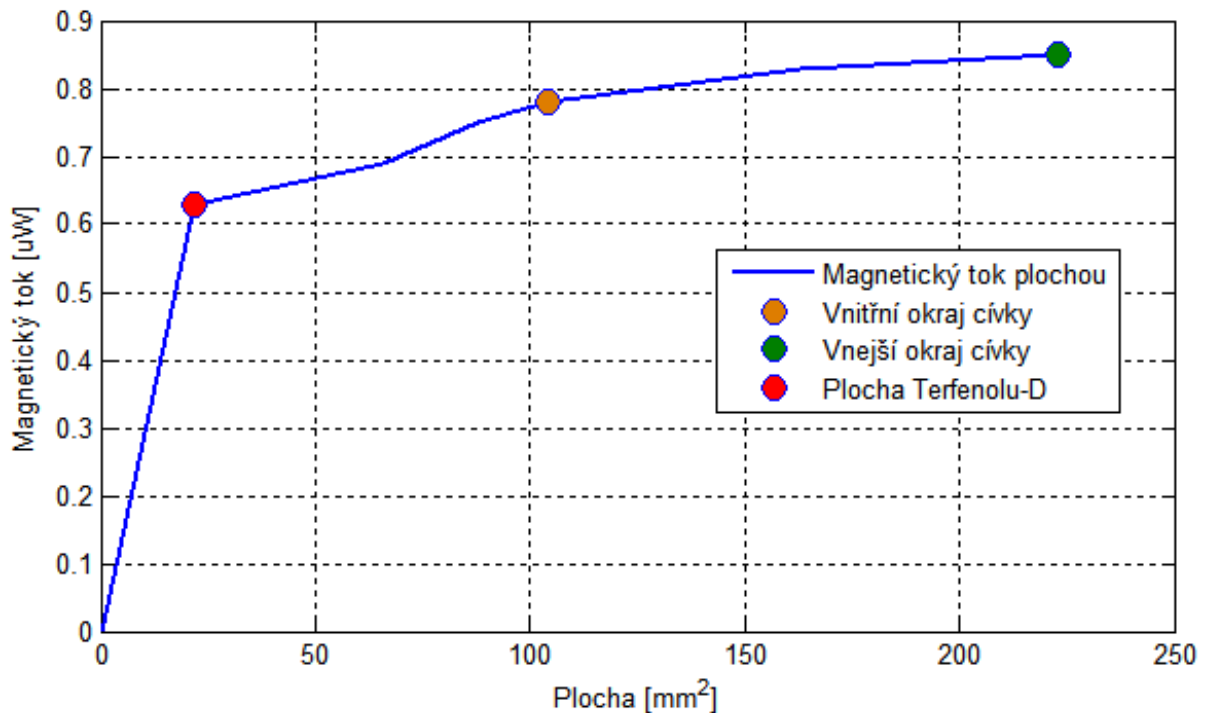
Obrázek 5.21 reprezentuje magnetickou indukci nosníku v programu Matlab. Z obrázku vyplývá, že hodnota magnetické indukce v prostoru cívky, která se nachází do maximální vzdálenosti pěti milimetrů od středu nosníku, je v porovnání s magnetickou indukcí uvnitř nosníku velmi malá. Maximální hodnota indukce v prostoru cívky dosahuje hodnoty 65 μT . Délka cívky pro zvolený model byla 35 milimetrů, ovšem v obrázku je patrné, že největší magnetická indukce je v okolí nosníku pouze do jeho délky přibližně 10 milimetrů. Z těchto zjištění plyne, že cívka byla zbytečně dlouhá.



Obrázek 5.21: Magnetická indukce převzatá z programu FEMM (vykreslení v programu Matlab)

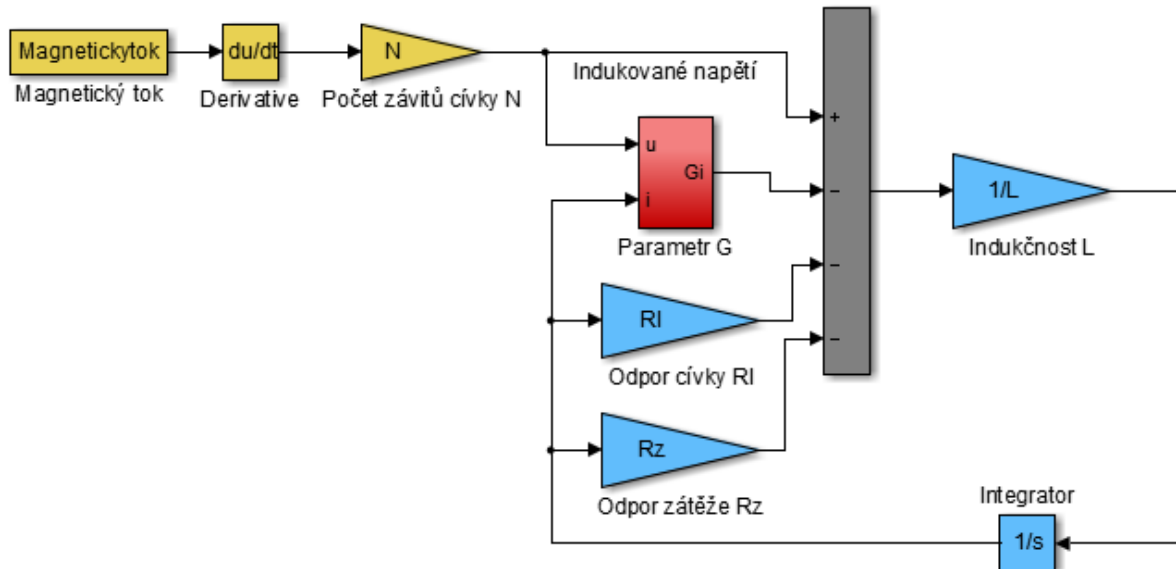
Dále již lze obdobně, jako v práci [35] zabývající se kmitáním magnetu v okolí cívky a rovnic 5.18 a 5.19 vypočítat indukované napětí v prostoru cívky přes magnetický tok, ze kterého použijeme pro výpočet indukovaného napětí pouze data v rozmezí výchylky nosníku.

Výsledný magnetický tok v prostoru cívky popisuje obrázek 5.22. Z grafu je patrná hodnota magnetického toku pro plochu vnitřního obalu cívky (hnědý znak) a vnějšího okraje cívky (zelený znak). Hodnota magnetického toku v mezikruží cívky je 0,85 uW. Magnetický tok v jádře cívky prudce roste (červený znak), tedy v prostoru nosníku, poté se jeho růst ustaluje.



Obrázek 5.22: Magnetický tok procházející plochou cívky

Indukované napětí, vypočítané derivací magnetického toku, které se tvoří v prostoru cívky, vstupuje do zjednodušeného modelu (obrázek 5.23) a lze z něj určit parametr G (žlutá část). Od tohoto průběhu je nutno odečíst zpětnou vazbou systému upravenou pro napětí (červená část). Modrá část znázorňuje parametry cívky a odpor zátěže. Průběh indukovaného napětí odpovídá pouze hodnotě mezi největším průhybem nosníku, tedy polovině periody, proto je nutné ho rozšířit na celou periodu. Tak získáme výsledné napětí a daný výkon soustavy. Pro výpočty je nutno znát frekvenci počátečních kmitů.



Obrázek 5.23: Model C generátoru se vstupem indukovaného napětí

5.6.1. Výsledky modelu C propojující program FEMM a Matlab/Simulink

Oproti inverznímu přístupu, kde lze porovnávat pouze hodnoty magnetické indukce, lze v modelu propojující Matlab/Simulink přímo s programem FEMM vypočítat získaný výkon díky jednoduchému modelu cívky a zátěže v Simulinku. Důležitým aspektem tohoto modelu je možnost srovnání vypočtené hodnoty parametru G v modelu A Simulink s nasimulovanou hodnotou plynoucí z magnetické indukce získané z FEMM. Srovnání nejdůležitějších parametrů ukazuje tabulka 5.2.

	Model A Simulink	Model C FEMM/Simulink
Výsledný výkon	0,6 mW	0,8 mW
Indukované napětí	2,0 V	2,2 V
Proud cívkou	0,5 mA	0,45 mA
Parametr G	12,3	11,6
Průměrná magnetická indukce po délce nosníku	0,59 mT	0,77 mT

Tabulka 5.2: Srovnání parametrů mezi modely A a C

Model C propojující program FEMM s programem Matlab/Simulink se projevuje výsledným výkonem 0,8 mW což je o 0,2 mW více než u modelu A v programu Simulink. Důvodem je vyšší magnetická indukce, jejíž průměrná hodnota podél nosníku byla 0,77 mT, tedy o 0,18 mT větší než v modelu A.

Zajímavým výsledkem je hodnota parametru G , která se svojí hodnotou 11,6 více odpovídá výsledku podle vzorce 5.17 z odborných publikací (značeno parametr G'), tedy hodnotě 11,3 než odvozené hodnotě 12,3. Pro základní model v Simulinku se touto konstantou násobí proud a vzniká tak síla připočítávající se k působení (tlumení) nosníku. V modelu čerpajícího data z programu FEMM je tento parametr již obsažen v indukovaném napětí. Pokud tuto hodnotu opět vynásobíme proudem vznikajícím v modelu, můžeme tyto dva signály porovnávat.

Shrnutí výsledků zobrazuje tabulka 5.3. Pro porovnání parametru síly G^*i byla zvolena hodnota plochy pod touto křivkou, která byla pro model C propojující FEMM a Simulink $0,087e-3$ a byla brána jako referenční hodnota pro porovnání plochy pod křivkou G^*i z modelu A Simulink. Pro model A byly data nasimulovány s parametrem G' o hodnotě 11,3 a parametrem G o hodnotě 12,3 a procentuálně přepočteny vůči modelu C. Jak bylo již řečeno, síla G^*i z modelu A je více podobná (jen o 3,8 % nižší) parametru G' z odborných publikací než odvozený parametr G (o 10,4 % vyšší).

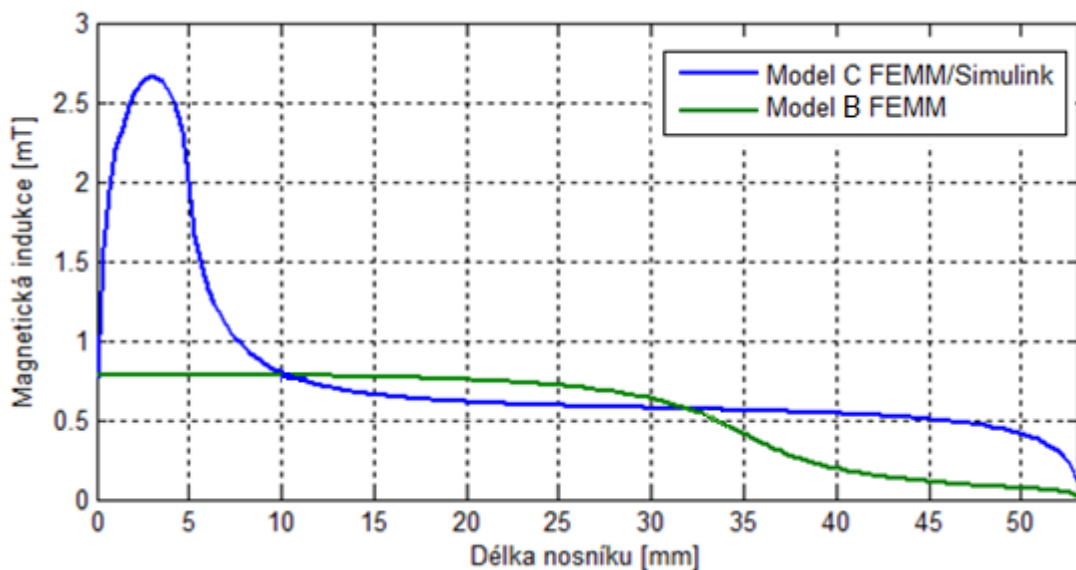
Model C		Plocha pod křivkou G^*i
Referenční hodnota $G = 11,6$		$0,087e-3$

Model A	Plocha pod křivkou G^*i	Plocha pod křivkou vůči referenci z Modelu C
$G' = 11,3$	$0,084e-3$	96,8 %
$G = 12,3$	$0,096e-3$	110,4 %

Tabulka 5.3: Porovnání parametru G a síly G^*i pro Model C a A

Obrázek 5.24 představuje hodnotu magnetické indukce po délce nosníku z modelů B a C. Model C reálně zohledňuje vysokou magnetickou indukci v místě vetknutí nosníku a koresponduje s daty magnetické indukce v prostoru cívky (obrázek 5.21). Tedy, že postačující délka cívky, kde je koncentrováno nejvíce magnetické indukce, je 10 milimetrů. Pro srovnání modelu B a C lze využít ploch pod křivkami do využitelné vzdálenosti (délky cívky 35 milimetrů). Tato hodnota byla pro model C o necelých 5 % větší než pro model B.

Tato metoda je velmi citlivá na zvolené vlastnosti koercivity a B-H křivky jednotlivých částí nosníku. Proto je velmi důležité znát přesné rozložení zatížení nosníku.



Obrázek 5.24: Magnetická indukce po délce nosníku pro modely B a C

5.7. Zhodnocení magnetostrikčního nosníku jako energy harvestru

Články popisující magnetostrikční generátory a jejich reálné aplikace byly uvedeny v kapitole 4.3. Ve většině těchto publikací byly magnetostrikční nosníky konstruovány se silnou nebo několikanásobnou vrstvou MSM. Z toho vyplývala velká tuhost nosníku a pro získání adekvátní hodnoty výsledného výkonu musely být generátory buzeny s velkou amplitudou. Jako mechanická nevýhoda se tedy jeví fakt, že pro nízké tuhosti a vysoké amplitudy hrozí destrukce nosníku. Ovšem pro magnetostrikční nosník není tolik důležitá hodnota výchylky konce nosníku tak, jako rychlost její změny. Proto ho lze použít pouze pro aplikace, kde je pevně stanovena maximální hranice budící amplitudy (je zajištěno, že se systém nerozkmitá například až do hodnoty 1 g pokud je nosník konstruován na 0,2 g).

V této práci je popsán magnetostrikční generátor s menšími rozměry a tedy nižší tuhostí a nižší vlastní frekvencí právě pro zmiňované nízké vstupní amplitudy buzení maximálně do 0,5 g. Snižování vlastní frekvence je dalším důležitým parametrem pro harvestování energie, jelikož běžné vibrace, například z lidské chůze, se pohybují okolo 2 Hz. Pokud je systém buzen frekvencemi velmi podobnými frekvencím vlastním, je pak generována maximální energie. Je tedy nutné volit parametry jednotlivých generátorů v souladu s aplikací.

Problémem při návrhu nosníku je nutnost přidání cívky v okolí nosníku. Je nutno zjistit adekvátní parametry cívky, jako průměr drátu, velikost cívky, vzdálenost od nosníku a další. Právě kapitola 5.6 ukazuje, že délka zvolené cívky byla zbytečně dlouhá a ve více jak polovině cívky se již neindukovalo dostatečné napětí.

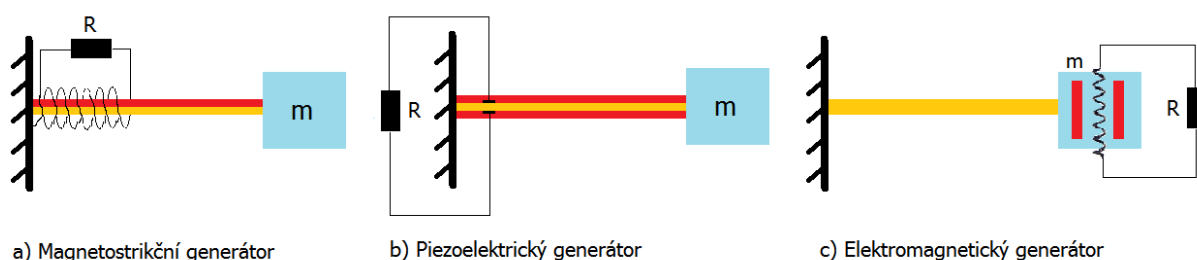
Magnetostrikční generátor je tedy vhodný pro aplikace, kde je dostatečný prostor pro nosník s cívkou a kde je známá budící frekvence a nosník tak může být adekvátně nastaven.

6. Porovnání různých typů generátorů

6.1. Popis jednotlivých generátorů

Tato kapitola se zabývá jedním z bodů diplomové práce, a to porovnáním navrženého magnetostrikčního nosníku s alternativními zdroji elektrické energie. K tomu byly vybrány další dva typy generátorů.

Pro celkové srovnání je uveden obrázek 6.1, kde a) popisuje magnetostrikční generátor tvořený nosníkem ze základu (žlutá) a magnetostrikčního materiálu (červená), zatěžovací hmotou m (modrá) a cívkou, připojený na výstupní odpor R . Piezoelektrický generátor představuje část b) opět se základem (žlutá), piezoelektrickým materiálem z obou stran (červená), zatěžovací hmotou m (modrá) a výstupním odporem R připojeným pomocí elektrod. Elektromagnetický generátor c) je umístěn na konci nosníku (žlutá) a je tvořen cívkou mezi magnety (červená) připojenou na výstupní odpor R .

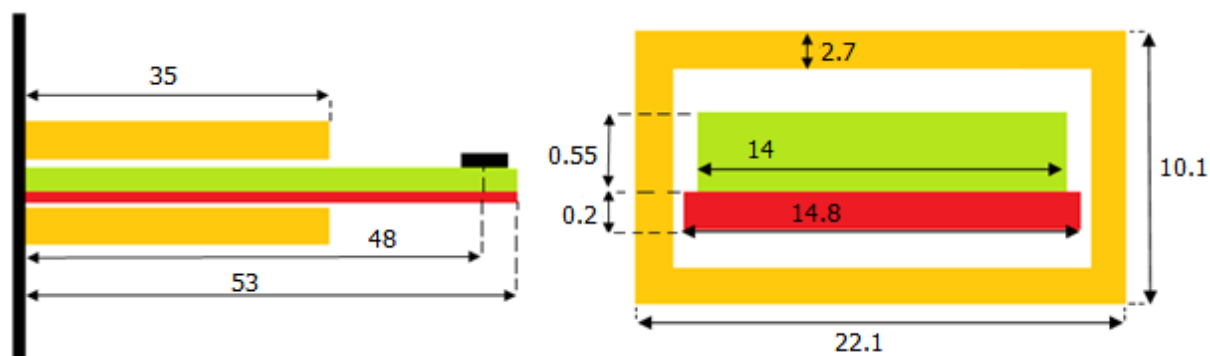


Obrázek 6.1: Porovnání různých typů generátorů

6.1.1. Magnetostrikční generátor

Geometrii nosníku popisuje obrázek 6.2, doplněný o rozměry v milimetrech. Červeně je zobrazen měděný základ, zeleně MS materiál Terfenol-D a žlutě cívka. Na konci nosníku se nachází hmotná zátěž (černá). Veškeré parametry popisuje tabulka 5.1 z kapitoly 5.4.2 zabývající se popisem magnetostrikčního generátoru.

Pro simulační model generátor byl využit již zmíněný model A Simulink, jehož výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.4.3.



Obrázek 6.2: Schéma magnetostrikčního generátoru

6.1.2. Piezoelektrický generátor

Piezoelektrický model generátoru byl převzat i s veškerými parametry a rozměry z práce [11]. Jeho geometrie je velmi podobná magnetostrikčnímu nosníku, ovšem bez nutnosti cívky. Konstrukce je bimorfnní, obsahuje dvě vrstvy piezomateriálu namísto jedné, jak je tomu u magnetostrikčního nosníku.

Obrázek 6.3 ukazuje řez nosníkem piezoelektrického generátoru s dvěma vrstvami piezomateriálu a elektrodami.

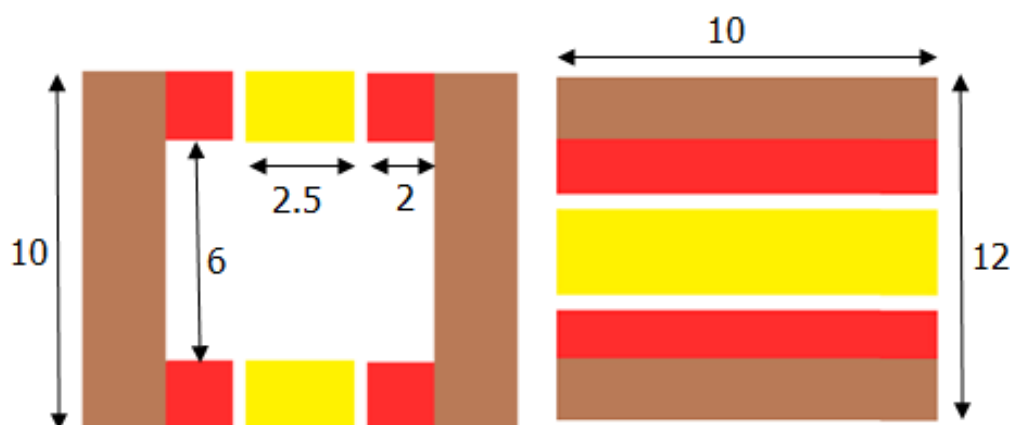


Obrázek 6.3: Průřez nosníku piezoelektrického generátoru - t_{sh} je tloušťka nosné vrstvy, t_p tloušťka piezovrstvy a t_c je celková tloušťka [11]

6.1.3. Elektromagnetický generátor

Pro elektromagnetický generátor bylo využito stejného modelu jako pro magnetostrikční generátor (model A Simulink), podle práce [15].

Obrázek 6.4 ukazuje zjednodušenou geometrii tohoto typu generátoru i se základními zvolenými rozměry. První obrázek znázorňuje pohled z boku a druhý z vrchu generátoru. Žlutá část představuje cívku, červená feritové magnety a hnědá železnou konstrukci. Generátor je usazen na nosníku z mědi o rozměrech 0,6x10x38 mm [VxŠxD].



Obrázek 6.4: Schéma elektromagnetického generátoru (rozměry v milimetrech)

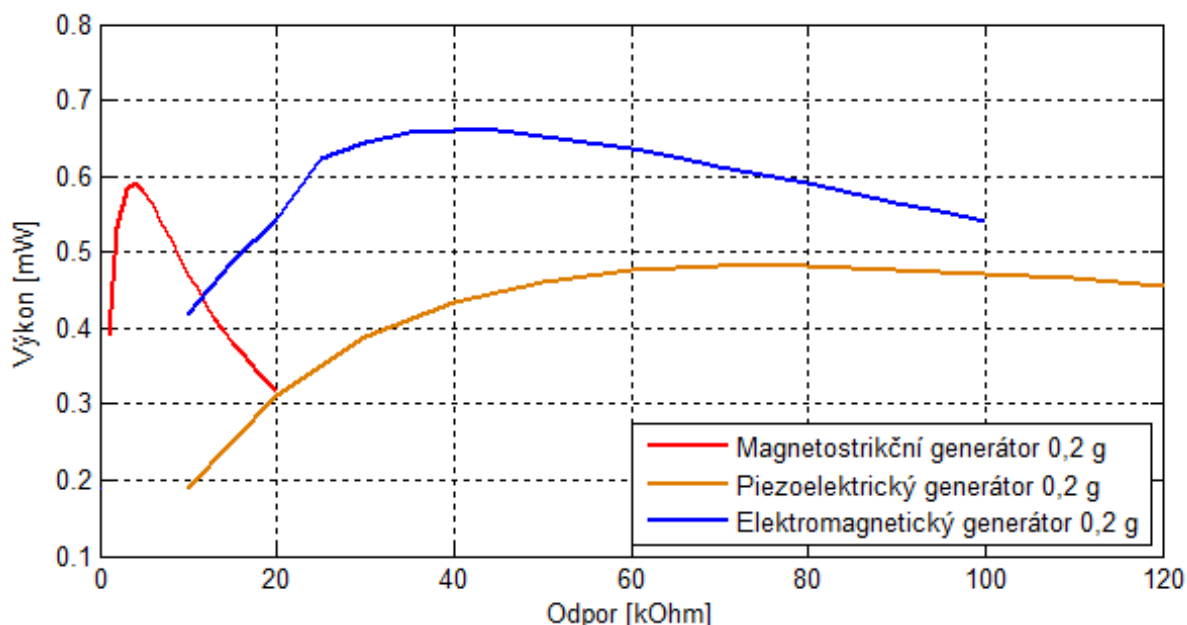
6.2. Výsledky jednotlivých generátorů

Pokud chceme srovnávat výsledky z jednotlivých typů generátorů, je důležité, aby tyto modely měly co nejshodnější parametry jako tuhost, hmotnost, vlastní frekvenci a další. Tabulka 6.1 popisuje nastavené parametry pro sledované generátory.

	Elektromagnetický generátor	Magnetostrikční generátor	Piezoelektrický generátor
Vlastní frekvence	32 Hz	32 Hz	32 Hz
Tuhost	284 Nm ⁻¹	285 Nm ⁻¹	247 Nm ⁻¹
Mechanické tlumení	0,0156 Nsm ⁻¹	0,0156 Nsm ⁻¹	0,0157 Nsm ⁻¹
Celková hmotnost	7,1 g	8,4 g	6,1 g
Nejširší rozměr	10,0 mm	14,8 mm	15,2 mm
Nejdelší rozměr	48 mm	53,0 mm	55,4 mm
Nejvyšší rozměr	0,6 mm	0,75 mm	0,78 mm
Odpor zátěže	40 000 Ω	4 000 Ω	75 000 Ω
Indukčnost cívky /kapacita pieza	71 mH	104,1 mH	52 pF
Počet závitů	1 700	8 000	-

Tabulka 6.1: Parametry jednotlivých modelů pro srovnání

Parametry modelů odpovídají tabulce 6.1 a pro všechny modely byly budící signály periodické o amplitudě 0,1 a 0,2 g a vlastní frekvenci 32 Hz. Pro jednotlivé modely byly výsledné hodnoty výkonů testovány s různými hodnotami zatěžovacích odporů. Právě jen pro tyto odpory mohou jednotlivé modely dosahovat nejvyšších výkonů a mít stejnou časovou konstantu (nacházet se v ustáleném stavu ve shodném časovém okamžiku). Hodnoty těchto odporů pro jednotlivé generátory opět uvádí tabulka 6.1 a výsledné výkony pro buzení 0,2 g představuje obrázek 6.5.



Obrázek 6.5: Porovnání výkonu na odporu zátěže se vstupním buzením 0,2 g

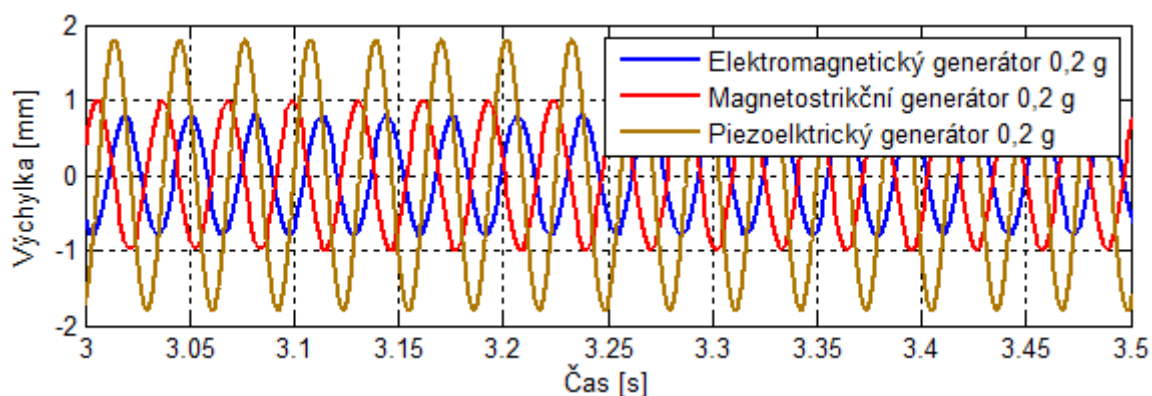
Výsledné maximální výkony uvádí tabulka 6.2. Výkon elektromagnetického generátoru pro buzení 0,1 a 0,2 g odpovídá hodnotám 0,17 a 0,66 mW, magnetostrikčního generátoru 0,15 a 0,59 mW a piezoelektrického generátoru 0,12 a 0,48 mW. Tabulka je doplněna o procentuální zisk výkonů z generátorů vůči referenci, kterou tvoří výsledný výkon z magnetostrikčního generátoru. Z výsledných hodnot vyplývá, že magnetostrikční generátor generuje výkony blízké k výkonům generovaným z elektromagnetického generátoru než piezoelektrickému generátoru. Elektromagnetický generátor generuje v průměru o 12,65 % více energie než magnetostrikční generátor. Piezoelektrický generátor poté v průměru o 19,35 % méně energie než magnetostrikční generátor.

Z naměřených dat vyplývá, že pro vyšší zisk z harvestru je příhodné použít magnetické či magnetostrikční materiály namísto piezoelektrického. Jelikož jsou si magnetostrikční a magnetické generátory principiálně podobné, daly se jejich podobné výsledky očekávat. Avšak co se týče složitosti konstrukce, jeví se magnetostrikční generátor jako výhodnější.

	Výkon pro 0,1 g	Výkon pro 0,2 g	Výkon pro 0,1 g vůči referenci	Výkon pro 0,2 g vůči referenci
Elektromagnetický generátor	0,17 mW	0,66 mW	+13,4 %	+11,9 %
Magnetostrikční generátor	0,15 mW	0,59 mW	Referenční hodnota	Referenční hodnota
Piezoelektrický generátor	0,12 mW	0,48 mW	-20 %	-18,7 %

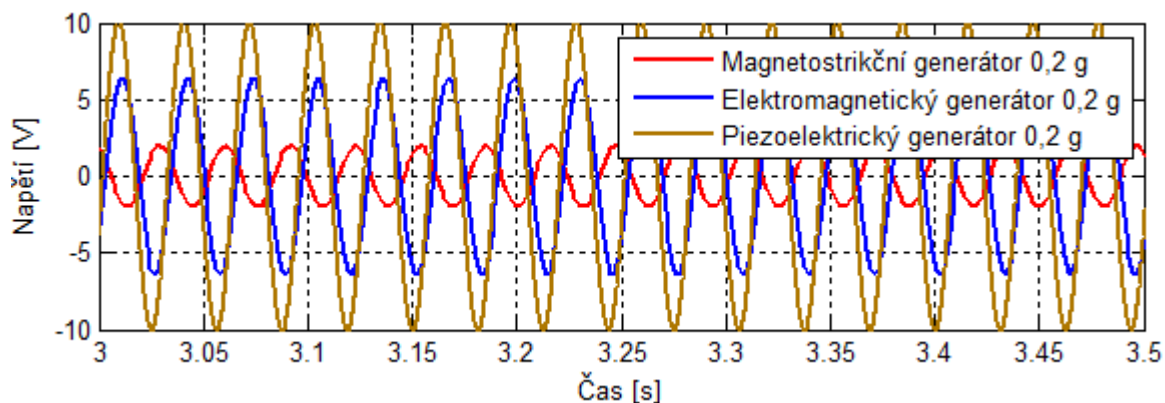
Tabulka 6.2: Výsledné výkony jednotlivých generátorů pro buzení 0,1 a 0,2 g a jejich reference

Obrázek 6.6 uvádí hodnoty výchylek konců jednotlivých nosníků. Z porovnání je patrné, že piezoelektrický generátor má největší výchylky konce nosníku, avšak jeho výsledné výkony jsou nejmenší z testovaných generátorů. Z dat je patrné, že další testování pro buzení 0,3 g by již pro piezo-materiál nebylo možné, jelikož by se dosáhlo maximální možné výchylky nosníku, tedy více jak 2,5 mm a došlo by k destrukci tohoto typu nosníku.



Obrázek 6.6: Výchylky konce nosníku pro buzení 0,2 g

Obrázek 6.7 představuje indukované napětí pro jednotlivé typy generátorů. Opět, stejně jako v předchozím obrázku je patrné, že hodnota napětí 10 V pro piezoelektrický generátor neznamena nejvyšší výkon, jelikož tento generátor pracuje s patnáctinásobným odporem než generátor magnetostrikční. Hodnota napětí magnetostrikčního generátoru se pohybuje okolo 2 V což je pětikrát méně než pro piezoelektrický a třikrát méně než pro elektromagnetický generátor, který dosahuje hodnoty napětí 6 V.



Obrázek 6.7: Indukované napětí pro buzení 0,2 g

6.3. Zhodnocení jednotlivých typů generátorů

Zhodnocení samotného magnetostrickního generátoru popisuje kapitola 5.7. Jednotlivé typy generátorů využité pro srovnání s modelem magnetostrickního generátoru byly popsány v kapitole 3. Již v začátku práce bylo zmíněno, že jako nejvýhodnější se dle publikací jeví elektromagnetický generátor. Podle výsledků z vytvořených modelů pro tuto diplomovou práci se toto tvrzení potvrdilo.

Magnetostrickní generátor tvoří svojí konstrukcí i generovanými výkony přechod mezi piezoelektrickým a elektromagnetickým generátorem. Na rozdíl od piezoelektrického je nutno jej doplnit o cívku, avšak na složitost konstrukce, je stále jednodušší než elektromagnetický generátor.

Jako nejhorší generátor se jeví piezoelektrický s nižším výkonem o 19,35 % než generátor magnetostrickní. Dalším problémem je jeho vysoká výchylka konce nosníku již při nízké budící amplitudě.

Nejvýhodnější elektromagnetický generátor měl o 12,65 % vyšší výkon než magnetostrickní generátor a jeho výchylky konce nosníku byly s magnetostrickním generátorem velmi podobné.

6.4. Možnosti další práce

Na tuto diplomovou práci lze navázat dalším zpřesňováním parametrů magnetostrickního nosníku, například snahou dosáhnout co nejnižší vlastní frekvence při zachování generování adekvátních výkonů. Další variantou je vytvoření nosníku z více tenkých vrstev MSM materiálů s využitím různých druhů těchto materiálů. Generátor lze také vhodně doplnit o magnetický materiál pro získání vyšších výkonů. V neposlední řadě lze sestavit reálný magnetostrickní generátor a ověřit tak data získaná pomocí této práce.

7. Predikce výkonu z naměřených dat

7.1. Magnetostrikční generátor model A Simulink

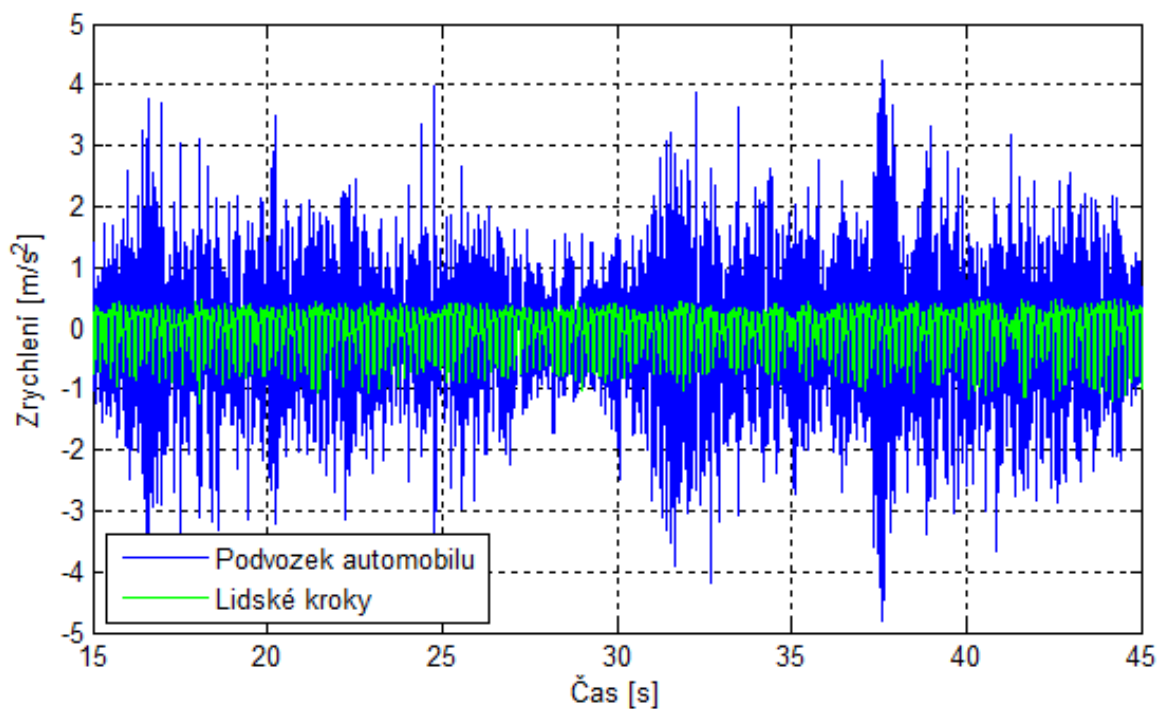
Tato kapitola se zabývá výsledky plynoucími z reálných dat testovaných na modelu A Simulink. Jako zdroje vibrací byly zvoleny dva balíky dat. První obsahuje vibrace lidského těla při chůzi měřené v blízkosti kotníku (obrázek 7.1) a druhý vibrace naměřené na podvozku automobilu (obrázek 7.2). Průběhy naměřených vibrací zobrazuje obrázek 7.3. Zelená znázorňuje vibrace člověka v pohybu a modrá vibrace automobilu.



Obrázek 7.1: Akcelerometr upevněný nad kotníkem



Obrázek 7.2: Akcelerometr umístěný v blízkosti tlumiče



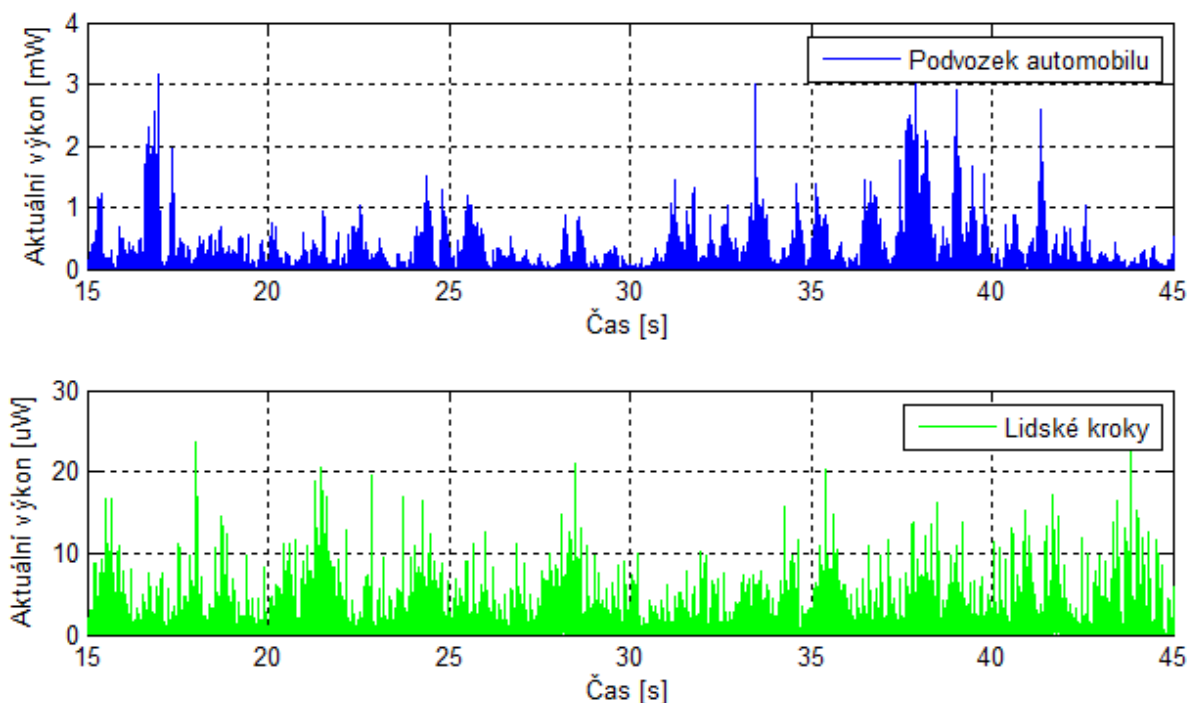
Obrázek 7.3: Průběhy naměřených vibrací

Jelikož jsou vibrace generovány s velmi nízkou frekvencí, není pro ně ideální žádný z testovaných generátorů. Pokud by generátory nebyly omezeny velikostí, dala by se jejich vlastní frekvence snížit a optimalizovat tak jejich parametry.

Nicméně s magnetostrikčním generátorem s parametry popsanými v předchozích kapitolách bylo při chůzi získáno aktuálního výkonu přes $20 \mu\text{W}$ a pro vibrace z tlumiče až přes 2 mW . S výsledky pro vibrace podvozku automobilu by se již dalo pracovat s běžnou elektronikou. Lze tak navázat v dalších pracích například na získávání elektrické energie pomocí magnetostrikčních generátorů z dopravních prostředků či jiných strojů.

Aktuální získané výkony zobrazuje obrázek 7.4. Největších výkonů dosahovala data z podvozku automobilu, mezi 35 a 40 sekundami, kdy byly nejsilnější hodnoty vibrací, jak ukazoval obrázek 7.3. Aktuální výkony generované při chůzi byly po počátečních pěti sekundách bez větších výchylek.

Dle výsledných dat lze říci, že navržený magnetostrikční generátor lze výhodněji použít pro mechanické vibrace než vibrace z lidské chůze, jelikož vibrace z podvozku automobilu se více přibližují hodnotě buzení $0,2 \text{ g}$.

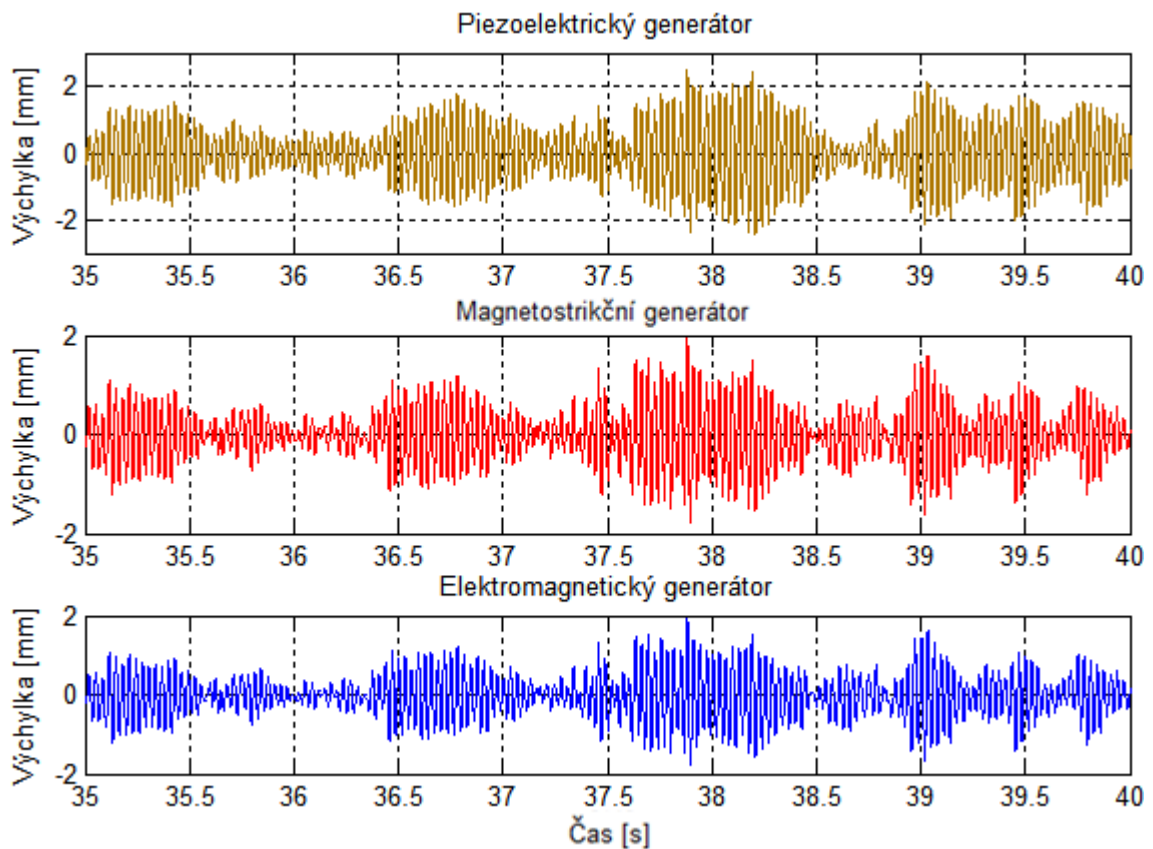


Obrázek 7.4: Aktuální výkony generované tlumičem a lidskou chůzí

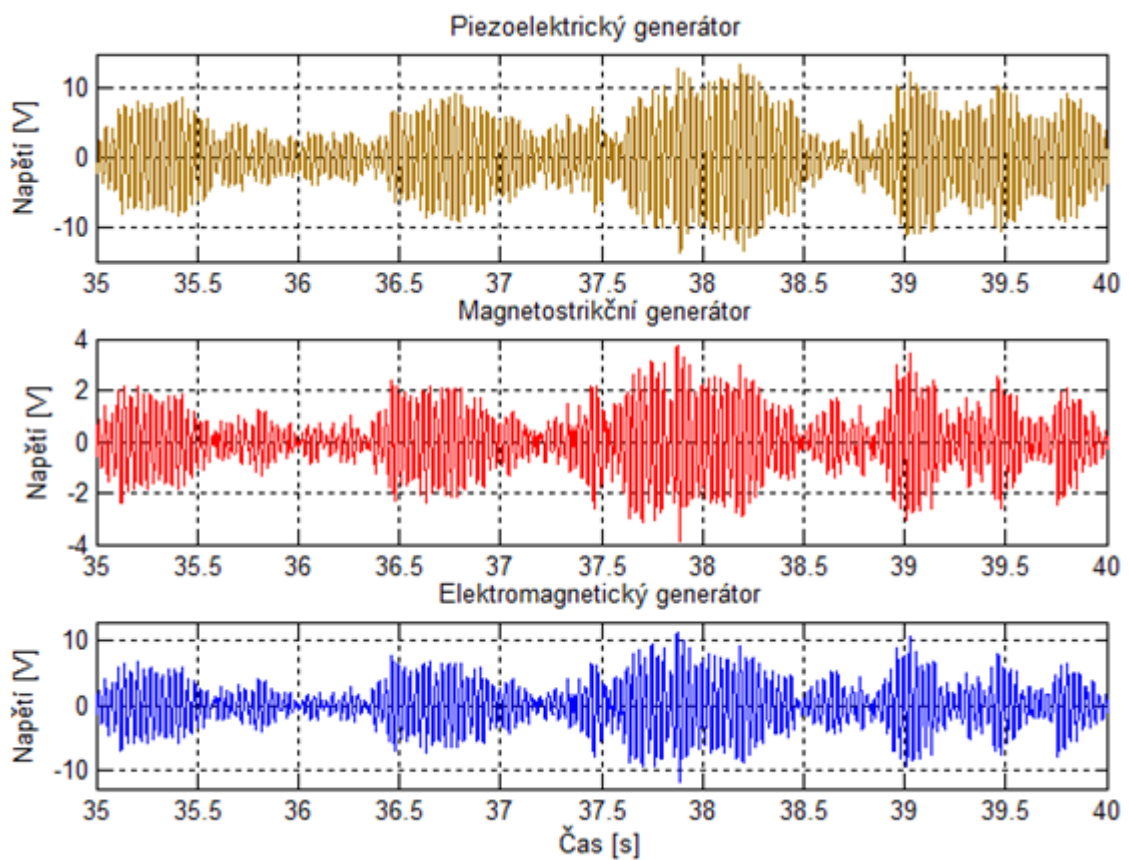
7.2. Srovnání vygenerované energie pro různé typy generátorů

Pro vyšší vibrace z podvozku automobilu byla nejprve ověřena maximální výchylka nosníků. Obrázek 7.5 představuje výchylky konců nosníku jednotlivých generátorů pro vibrace z podvozku automobilu. Je tak dokázáno, že všechny generátory jsou v bezpečném provozování a nepřekračují výchylku konce nosníku $2,5 \text{ mm}$. Největších výchylek nosníku dosahoval piezoelektrický generátor.

Obrázek 7.6 představuje indukované napětí jednotlivých nosníků. V čase přibližně 36,75 sekund odpovídá generované napětí buzení $0,2 \text{ g}$ a lze jej porovnat s experimentálními daty (obrázek 6.7). Piezoelektrický generátor generuje napětí přibližně 10 V , magnetostrikční 2 V a elektromagnetický 6 V .



Obrázek 7.5: Výchylky konců nosníku jednotlivých generátorů pro data z podvozku automobilu



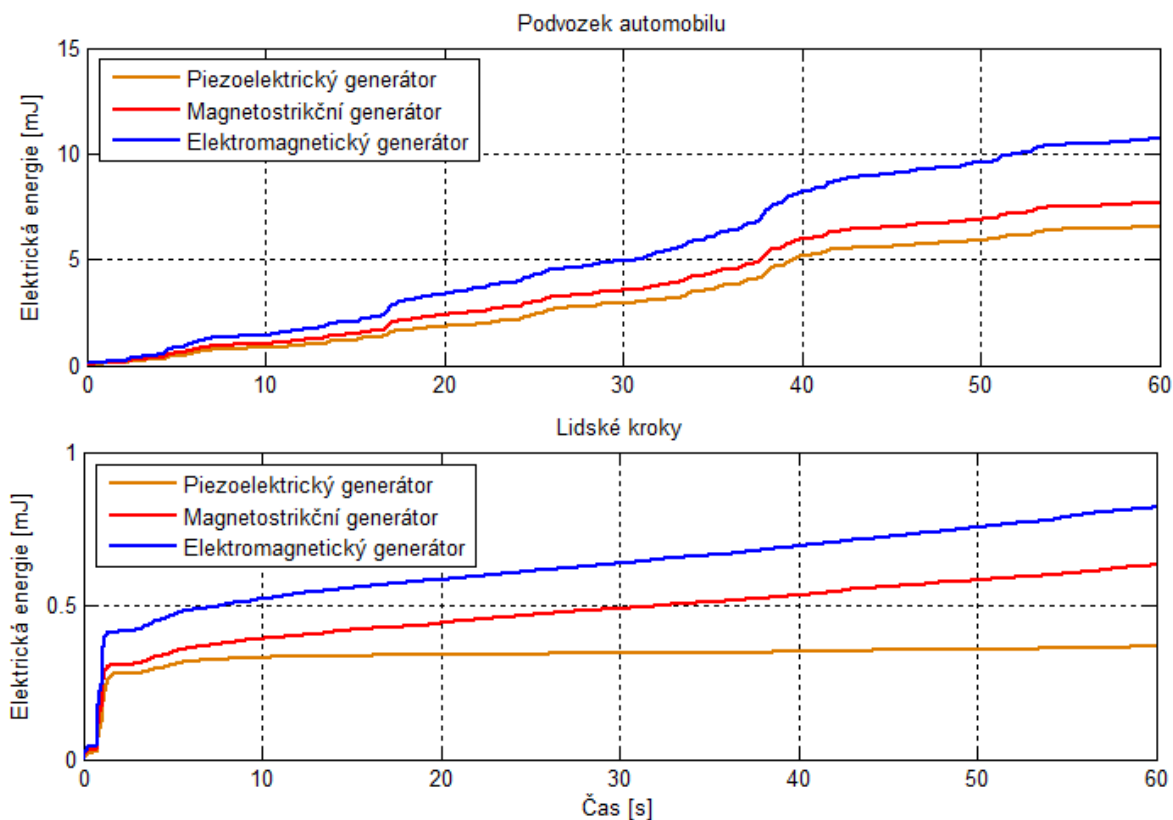
Obrázek 7.6: Indukované napětí jednotlivých generátorů pro data z podvozku automobilu

Energie generovaná z takto získaných dat dosahovala po jedné minutě při použití magnetostrikčního generátoru hodnoty 0,6 mJ pro lidskou chůzi a 8 mJ pro data z podvozku automobilu.

Obrázek 7.7 srovnává generované energie pro všechny tři typy generátorů. Jak již bylo zmíněno, elektromagnetický generátor je schopen největšího energetického zisku, a to až 0,8 mJ při chůzi a 11 mJ pro měření na podvozku automobilu. Oproti tomu piezoelektrický generátor dokázal dodat pouze 0,36 mJ pro data z chůze a 6,5 mJ pro data z podvozku.

Při testování na reálných datech z podvozku se magnetostrikční generátor jeví více podobný, podle vygenerované energie, k piezoelektrickému generátoru než tomu bylo v kapitole 6, kde se výkonově více blížil elektromagnetickému generátoru. Toto ovšem neplatí pro data naměřená při lidské chůzi. Důvodem je zrychlený pohyb člověka na začátku měření, takže energie přibližně do tří sekund měření prudce stoupla a poté se již držela v pozvolném nárůstu.

Naměřená data potvrdila pravdivost dat simulovaných dle kapitoly 6 v posloupnosti výhodnosti generátorů od nejvýkonnějšího magnetostrikčního generátoru přes magnetostrikční až k nejméně výkonnému piezoelektrickému generátoru.



Obrázek 7.7: Generovaná elektrická energie pro různé typy generátorů

8. Závěr

Tato diplomová práce pojednává o rozšiřujícím se trendu energy harvesting se zaměřením na princip magnetostrikčního generátoru a jeho schopnosti generovat elektrickou energii ve srovnání s dalšími typy energy harvesterů. Pro pochopení problematiky magnetostrikčního jevu byla v rámci této práce vypracována rešeršní část s ukázky reálně vytvořených a testovaných generátorů tohoto typu. Dále byly stručně popsány principy dalších harvesterů, obzvláště elektromagnetického a piezoelektrického. Výsledky těchto dvou modelů byly porovnávány s navrženým modelem magnetostrikčního generátoru. Popsané principy pro MSM byly vztaženy k materiálu Terfenolu-D jehož vlastnosti byly vybrány jako nejvýhodnější a nejzajímavější pro otestování. Parametry pro tento materiál byly čerpány ze stránek firmy Etrema, která využívá právě Terfenol-D do svých senzorů a snímačů.

Na základě rešeršních znalostí, stavových rovnic, elektromechanické a elektromagnetické přeměny byly vytvořeny tři modely magnetostrikčního nosníku. První model A byl vytvořen v programu Matlab/Simulink s využitím modelování elektroniky pomocí Simscape Electronics. Harvestované výkony z tohoto modelu jsou závislé na amplitudě vstupního buzení. Testováním bylo zjištěno, že materiálová bezpečnost pro amplitudu buzení je do 0,5 g. Při vyšších amplitudách by došlo k destrukci nosníku. Simulace byly prováděny pro vlastní frekvenci nosníku 32 Hz a s odporovou zátěží 4 k Ω . Maximální získaný výkon pro nejvyšší povolenou amplitudu, tedy 0,5 g, dosahoval až 3,5 mW, avšak vibrace z běžných zařízení či z lidské chůze atd., dosahují obecně velikosti vstupní amplitudy buzení jen okolo 0,1 až 0,2 g. Pro toto buzení dosahoval maximální výkon 0,12 a 0,6 mW (graf 5.14 představuje generované výkony i pro další budící frekvence). Pro získání alespoň 1 mW je nutno soustavu budit s amplitudou alespoň 0,25 g. Pro nízké amplitudy je tedy na zvážení, pro jaké aplikace bude magnetostrikční generátor určen, zda je ve finančních a prostorových možnostech vyrobit adekvátní elektroniku s ohledem na velikost celého generátoru. Nosník navrhnutý v této diplomové práci je velký přibližně jako krabička od sirek.

Další dva modely generátoru sloužily především pro porovnání parametrů a výsledků plynoucích z předešlého modelu A. Inverzním modelem B v programu FEMM sloužícím pro modelování elektromagnetických vlastností lze detailněji pohlédnout na generování magnetické indukce v prostoru cívky a jejího jádra, tedy Terfenolu-D. Průměrné hodnoty magnetické indukce po střednici nosníku v prostoru cívky byly v programu FEMM o 0,2 mT nižší než vypočtené hodnoty ze Simulinku. Důvodem je, že střednice nosníku není totožná se středem materiálu Terfenolu-D.

V posledním modelu C lze propojit výsledky získané v programu FEMM s programem Simulink a ověřit tak kromě generovaného výkonu také odvozený elektromechanický parametr G. Model byl testován pro vstupní buzení 0,2 g a výsledný generovaný výkon byl 0,8 mW oproti 0,6 mW z modelu A v Simulinku. Důvodem je zřejmě vstup do systému, který je zde tvořený signálem magnetického toku, který je sice periodický, ovšem ne sinusový, a jeho derivace má tedy tvar obdélníkového průběhu. Díky tomuto tvaru je výsledné indukované napětí i výsledný maximální výkon soustavy vyšší než v modelu A. Zajímavým výsledkem z tohoto modelu je hodnota 11,6 parametru G, která se více blíží hodnotě parametru 11,3 vypočteného pomocí rovnice z odborných článků než hodnotě 12,3 odvozené v této práci (tabulky 5.2 a 5.3).

Dalším bodem diplomové práce bylo porovnání magnetostrikčního generátoru s piezoelektrickým a elektromagnetickým generátorem. Model pro piezoelektrický generátor byl převzat z obdobné diplomové práce a model elektromagnetického generátoru byl vytvořen na totožném základu, jako generátor magnetostrikční. Všechny modely byly upraveny na

stejnou vlastní frekvenci a nasimulovány pro různé hodnoty zatěžovacích odporů, pro získání jejich maximálních možných výkonů. Generátory byly otestovány na vstupní buzení 0,1 a 0,2 g. Jelikož z hodnot výchylek konců nosníků bylo zjištěno, že piezoelektrický generátor by při hodnotě 0,3 g již překročil svoji povolenou výchylku 2,5 mm, hrozila by jeho destrukce. Z rešeršní studie na začátku práce bylo vycházeno z předpokladu, že jako nejvýhodnější generátor se jeví elektromagnetický, což bylo pomocí simulací dokázáno. Výsledné maximální výkony elektromagnetického generátoru pro buzení 0,1 a 0,2 g vycházely 0,17 a 0,66 mW což bylo průměrně o 12,65 % více než u magnetostrikčního generátoru, jehož výkony byly 0,15 a 0,59 mW. Piezoelektrický generátor vytvářel výkon o 19,35 % nižší než magnetostrikční generátor, a to 0,12 a 0,48 mW. Tyto výsledky porovnává tabulka 6.2.

Magnetostrikční generátor se tedy jeví jako vhodná alternativa elektromagnetického generátoru a to díky svojí jednodušší konstrukci a možnosti o doplnění magnetického materiálu v okolí cívky a zvýšení tak výkonu přes hranici elektromagnetického generátoru. Touto možností by se mohla zabývat další práce, stejně tak jako sestrojením reálného magnetostrikčního generátoru.

V neposlední řadě byly všechny generátory otestovány na reálných datech získaných při měření vibrací z kotníku při chůzi a z podvozku automobilu. Aktuální generovaný výkon z lidské chůze pro magnetostrikční generátor dosahoval hodnot až 20 μ W a z podvozku automobilu až 3 mW. Výslednou generovanou elektrickou energii jednotlivých generátorů ukazuje graf 7.7, kde je opět elektromagnetický generátor jako nejvýkonnější.

Použitá literatura

- [1] German Engineer Makes A Free Energy Harvesting Device. *The Engineer* [online]. 2013 [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://wonderfulengineering.com/german-engineer-makes-a-free-energy-harvesting-device/>
- [2] MEEKER, David. Model Construction and Analysis. *FEMM 4.2 Magnetostatic Tutorial*. 2006, s. 10.
- [3] MEEKER, D. Finite element method magnetics. *FEMM 4.2 User Manual*. 2010.
- [4] WANG, Lei a F G YUAN. Vibration energy harvesting by magnetostrictive material. *Smart Mater. Structure*. 2008, roč. 17, s. 14. ISSN 0964-1726.
- [5] SMILEK, Jan. *Chůze jako alternativní zdroj elektrické energie*. B.m., 2011. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [6] HOFFMANN, Daniel, Bernd FOLKMER a Yiannos MANOLI. Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2009, roč. 19, č. 9, s. 94001 [vid. 2017-03-14]. ISSN 0960-1317. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0960-1317/19/i=9/a=094001?key=crossref.0c3199ebda1432a6c6016767859cdba8>
- [7] MENINGER, Scott, Jose Oscar MUR-MIRANDA, Rajeevan AMIRTHARAJAH, Anantha P CHANDRAKASAN a Jeffrey H LANG. Vibration-to-Electric Energy Conversion. *IEEE TRANSACTIONS ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS*. 2001, roč. 9, č. 1.
- [8] ROUNDY, Shad, Paul K WRIGHT a Kristofer S J PISTER. MICRO-ELECTROSTATIC VIBRATION-TO-ELECTRICITY CONVERTERS. 2002.
- [9] SAFARI, A a E K AKDOĞAN. *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications* [online]. [cit 12.2.2017], BOOK. 2008. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892090251&doi=10.1007%2f978-0-387-76540-2&partnerID=40&md5=63652ce006a13d338a9c38bd88f0d313>
- [10] *V21BL Mide | Mouser Czech Republic* [online]. [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/ProductDetail/Mide/V21BL/?qs=nSGccIwVXHahEs4ieRocAw%3D%3D>
- [11] LÁN, Bc. Radek. *Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru*. B.m., 2015. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [12] D'HULST, Reinhilde, Tom STERKEN, Robert PUERS, Geert DECONINCK a Johan DRIESEN. Power processing circuits for piezoelectric vibration-based energy harvesters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, roč. 57, č. 12, s. 4170–4177. ISSN 02780046.
- [13] WANG, LEI. Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Material for Powering Wireless Sensors. *Faculty of North Carolina State University*. 2007.
- [14] NOVOSÁD, Boris. *Simulační modelování elektromagnetického vibračního generátoru*. B.m., 2009. učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

- [15] BŘEZINA, Martin. *Studie získávání elektrické energie v leteckých aplikacích*. B.m., 2011. učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [16] YASUHIDE SHINDO a FUMIO NARITA. *Piezomechanics in PZT Stack Actuators for Cryogenic Fuel Injectors*. [online]. B.m.: INTECH Open Access Publisher, 2012 [vid. 2017-05-13]. ISBN 9789535107989. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/kinetic-energy-harvesting.html>
- [17] KITA, Shota, Toshiyuki UENO a Sotoshi YAMADA. Improvement of force factor of magnetostrictive vibration power generator for high efficiency. *Journal of Applied Physics*. 2015, roč. 117, č. 17, s. 1–5. ISSN 10897550.
- [18] BOROWIEC, Marek. The energy harvesting systems of Macro Fiber composites and a magnetostrictive material modelling Outline Introduction The energy harvesting measurements Analysis of results Conclusions. 2016.
- [19] HU, J, F XU, a Q HUANG a F G YUAN. Optimal design of a vibration-based energy harvester using magnetostrictive material (MsM). *Smart Materials and Structures*. 2010, roč. 20, č. 1, s. 15021. ISSN 0964-1726.
- [20] BERBYUK, Viktor a Jayesh SODHANI. Towards modelling and design of magnetostrictive electric generators. *Computers & Structures*. 2008, roč. 86, č. 3–5, s. 307–313. ISSN 00457949.
- [21] BHATTACHARYA, B. Terfenol and Galfenols : Smart Magnetostrictive Metals for Intelligent Transduction. *Directions magazine (Indian Institute of Technology Kanpur)*. 2005, roč. 7, č. 2, s. 35–40.
- [22] OLABI, A. G. a A. GRUNWALD. Design and application of magnetostrictive materials [online]. 2008, roč. 29, č. 2, s. 469–483. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2006.12.016
- [23] JONATHAN G. BENATAR. FEM IMPLEMENTATIONS OF MAGNETOSTRICTIVE-BASED APPLICATIONS. *Faculty of the Graduate School of the University of Maryland*. 2005, č. Chapter 2.
- [24] SHINDO, Yasuhide, Yuzo KORI, Kotaro MORI a Fumio NARITA. Electromagneto-mechanical fields of giant magnetostrictive/piezoelectric laminates under concentrated load. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2012, roč. 3, č. 2, s. 169–182. ISSN 1947-5411.
- [25] ISAAK MAYERGOYZ, SERIFS EDITOR. *Handbook of Giant Magnetostrictive Material*. 2000. ISBN 012238640X.
- [26] YASUHIDE SHINDO a FUMIO NARITA. *Piezomechanics in PZT Stack Actuators for Cryogenic Fuel Injectors*. B.m.: INTECH Open Access Publisher, 2012. ISBN 9789535107989.
- [27] TKOTZ, Klaus. *Průručka pro elektrotechnika* . B.m.: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 8086706133.
- [28] CHOWDHURY, H A. A F INITE E LEMENT A PPROACH F OR T HE I MPLEMENTATION O F T ERFENOL-D I N A UTOMOTIVE C NG F UEL. 2008, č. July.
- [29] DAVINO, D, P KREJČÍ a C VISONE. Fully coupled modeling of magneto-mechanical hysteresis through ‘thermodynamic’ compatibility. *Smart Materials and Structures*.

- 2013, roč. 22, č. 9, s. 95009. ISSN 0964-1726.
- [30] UENO, Toshiyuki a Sotoshi YAMADA. Performance of energy harvester using iron-gallium alloy in free vibration. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2011, roč. 47, č. 10, s. 2407–2409. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2011.2158303
- [31] Z. HADAS. Technologie energy harvesting. *Brno VUT*. 2016.
- [32] ING. JAN VRBKA. *Pružnost Pevnost I*. B.m.: Brno VUT, 2011.
- [33] *Magnetické pole solenoidu — Sbíрка úloh* [online]. [vid. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://reseneulohy.cz/451/magneticke-pole-solenoidu>
- [34] *Voltage Multipliers : Diodes and Rectifiers - Electronics Textbook* [online]. [vid. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-3/voltage-multipliers/>
- [35] KOUTNÝ, Petr. *Relativní snímač polohy*. B.m., 2013. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Seznam příloh na CD

- Model A Simulink
 - Magnetostricke_data.m
 - Magnetostricke_model.slx
- Model B inverzní model FEMM
 - Magnetostricke_inverzni.FEM
- Model C propojující program FEMM/Simulink
 - Model_FEMM_parametry.m
 - FEMM_model_sim.slx
 - Terfenol-D_0-3MPa_BH_krivka.txt
 - Gii.mat
 - B200.mat

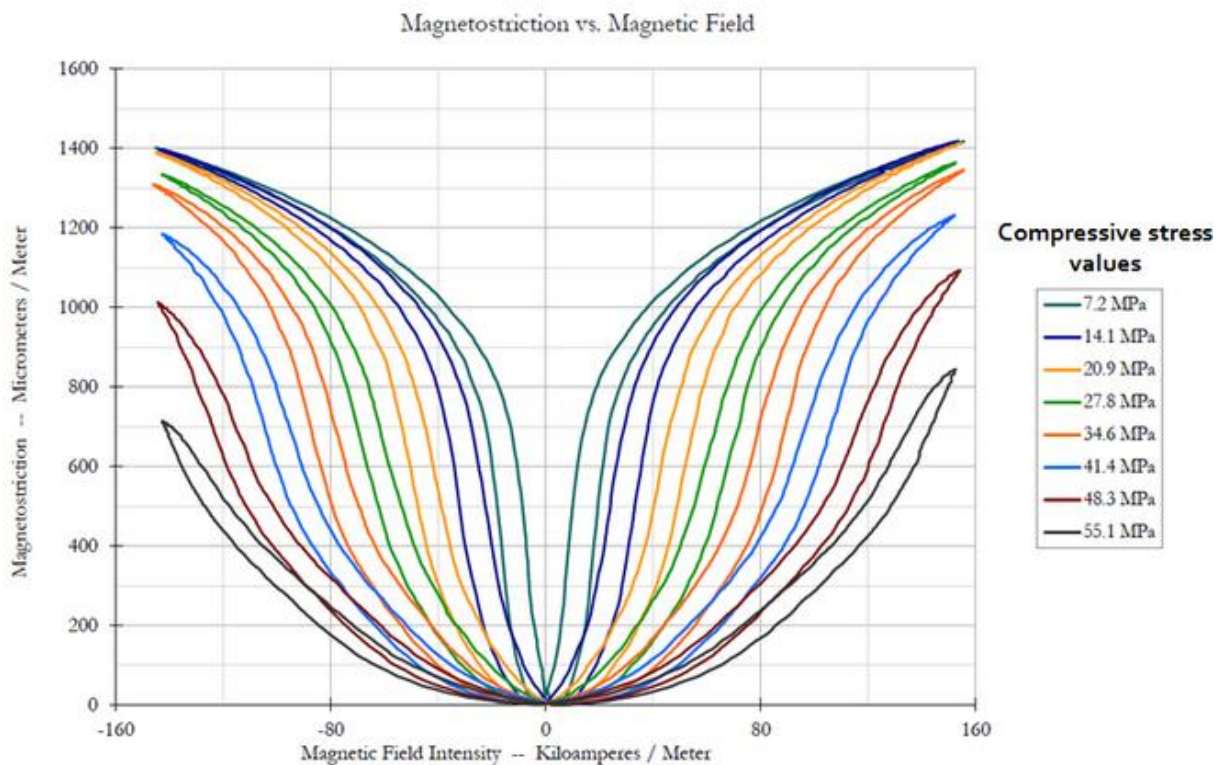
Příloha A: ETREMA

Firma Etrema vyrábí zařízení a systémy obsahující magnetostrikční materiály jako je Terfenol-D a Galfenol. Nejvýznamnějším výrobkem je podmořský sonar. Firma si tyto materiály i sama vyrábí a právě Terfenol-D prezentuje jako materiál schopný stokrát většího efektu změny magnetické energie na elektrickou než běžné magnetostrikční materiály a dvakrát až pětkrát větší než u piezo-keramiky.

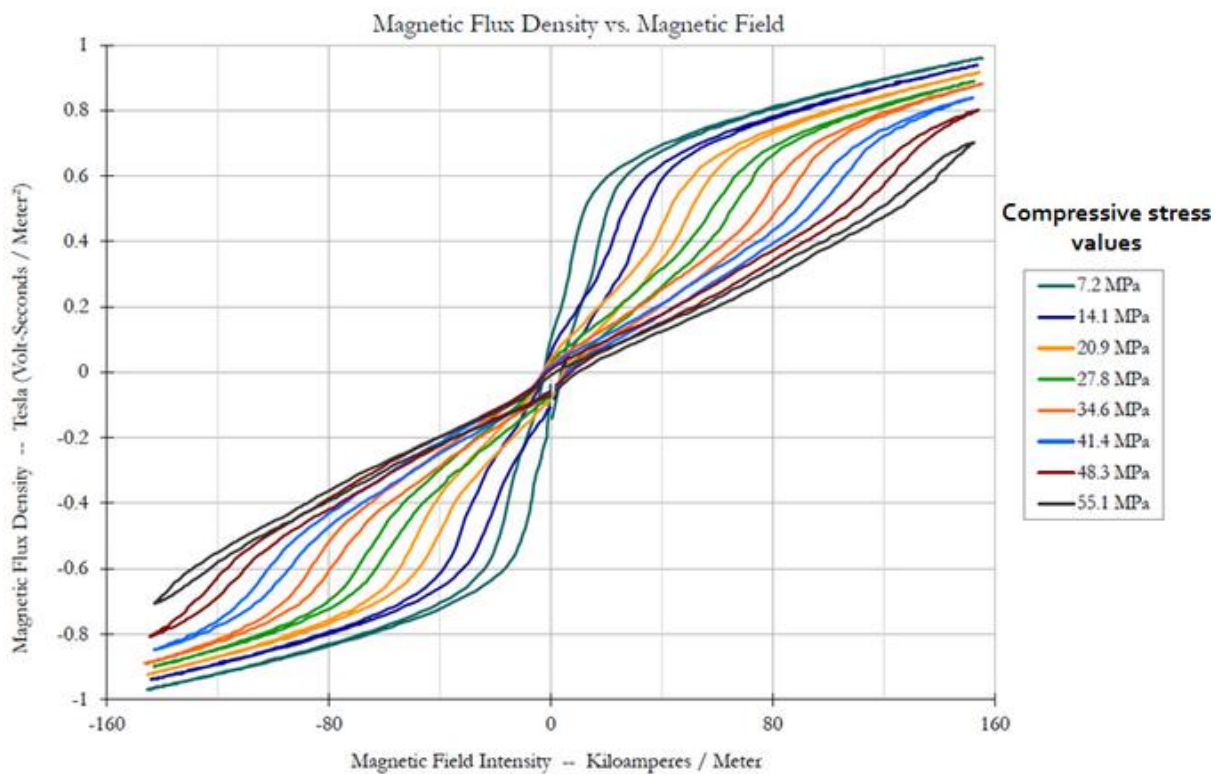
Následující tabulka A. 1 zobrazuje fyzikální vlastnosti Terfenolu-D. Závislost mezi intenzitou magnetického pole a magnetostrikcí neboli prodloužením uvádí graf A. 1. Nejdůležitější závislost mezi magnetickou indukcí a magnetickým polem (dříve zmiňované B-H křivky) uvádí graf A. 2. Pro oba grafy jsou uvedeny průběhy pro zatížení mezi hodnotami 7,2-55,1 MPa.

Fyzikální vlastnosti Terfenolu-D $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$	
Mechanické vlastnosti	
Hustota	9200-9300 kg/m ³
Youngův modul (konstantní proud)	18-55GPa
Youngův modul (konstantní napětí)	50-90 GPa
Pevnost v tahu	28-40 MPa
Teplotní vlastnosti	
Koeficient teplotní roztažnosti	11 ppm/°C (při 25°C)
Tepelná vodivost	13.5 W/mK (při 25°C)
Bod tání	1240 °C
Elektrické vlastnosti	
Odpor	$60 \times 10^{-8} \Omega/m$
Curieho teplota	380 °C
Magneto-mechanické vlastnosti	
Coupling faktor	0.7-0.8
Relativní permeabilita	2-10
Saturace magnetického toku	1 T
MS koeficient d_{33}	8-20 nm/A
Účinnost magneto-mechanické přeměny	49-56 %
Složení materiálu	
Dysprosiom Dy	42.3 %
Železo Fe	40 %
Terbium Tb	17.7 %

Tabulka A.1: Fyzikální vlastnosti Terfenolu-D



Obrázek A.1: Závislost mezi intenzitou magnetického pole a magnetostrickí



Obrázek A.2: Závislost mezi magnetickou indukcí a magnetickým polem