



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

**ELEKTROMAGNETICKÝ REZONÁTOR JAKO ZDROJ
ELEKTRICKÉ ENERGIE NA ŽELEZNIČNÍ TRATI**

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING RESONATOR FOR TRAIN TRACKSIDE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslava Rusková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka: **Bc. Miroslava Rusková**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Elektromagnetický rezonátor jako zdroj elektrické energie na železniční trati

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je navrhnout alternativní zdroj energie, který by generoval elektrickou energii během průjezdu vlaku a mohl tak autonomně napájet signalizační a bezpečnostní zařízení na železniční trati. Práce je zaměřena na elektromagnetické rezonátory, které budou integrovány do jednotlivých pražců a budou tak tvořit autonomní elektrické zdroje energie pro snímací a signalizační prvky.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše konstrukcí elektromagnetických rezonátorů.
2. Analýza možných typů konstrukčních řešení.
3. Simulační model rezonátoru a simulace průjezdu vlaku.
4. Volba vhodné konstrukce a parametrů na základě simulace přejezdu vlaku.
5. Návrh konstrukce elektromagnetického zdroje energie.

Seznam doporučené literatury:

MĚŘIČKA, Jiří a Zdeněk ZOUBEK: Obecná teorie elektrického stroje. B.m.: SNTL. 1973

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

BEEBY, Stephen P., John M. TUDOR a Neil M. WHITE: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Measurement Science and Technology [online]. 1.12., roč. 17, č. 12, s. R175–R195, 2006

HADAS, Zdenek, Vojtech VETISKA, Rostislav HUZLIK a Vladislav SINGULE: Model-based design and test of vibration energy harvester for aircraft application. *Microsystem Technologies* [online]. 9.4., roč. 20, č. 4–5, s. 831–843 [vid. 17. červenec 2014]. ISSN 0946-7076.

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

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu
fakulty

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

Abstrakt

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnuť elektromagnetický generátor pre účely napájanie signalizačného a bezpečnostného zariadenia na železničných tratiach. Práve elektromagnetický generátorom predstavuje autonómny elektrický zdroj, ktorý v prípade tratí nepokrytých elektroinštaláciou je potrebný hlavne pre bezpečnosť. Práca navrhuje dva typy elektromagnetického generátora a to jeden s nelineárnou tuhosťou, ktoré sú účelne navrhnuté pre prejazdy vlakov s nízkymi frekvenciami.

Kľúčové slová

elektromagnetický generátor, železničná trať, energy harvesting, nelineárna tuhosť, MATLAB/Simulink, FEMM

Abstrakt

The aim of the diploma thesis was to design an electromagnetic generator to the purpose of supplying signalling and safety devices on the rail tracks. The electromagnetic generator is a separate electrical source, which is mainly needed for safety in the case of not covered tracks by electrical installation. The thesis proposes two types of electromagnetic generator and one with non-linear stiffness, which are designed for the passage of trains with low frequency.

Keywords

electromagnetic generator, railroad, energy harvesting, non-linear stiffness, MATLAB / Simulink, FEMM

Bibliografická citácia

RUSKOVÁ, M. *Elektromagnetický rezonátor jako zdroj elektrické energie na železniční trati*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracovala samostatne po vedením vedúceho diplomovej práce, doc. Ing. Zdeňka Hadaša, Ph.D., a s použitím uvedenej literatúry v zozname.

V Brne dňa 25.5.2018

Bc. Miroslava Rusková

Pod'akovanie

Týmto by som chcela poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce, doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D., za neoceniteľné rady, trpezlivosť a hlavne podporu pri vzniku tejto práce. Ďalej by som chcela poďakovať mojej rodine, blízkym a priateľom, ktorí stáli pri mne počas celého štúdia. Obzvlášť by som chcela poďakovať osobe, ktorá tu medzi nami už nie je, ale najviac ma podporovala počas štúdia

Obsah

1 Úvod	10
2 Formulácia problému a ciele úlohy	11
3 Energy harvesting	12
3.1 Mechanické zdroje energie.....	12
3.2 Mechanický (vibračný) energy harvesting systém.....	13
3.2.1 Podstata teórie kinematickej energie v harvestingu	13
4 Elektromagnetické generátory	15
4.1 Rezonančný generátor.....	15
4.2 Rotačný generátor.....	18
4.3 Hybridné generatory.....	19
5 Generátory použité a testované pre prejazdy vlakov	20
5.1 Hybridný MMR (mechanical motion rectifier) generátor.....	20
5.2 Inovatívny energy harvester.....	26
5.3 Problematika kinematického budenia prejazdu vlaku.....	28
6 Analýza konštrukčného riešenia rezonančných generátorov	31
6.1 Generátor s lineárnou tuhosťou.....	31
6.1.1 Matematický popis lineárneho modelu generátora	31
6.1.2 Výpočet magnetickej indukcie B	33
6.1.4 Vlastná frekvencia	34
6.1.5 Hľadisko vyrobiteľnosti	35
6.1.6 Implementácia usmerňovača	36
6.2 Výsledky generátora s lineárnou tuhosťou.....	37
6.2.1 Návrh optimálnej zát'aži	37
6.2.2 Frekvenčná charakteristika	39
6.3 Generátor s nelineárnou tuhosťou.....	41
6.3.1 Magnetická sila magnetov a nelineárna tuhosť	42
6.4 Výsledky nelineárneho modelu.....	46
6.4.1 Návrh optimálnej zát'aže pre nelineárny model	47
6.5 Porovnanie výsledkov	48
7 Záver	52
8 Zoznam použitej literatúry	53
9 Zoznam obrázkov	55
10 Zoznam tabuliek	57

11 Zoznam príloh	58
-------------------------------	-----------

1 Úvod

V dnešnom svete, kde je všetko sledované a bezpečnosť je na prvom mieste, sa predsa stretáme s tým, že na vlakových trasách, ktoré prekonávajú veľké vzdialenosti a sú vedené aj cez hory, nie je možnosť napájania elektrickej energie práve signalizačných a bezpečnostných zariadení. Preto sa začala riešiť otázka, čo s takto nepokrytými miestami vlakových tratí. Prišlo sa s nápadom, že najlepším riešením by bolo zaviesť alternatívny zdroj energie.

Dnešná doba ponúka mnoho alternatívnych zdrojov, ktoré fungujú na premene jednej energie na druhú. Ako príklad energií, ktoré by sa teoreticky dali využiť v takejto aplikácii sú veterná, solárna a kinetická. Zariadenie, ktoré vie využiť takúto energiu a premeniť ju na elektrickú je energy harvester. V tejto práci sa zameriava na kinetickú energiu a konkrétne na na typ elektromagnetického harvesteru, ktorý predstavuje generátor adekvátny pre využitie v tejto oblasti. No ešte pretým ako sa popisujú a analyzujú navrhnuté generátory v tejto práci, je ukázaných niekoľko zaujímavých konštrukčných riešení generátorov pre účely napájania signalizácie na tratiach. Prevádzajú vertikálny pohyb spôsobený prejazdom vlaku na rotačný, ktorý je cez prevody prenesený až k poháňanému motoru.

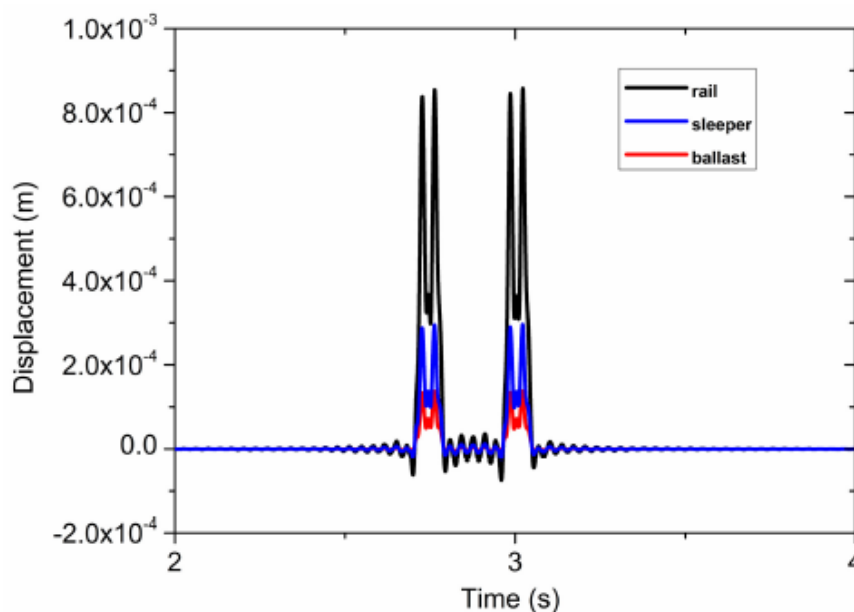
Práca analyzuje dva typy elektromagnetický generátorov z nich jeden je s nelineárnou tuhosťou vďaka odpudzujúcim sa magnetom. Pri navrhovaní sa zohľadňovalo niekoľko faktorov ako realizovateľnosť, bezpečnosť a hlavne vhodnosť pre problematiku signalizačných zariadení. Keďže generátor bude umiestnený na pražci, kde sa vyskytujú nižšie frekvencie, musí byť navrhnutý práve pre tieto frekvencie.

Je vidieť, že dnešným trendom je implementácie enrgy harvestrov všade, kde je zlý prístup, nemožnosť zavedenia elektriny a v mnohých ďalších prípadoch. Môže slúžiť aj ako záložné zariadenie. Pre všetky výhody, ktoré energy harvest má, sa objavuje čoraz viac ich prototypov. Konkrétne elektromagnetický generátor predstavuje záruku spoľahlivosti, jednoduchosti a kompaktnosti, ktoré práve v problematike, pre alternatívny zdroj energie na železničných tratiach je potreba.

2 Formulácia problému a ciele úlohy

Na základe toho, že sa chce napájať signalizačné zariadenie alternatívnym zdrojom - energy harvestrom z prejazdu vlaku, sa musí zamyslieť nad viacerými aspektami pre jeho vytvorenie.

Kinematické budenie, z prejazdu vlaku, poskytuje hnaciu silu, ktorá sa môže využiť pre elektromagnetický harvester. Zostavenie takéhoto alternatívneho zdroje potrebuje podchytiť všetky faktory, ktoré pôsobia na čo najvyššie vytvorenie dostatočnej energie. A hlavným faktorom je práve kinematické budenie. Pri pohľade na výchylky, ktoré znázorňuje obrázok 1, je vidieť, že už len miesto výrazne prispieva k tomu, aby bolo čo najväčšie kinematické budenie. Pre vhodné umiestnenie so zreteľom na možnosti upevnenia a veľkosti konštrukcie sa zvolilo miesto pražca.



Obr. 1 Výchylky v miestach kolajnice (rail), pražca (sleeper) a podkladu (ballast)

Ďalším kritériom, ktoré obmedzuje možnosti vyrobiteľnosti generátora sú frekvencie, ktoré kinematické budenie vlaku má. Tieto frekvencie sú nízke v prípade miesta pražca. Generátor musí byť navrhnutý pre tieto nízke hodnoty. Preto aj z tohto pohľadu je elektromagnetický generátor jasnou voľbou, pretože na základe jeho konštrukcie sa upravuje vlastná frekvencia generátora.

Keďže sa chce získať čo najviac energie z generátora musí sa čo najväčší zreteľ brať z kinematického budenia. Toto budenie má charakter pulzného budenia a tvar má pílovitého charakteru. Z tohto pohľadu sa dá využiť aj šírka pulzu. Bližšie sa popisuje táto problematika v kapitole 5.3.

Po zhodnotení predchádzajúcich hľadísk sa pristupuje ku samotnej konštrukcii, ktorá musí byť kompaktná z hľadiska umiestnenia. Zo zreteľom na reálnosť vyrobiteľnosti sa prevedie analýza navrhnutého generátora. Po vyhodnotení výsledkov zostáva priestor pre ďalšie možnosti za účelom lepšieho využitia generátora. To privádza k analýze ďalšieho typu elektromagnetického generátora s nelineárnou tuhosťou.

3 Energy harvesting

Energy harvesting je proces, pri ktorom sa získava energia z externých zdrojov, ako sú mechanické vibrácie, elektromagnetické, solárne, veterné a teplotné zmeny. Energiu získanú prostredníctvom tohto procesu je možno uložiť a takto uskladnenú energiu použiť pre malé zariadenia, ktoré sú aj kompaktné (veľké ako hodinky na ruke). Energy harvesting vlastne premieňa okolitú energiu na využiteľnú elektrickú energiu.

Čoraz väčšie uplatnenie energy harvesting možno postrehnúť v bezdrôtových aplikáciách, ktoré predstavujú najväčší trend dnešnej doby. Napájajú sa rôzne senzory, čo je veľmi výhodne v ťažko dostupných miestach, kde by zavedenie elektroinštalácie bolo veľmi náročné a nákladné. Taktiež sa používajú vo výrobe na sledovanie strojov v nebezpečnom prostredí a podobne.

Systémy a zariadenia sa stále viac a viac zmenšujú, čo ide v prospech energy harvesting, pretože získaná energia nie je stále postačujúca pre široké spektrum aplikácií, pre nedostatočne veľkú uloženú energiu. Taktiež sa stretáva s problémom u harvestrov na mechanikom princípe, u ktorých je potrebné naladiť celú túto mechanickú sústavu na danú frekvenciu, ktorá sa vyskytuje pri pôsobení vibrácií, no často nepokryje všetky frekvencie a tým pádom sa prichádza o možnosť ďalšej premeny energie. Pre aplikácie, kde je potrebné neustále sledovanie a zoznamovanie dát, sa radí spoľahlivosť takýchto zariadení medzi menej výhodné. No zariadenia, pracujúce na princípe energy harvesting, svojou perspektívnou vyhlídkou do budúcnosti v podobne samo-napájacieho, nezávislého zariadenia, sú stále viac zaradované do bežného života a určite sa bude ich vývoj posúvať dopredu.

3.1 Mechanické zdroje energie

Mechanické zdroje pre energy harvesting sa dajú rozdeliť do troch skupín a to nasledovne [1].

Prerušovaný mechanický zdroj: ľudské činnosti a prejazd vozidla, či vlaku alebo auta. Mechanická energia z ľudského pohybu je momentálne veľmi skúmaná, predstavuje veľký krok v biomechanike a hlavne v medicíne pre pacientov. Harvestre sa ale musia konštruovať pre nízke frekvencie, ktoré ľudské telo produkuje pri pohybe.

Pravidelný a stály mechanický zdroj: Vietor, prítok vody, oceánske vlny a solárna energia môžu poskytnúť neobmedzenú energiu z prostredia.

Mechanický zdroj vibrácií: od strojov, mechanické napätie a deformácia z vysokotlakových motorov, výrobné stroje a rotačné spracovanie odpadu možno zachytiť a použiť ako mechanické zdroje energie. Tabuľka 1 znázorňuje klasifikáciu zdrojov zberu mechanickej energie.

Zdroje energie	Charakteristika	Účinnosť	Získaná energia
Prerušovaný mechanický zdroj	Človek	~ 0,1 %	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	Vozidlo	~ 3 %	~1,10mW/cm ²
Stály mechanický zdroj	Solar vonku	10 ~ 24 %	100mW/cm ²
	vnutri		100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Mechanický zdroj vibrácií	~ kHz mašiny	25 ~ 50 %	~800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	~ Hz človek		~4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Tab. 1 Mechanické zdroje energie pre energy harvesting (1)

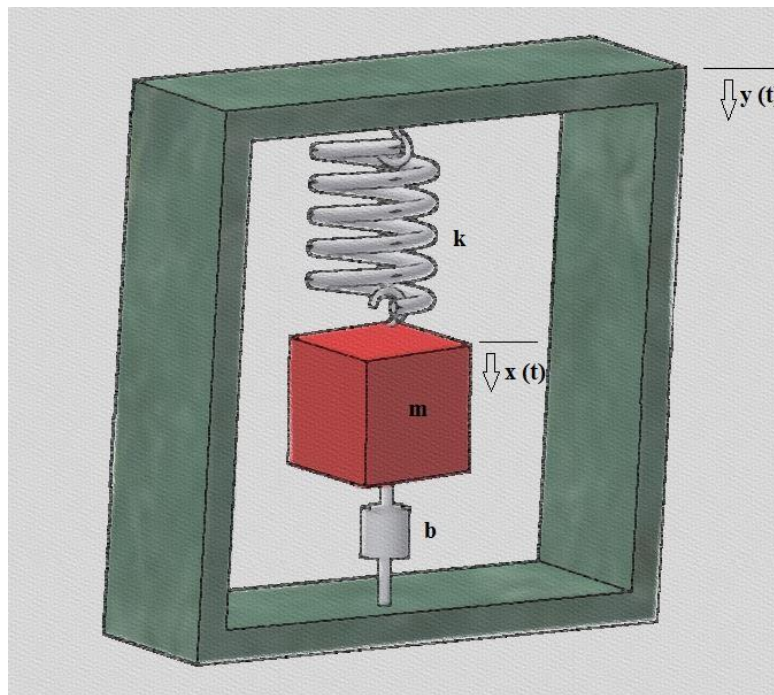
3.2 Mechanický (vibračný) energy harvesting systém

Schopnosť energy harvesting zariadenia vyrábať energiu závisí od dostupnej energie, ako aj od efektívnosti, do akej môže byť táto energia premenená na použiteľnú elektrickú energiu. Harvestre navrhnuté pre mechanický zdroj energie sa môžu konštrukčne líšiť, na rozdiely konštrukcie je zameraná kapitola 4. Podstata získania elektrickej energie procesom energy harvesting z vibrácií je rovnaká, či sa jedná o elektromagnetický alebo piezoelektrický popríade harvester.

3.2.1 Podstata teórie kinematickej energie v harvestingu

Zber kinetickej energie vyžaduje mechanicko-rezonančný mechanizmus na generovanie elektrickej energie z pohybu. Generátor obsahuje tento mechanický systém pre dosiahnutie vonkajších vplyvov s celým systémom. Návrh dizajnu mechanického systému by mal byť čo najefektívnejší aby maximálne vyťažil z kinetickej energie, teda aby získal čo najviac elektrickej energie.

Zjednodušený mechanický systém je na Obrázku 2. Je to základný model, ktorý je plne postačujú pre vysvetlenie princípu. Rám prenáša vibrácie na zotrvačnú hmotu vytvárajúcu relatívny posun medzi nimi. Tento systém má rezonančnú frekvenciu, ktorá musí byť navrhnutá tak, aby zodpovedala charakteristickej frekvencii vonkajšieho prostredia, v ktorom sa nachádza. Zo systému možno dostať ešte lepšie výsledky použitím faktorom kvality Q , ktorý je určitou charakteristikou systému.



Obr. 2 Jednoduchý mechanický model s jedným stupňom voľnosti

Pre popis tohto rezonančného modelu možno použiť diferenciálnu rovnicu (1), ktorá vychádza z Lagrangeových rovníc II. druhu.

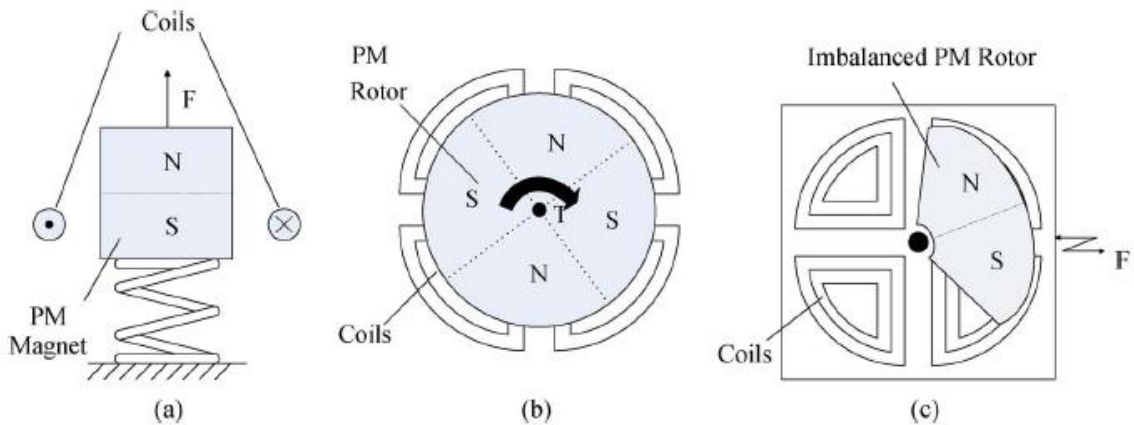
$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

Kde k je pružiny, b je tlmenie, m hmotnosť závažia, $x(t)$ je relatívna zobecnená súradnica a $y(t)$ sú vonkajšie vibrácie.

4 Elektromagnetické generátory

V obore energy harvesting sa za najviac používané považujú elektromagnetické generátory oproti iným. Tie môžu byť klasifikované do troch tried [2] (Obr. 3):

- rezonančné (a)
- rotačné (b)
- hybridné (c)



Obr. 3 Typy generátorov [2]

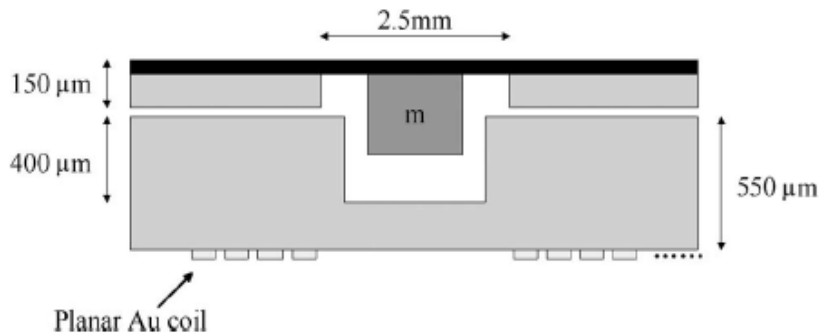
Rezonančné generátory pracujú v oscilačnom móde. Zvyčajne využívajú relatívne malé pohyby medzi permanentnými magnetmi (PM) a cievkou, ktorá využíva energiu z okolitých vibrácií. Oproti tomu rotačné generátory, pracujú rovnakým spôsobom ako veľkokapacitné magnetické generátory. Sú navrhnuté, tak aby pracovali s využitím rotačnej energie z malých turbín alebo tepelných motorov, ktoré poskytujú nepretržitý rotačný pohyb pri stálom krútiacom momente. Nakoniec hybridné zariadenia premieňajú lineárny pohyb na rotačný pohyb užitím nevyváženej polohy rotora. Na základe rôznych prevádzkových podmienok, energia generovaná rotáciou z týchto zariadení môže byť spojitá, rezonančná alebo chaotická. Niektoré typy malých elektromagnetických systémov generujúcich výkon boli vyvinuté za posledné desaťročie, ide teda o novodobý prístup inžinieringu. Ďalšie porovnanie týchto generátorov je popísané ďalej s príkladmi ku každému.

4.1 Rezonančný generátor

Rezonančné generátory zvyčajne pracujú na relatívne nízkych frekvenciách a teda nízkej hustote výkonov. Základ rezonančného generátora pozostáva z hmotnosti namontovanej k pružine (Obrázok 2), ktorá sa pohybuje relatívne ku základu, keď na ňu pôsobíme externou vibračnou silou. Mechanická energia pohybu závažia je transformovaná na elektrickú tým, že hmotnosť posunie magnet relatívne vzhľadom k cievke. Na dosiahnutie maximálneho vygenerovaného výkonu v týchto generátoroch by vstupné frekvencie vibrácií mali zodpovedať mechanickej rezonančnej frekvencii generátora.

V roku 1995, Williams a spol. na Univerzite Sheffield ako prvý navrhol jeden typ rezonančného generátora pre malé aplikácie [3]. Tento rezonančný generátor mal rozmery 5 mm x 5 mm x 1 mm. Z tohto zariadenia, sa podarilo vygenerovať 1 μ W výkonu s budiacou frekvenciou 70 Hz a 100 μ W pri 330 Hz. Neskôr na to, vytvorili generátor na tomto princípe. Obsahuje pružnú kruhovú membránu, ktorá bola na povrchu potiahnutá s 7 μ m vrstvou polyamidom. Magnet SmCo bol s rozmermi 1 mm x 1 mm x 3 mm a hmotnosť 2.4 mg prichytený na spodnú stranu membrány. Planárna cievka s 13. závitmi bola umiestnená na samostatnej

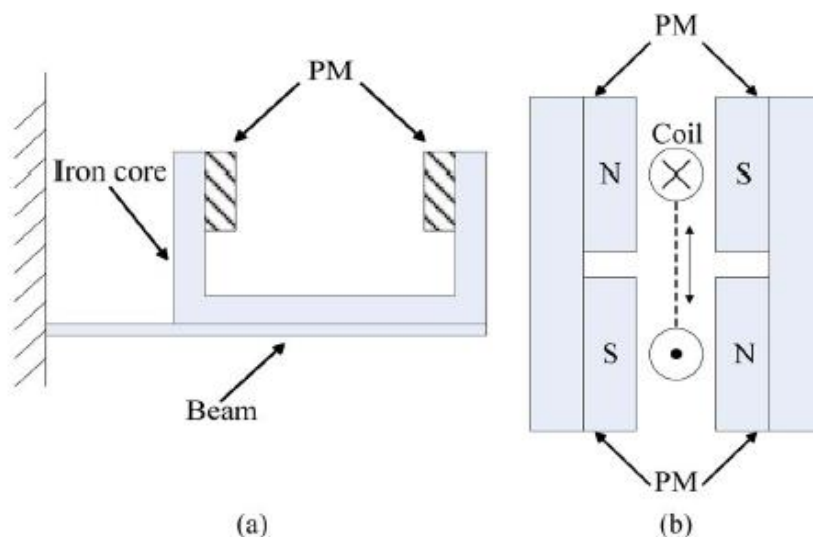
časti. Výsledky ukázali, že toto zariadenie by pri budení malo generovať $0,3 \mu\text{W}$ pri budiacej frekvencii $4,4 \text{ kHz}$ [4]. Konštrukciu tohto generátora možno vidieť na Obrázku 4. Podobný princíp takejto konštrukcie možno nájsť aj v publikácii [5].



Obr. 4 Schematické znázornenie elektromagnetického generátora (4)

Krátko potom sa vyvinulo množstvo zariadení aby zberali energiu založenú na ľudskom pohybe. Amirtharajah a Chandrakasan na MIT navrhli elektromagnetický generátor s priemerom $23,5 \text{ cm}^3$ [6]. Uvádza $400 \mu\text{W}$ vygenerovaného výkonu z 2 cm amplitúdy vibrácii pri 2 Hz a úspešne napájanie obvodu procesora. Tím z univerzity z Tokia skúmal prototyp generátora veľkého 500 cm^3 ktorý, využíva magnetickú spojku s premenlivou vzduchovou medzerou [7]. Tento jedinečný prístup je založený na metóde prepínania impedancie elektrického zaťaženia na udržanie optimálneho výstupného výkonu. Výstupný výkon 94 mW bol dosiahnutý pri frekvencii 6 Hz .

Obrázok 5 (a) znázorňuje dizajn rezonančnej konzoly nosníku, ktorý skúmal tím z univerzity z Southamptonu [8]. V jeho prevedení je pár NdFeB PM spojený železným jadrom, v tvare písmena U, aby sa zabezpečilo stabilné pole cez vzduchovú medzeru. Táto magnetická zostava bola umiestnená na konzole nosníku a vibrovala vzhľadom k stacionárnym vinutiám cievky. S amplitúdou vibrácií len $25 \mu\text{m}$ pri 322 Hz , zariadenie 240 mm^3 predstavovalo výkon $0,53 \text{ MW}$.

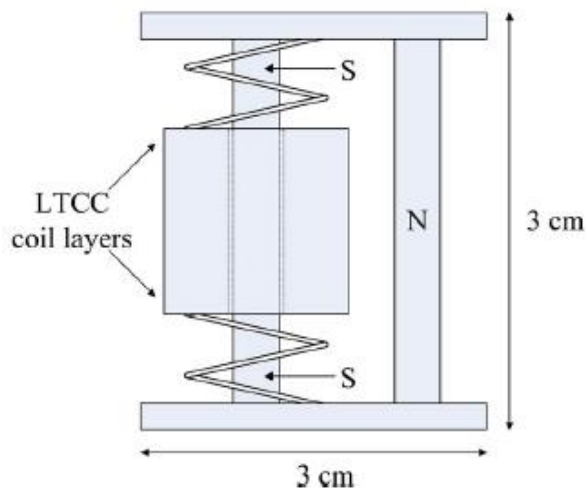


Obr. 5 Znáznornenie konštrukcie rezonančných generátorov [8]

Iný dizajn s veľkosťou 840 mm^3 a skladajúci sa zo štyroch PM dosiahol $157 \mu\text{W}$ vygenerovaného výkonu, ktorý je namontovaný na motorovom bloku vozidla [9]. Skupina z University of Illinois v meste Urbana-Champaign [10] navrhla batoh – generátor, jednotku poháňanú z ľudských pohybov. Energia je získavaná z centrálnej hmoty spôsobená chôdzou.

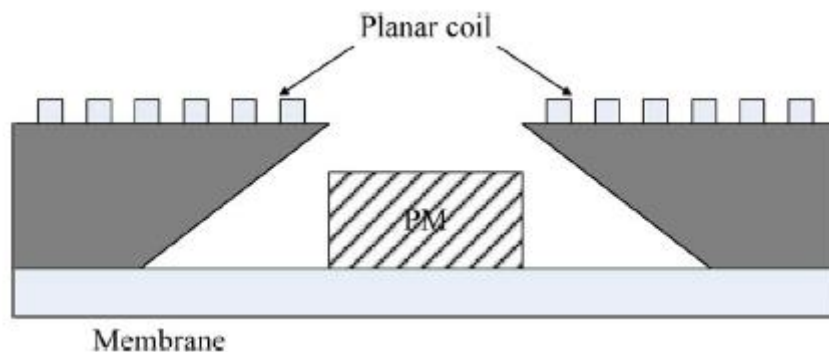
Štruktúra je veľmi podobná štruktúre na (Obrázok 5 (b)). Stator pozostával zo železa vyrobeného z elektrickej ocele a PM sú pripevnené na železe. Posuvník je plastový kotúč s medenou cievkou navinutou okolo neho. Pri chôdzi generátor umiestnený v batohu nasleduje pohyby ľudského ramena smerom hore-dole, takže pripojený posuvník generuje napätie naprieč cievkou. Prototypové zariadenie založené na tejto konštrukcii bolo s keramickými magnetmi pre experimentálne účely. Pri rôznych druhoch chôdze sa dosiahli výkony od 90 do 360 mW pri hmotnosti 1 kg.

Scherrer a kol. na Boise State University [11] skúmali možnosť použitia nízкотеплотnej keramickej viacvrstvovej (LTCC - Low Temperature Co-Fired Ceramic) cievky pre napájanie elektromagnetického energy harvestru. Priečný rez zariadením je znázornený na obrázku 6. Cievka pozostávala z 96 pásových vrstiev, ktoré obsahujú celkom 576 závitov. Je držaná medzi dvoma medenými berýliovými pružinami a pohyb je navrhnuté tak, aby sa pohybovala vertikálne pod vstupným budením, čím sa prerušia toky štyroch vonkajších magnetov. Pružiny odovzdávajú elektrickú energiu z cievky. Predpokladaný teoretický maximálny výstupný výkon je 7 mW pri prevádzke s rezonančnou frekvenciou 35 Hz.



Obr. 6 Bočný pohľad na EH zariadenie s LTCC cievkou a magnetmi [11]

Tím z univerzity v Barcelone, Španielsko [12], predstavil zariadenie, ktoré pozostávalo zo štruktúry dosiek s plošnými spojmi s hliníkovými zvitkami a bežného pohyblivého magnetu NdFeB namontovaného na membráne. Zariadenie je ukázané na obrázku 7. Prototyp generoval 0,2 μ W výkonu pri vibráciách 6,8 μ m a pri 360 Hz.



Obr. 7 Schéma generátora z univerzity v Barcelone [12]

Existuje už niekoľko komerčných produktov, ktoré využívajú rezonančné elektromagnetické systémy a bude ich stále pribúdať. Spoločnosť Perpetuum, predáva vibračný harvester so zdvihovým objemom 130 cm³, naladením na frekvenciu vibrácií 100 alebo 120 Hz

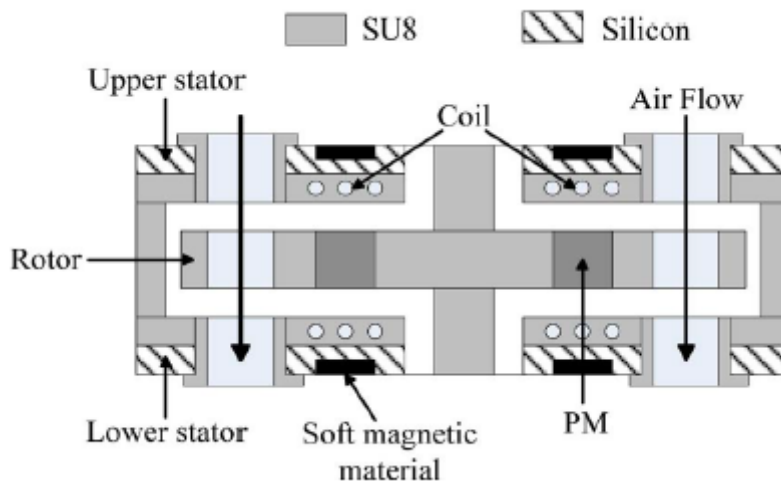
a dosahuje 4,5 mW pri vibráciách $0,98 \text{ m} / \text{s}^2$. Spoločnosť Ferro Solutions v USA ponúka podobný produkt s rozmermi 77 mm^3 , ktorý môže produkovať 10,8 mW pri vibráciách $0,98 \text{ m} / \text{s}^2$ pri 21 Hz.

4.2 Rotačný generátor

V porovnaní s rezonančnými generátormi sa rotačné generátory spoliehajú na stabilný zdroj rotačnej mechanickej energie (napríklad z turbíny poháňaného tekutinou alebo tepelného motora). Pretože majú relatívne menšiu veľkosť často pracujú pri vyšších rýchlostiach otáčania a tým aj pri vyšších frekvenciách v porovnaní s rezonančnými generátormi. Tieto vyššie rýchlosti umožňujú generátorom splniť alebo prekročiť hustotu výkonu [2].

V roku 1996 Wiegele navrhol planárny mikroturbogenerátor poháňaný plynom, určený na prevádzku ako generátor s prepínaným reluktančným výkonom [13]. Autori uvádzajú výkon 17 mW s požiadavkami najmenej $4.6 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} / \text{m}$ (normalizované cez hrúbku zariadenia) krútiaceho momentu, aby sa udržala konštantná rýchlosť, konštantný výstupný výkon a tlak zásobníka 29.7 kPa, čo malo za následok uhlovú rýchlosť 70 000 r / min. Prototyp turbíny s priemerom 3.5 mm bol vyrobený pomocou technológie Lithographie, Galvanoformung, Abformung (LIGA), v ktorej boli všetky štruktúry elektrolyticky pokovované. Tento dizajn by mohol pracovať rýchlosťou až 4.5 ot / min, ale nebol nikdy realizovaný.

Holmes a spol. [14] v spoločnosti Imperial College, vyvinul systém generovania elektrickej energie mikroturbíny s axiálnym prúdom využívajúcim generátor s PM. Priečny rez zariadením je znázornený na obrázku 8.



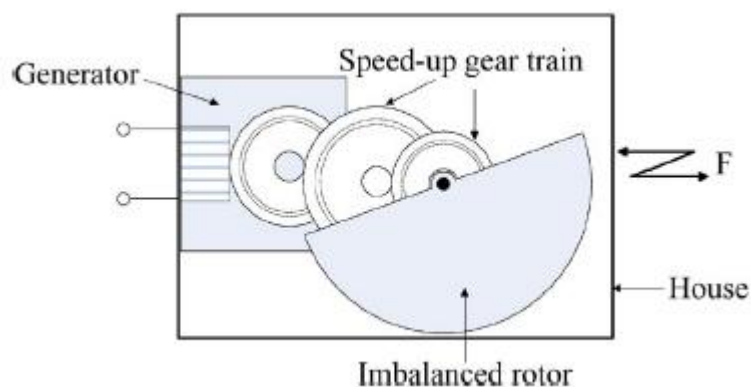
Obr. 8 Generátor s axiálnym tokom vzduchu [14]

Výrobný proces zahŕňal kremíkové mikroprocesovanie, viacvrstvové pokovovanie pre časti statora a laserové leptanie pre rotor SU-8. NdFeB PM s bežnými milimetrovými veľkosťami boli umiestnené v prototypovom zariadení v rotore SU-8 s priemerom 7.5 mm. Rotor, uložený v guľôčkových ložiskách, bol umiestnený medzi hornou a dolnou polovicou statora, ktorý má pokovované Cu vinutie. Po spustení do prevádzky vytvárali magnety časovo premenlivý magnetický tok na cievke statora. Celý stroj bol $0,042 \text{ cm}^3$ veľký a dosiahol 1,1 mW vygenerovanej energie na statore s rýchlosťou otáčania pri 30 ot / min, keď bol umiestnený v prúde vzduchu 35 l / min. Tento generátor mal hustotu výkonu až $26.2 \text{ mW} / \text{cm}^3$.

4.3 Hybridné generatory

Vibračné energy harvestre sú atraktívne, pretože môžu vyrábať energiu bez potreby hlavného zdroja (turbíny alebo motora). Aby sa však vytvoril maximálny výkon, rezonančné generátory pracujú iba s jednou konkrétnou frekvenciou a preto nie sú vhodné na časovo premenlivé frekvenčné vibrácie. Navyše mechanická rezonancia malých MEMS rezonátorov môže prekročiť rozsah prirodzene sa vyskytujúcich vibrácií (1 Hz-1 kHz). Preto sú potrebné nerezonančné generátory na použitie lineárnych vibrácií v širokom frekvenčnom spektre. To sa dá dosiahnuť použitím nevyváženého rotora, ktorý sa bude otáčať pri nútenej akcelerácii bodu zlomu. Tieto typy zariadení sa nazývajú hybridné generátory, pretože reagujú na rezonančný mechanický pohyb, ale vytvárajú energiu prostredníctvom rotačných strojov [2].

Automatický generátorový systém (AGS), zavedený v roku 1988 spoločnosťou Seiko v Japonsku, je dobre zavedenou hybridnou generátorovou technológiou určenou na napájanie náramkových hodín. Zariadenie je znázornené na obrázku 9. Ľudské pohyby spôsobujú nerovnomerné otáčanie rotora a prevodový stupňa zvyšuje rýchlosť otáčania o 100, aby sa mohol otáčať malý elektromagnetický generátor. Generátor obsahuje malý diskový PM, ktorý sa otáča v magnetickej armatúre, aby sa získal prúd vinutia cievky. Prúd je napravený a uložený do kondenzátora, ktorý dodáva elektrickú energiu na pohon časových obvodov a sledovanie pohybu ruky. Technické detaily nie sú široko dostupné, ale odhady naznačujú 5-10 μW priemernej výroby energie počas bežnej ľudskej činnosti.



Obr. 9 Princíp hybridného generátora (2)

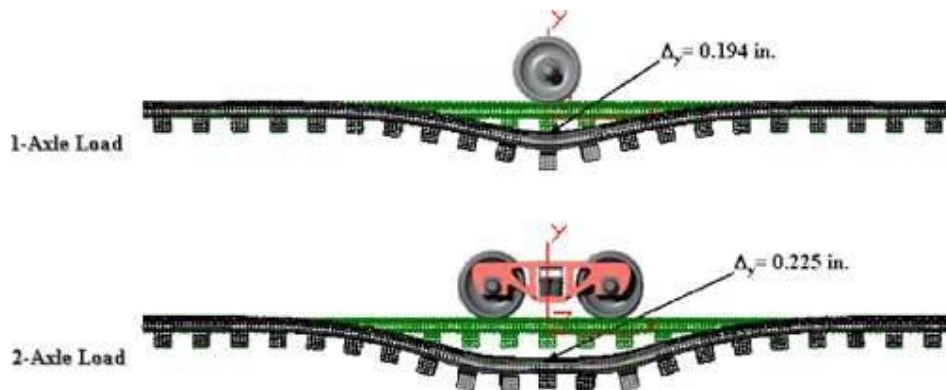
5 Generátory použité a testované pre prejazdy vlakov

V poslednej dobe sa spravilo veľké množstvo návrhov a prototypov hlavne s hybridnými elektromagnetickými generátormi. Za vidinou čo najlepšieho výkonu z týchto generátorov pri prejazde vlaku sa skúmalo niekoľko typov. Rozdiely sú len v prevodoch, ich kompaktnosti a s malými konštrukčnými odchýlkami, no princíp činnosti ostáva stále rovnaký.

V podkapitole 5.2 je priblížené iné riešenie, ktoré sa testovalo na vstupoch prejazdov vlakov s väčším množstvom dát, ktoré sa spracovali. Overovali setup rezonančné elektromagnetické zariadenie obsahujúce 4 rezonančné harvestre a setup magneticko-levitačný.

5.1 Hybridný MMR (mechanical motion rectifier) generátor

Práve už spomínané hybridné generátory sa v posledných rokoch začali testovať vo veľkom a hľadali sa nové princípy a patenty, ktoré by čo najlepšie využili vibrácie, práve z prejazdu vlaku, čo našou úlohou. Keďže nás zaujíma napájanie varovných signálov, prepínačov, systémov pre monitorovanie, pre tieto zariadenia potrebujeme 10-100 wattov. Výhoda týchto harvestrov je práve v tom, že vedia dobre zvládnuť nepravidelné pulzné vibrácie, ktoré nastávajú pri prejazde vlaku. Týmto vibráciám sa budeme venovať v ďalšej podkapitole. Tieto harvestre sa označujú ako MMR – mechanical motion rectifier. Ich patent efektívne premieňa tieto vibrácie na protismerný rotačný pohyb generátora. Uvádza sa efektívnosť pri vyšších frekvenciách až 60% [15]. Pre premenu na rotačný pohyb sa u týchto harvestrov používajú hlavne časti: držiak a pastorok, skrutka alebo hydraulický piest, mechanický zväčšovací systém, rotační elektromagnetický generátor, elektrický usmerňovač, regulátor výkonu a prvok pre ukládanie energie. Ukladá sa energia potrebná na pohybu hore a dole, tak ako je zaťažovaná koľajnica. Tento posuv je znázornený na obrázku 10.



Obr. 10 Ukážka ohybu koľajnice [15].

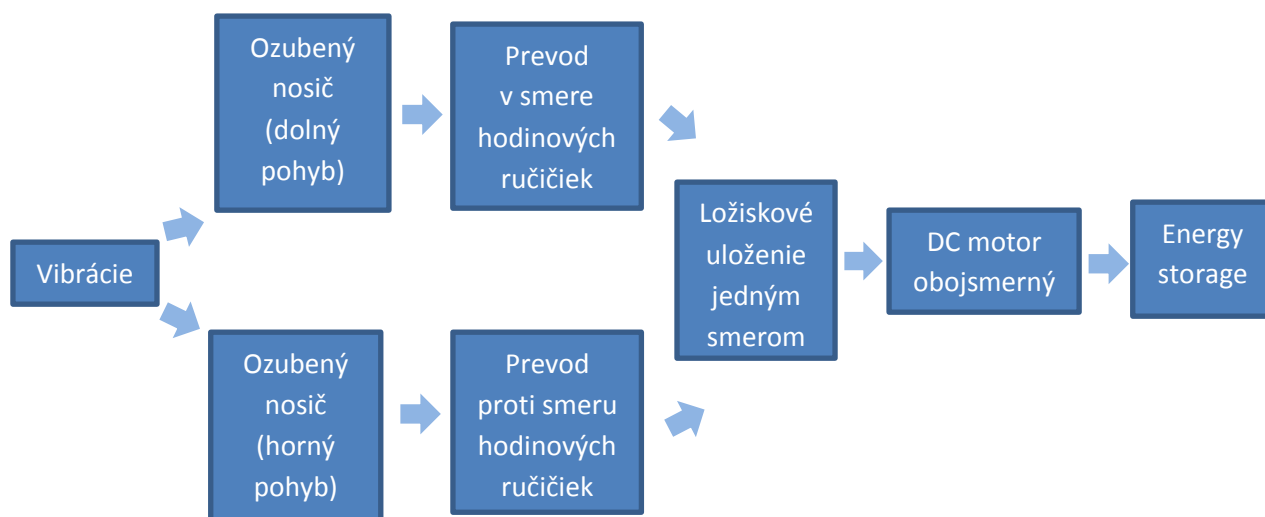
Rýchlosť, frekvencia a amplitúda posunu sú závislé na: záťaži pôsobenej vlakom, rýchlosťou, ktorou prejde vlak a štruktúrou základu, na ktorom sú uložené koľajnice. Priemerné posunutie koľajnice je okolo 7 mm až 12 mm. Najvyšší posun môže byť až 25 mm. Pre predstavu, vlak ktorý ide 64 km/h spôsobí vibrácie medzi 1 Hz až 4 Hz, čo je závislé na podvozku, ktorý práve prechádza [16].

MMR harvestre, ktoré boli zatiaľ navrhnuté, sa líšia usporiadaním, hlavne počtom ozubených kolies. Najjednoduchší prototyp takéhoto zariadenia ukazuje obrázok 11.



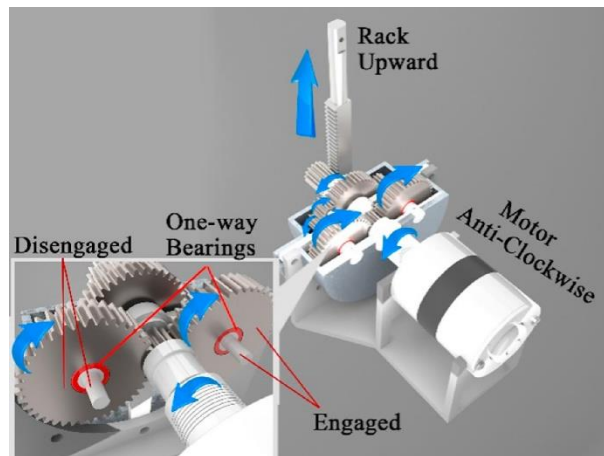
Obr. 11 Jednoduchý MMR energy harvester [17]

Princíp činnosti takýchto energy harvestrov vysvetľuje nasledujúca schéma.

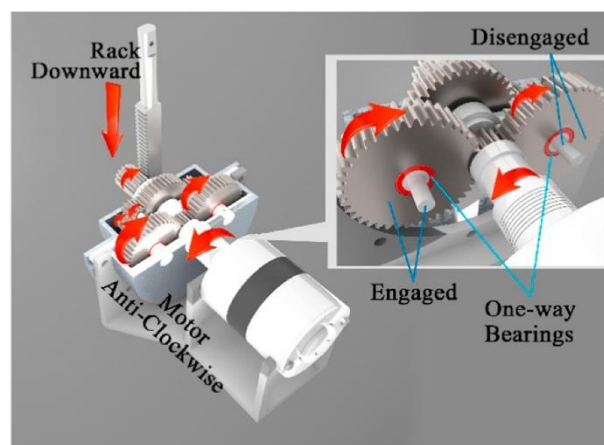


Podstata tohto systému spočíva v tom, že vplyvom pôsobiacich vibrácií, ktorých výchylka nemusí byť vždy veľká, sa dokáže prevodovým stupňom zväčšiť. Vibrácie sú prenášané cez ozubený nosič lineárneho pohybu (rack) na postorek (pinion), ktorý premení lineárny pohyb na rotačný. Ten je ďalej prenášaný pomocou prevodou, ozubených kolies (gears) na DC motor. Hlavnú úlohu zohráva zotrvačník, na ktorom sú umiestnené magnety a tie vplyvom pohybu indukujú napätie v cievke. Napätie cez usmerňovač napája DC motor.

Nasledujúce obrázky približujú mechanický princíp MMR energy harvestru. Kde je vidieť, že pri prejazde vlaku sa vertikálny nosič lineárneho pohybu posunie dole, je v pohybe iba ozubené koleso, ktorému je umožnený pohyb práve v tomto smere (Obrázok 13.). Čo je úlohou ložiska, ktorý sa točí len jedným smerom. Pri pohybe hore (Obrázok 12.) sa do záberu dostane druhé ozubené koleso. Tým je zaistené získavanie energie v oboch smeroch, s tým, že generátor sa otáča vždy jedným smerom.

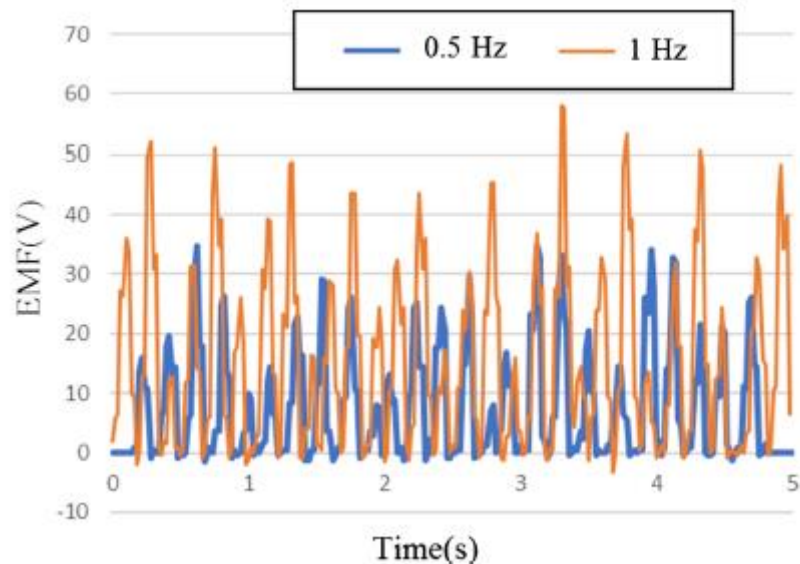


Obr. 12 Pohyb vertikálneho nosiča hore (17)



Obr. 13 Pohyb vertikálneho nosiča dole [17]

Z tohto MMR harvesteru, ako ukazuje obrázok 14., sa získalo pri vstupnej amplitúde 2.5 mm a frekvenciách 0.5 Hz a 1 Hz nasledujúcich hodnôt EMS (Elektromotorická sila). Pri oboch frekvenciách sa použilo zaťaženie 3 Ohmov. Špičkové napätie pri 1 Hz dosahuje 58V a uvádzajú priemerný výkon až 12.07W [17]. Pre tieto systémy je veľmi dôležitý prvok, uloženie energie, kvôli napájaniu signalizačných aplikácií. V tomto prípade používajú superkapacity.



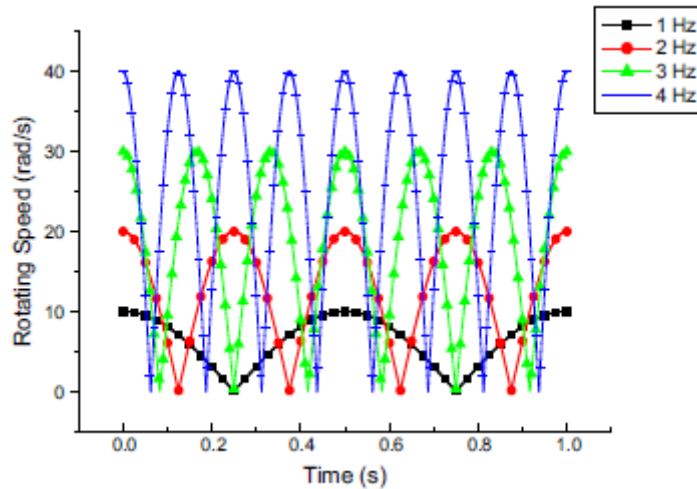
Obr. 14 Experimentálne výsledky pre 0.5 Hz a 1 Hz (17)

Cieľom ďalšej štúdie [18] bolo vyvinúť elektromagnetický harvester (Obr. 15), ktorý bude vysoko účinný, prenosný, spoľahlivý a jednoduchý. Princíp je úplne rovnaký ako v prípade predchádzajúceho. Hlavne nás zaujíma účinnosť a ostatné výsledky s iným prevodovým pomerom. Z hľadiska spoľahlivosti, hlavne, čo sa týka použitého motora pre výrobu elektrickej energie, boli použité v tomto prípade bezkartáčové DC motory, ktoré sú kompaktné, jednoduché a s dobrou životnosťou. Treba sa zamyslieť aj nad tým, že len pri prejazde vlaku je generovaná energia, rýchlosti sú rôzne a tým pádom dostávame aj rôzny výstupný prúd, ktorý nie je vhodný pre signalizačné aplikácie ani pre nabíjanie batérie. Preto musí byť zapojený regulačný obvod.

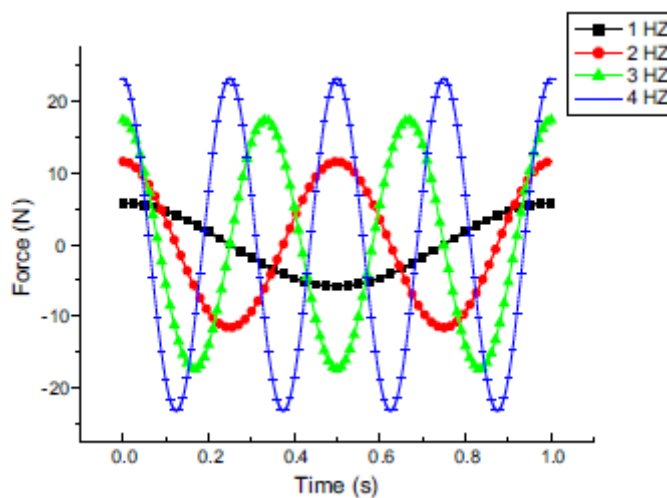


Obr. 15 Prototyp [18]

Pri testovaní tohto prototypu sa dosiahlo účinnosti 55.5 % [18]. Zistilo sa, že ak moment rastie s prevodovým stupňom, rastie aj vstupná a výstupná energia. Graf na obrázku 16 ukazuje ako sa mení rotácia pri zmene frekvencií a graf na obrázku 16 zas externú silu pôsobiacu na hriadeľ.

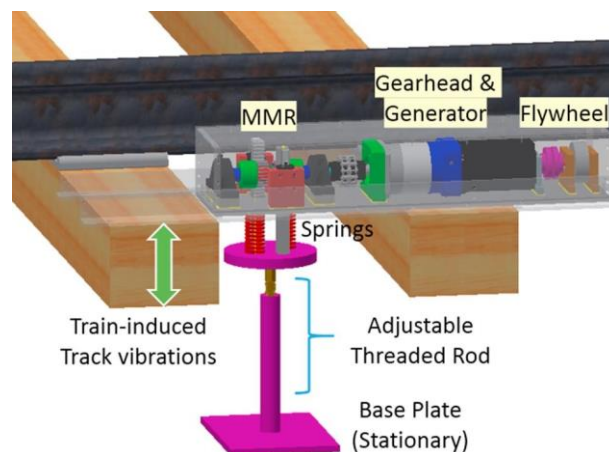


Obr. 16 Rýchlosti otáčania výstupného hriadeľa pri rôznych rýchlostiach [18]



Obr. 17 Externá sila [18]

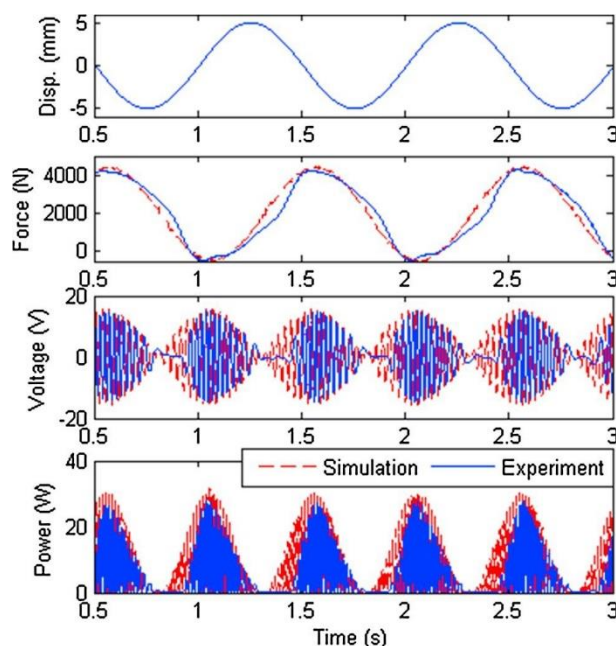
Ďalším typom MMR harvestra je s pridaním mechanizmu s pružinou, ktorá je voľná alebo je predpätá. Tento mechanizmus slúži na rýchlu montáž a aby sa nezasiahlo to základu koľají a tým do pevného základu štruktúry. Tento návrh ukazuje obrázok 18.



Obr. 18 Pohľad na neukotvený energy harvester MMR [19]

Celý mechanizmus nie je ukotvený v základe podložia koľajníc alebo len položený. Kde keď prejde vlak, vytvorí sa relatívny posun smerom dole, čo stlačí pružiny, v ktorých sa

naakumuluje energia a následne po prejazde vlaku pohyb pružín naspäť prenesie túto energiu do prevodu. Podrobný matematický popis tohto modelu je v publikácii [19]. Simuláciami sa zistilo, že tuhosť pružiny je výrazne vyššia pri malom odpore zátäži, čo vedie k zvýšeniu elektrickej tlmiacej sily.



Obr. 19 Výsledky testu pri 5 mm a 1 Hz sínusovom vstupe[19].

Pre test tejto sústavy sa použilo hydraulické zariadenie, ktoré hydraulickým aktuátorom poháňalo základnú časť, na ktorom je uložený mechanizmus bez kotvy, so silou do 100kN. Výsledky tohto testu znázorňuje obrázok 14, kde je vidieť porovnanie aj so simuláciou. Budenie bolo sínusové s 5 mm amplitúdou a s frekvenciou 1 Hz. Zátäž sa použila s hodnotou 8 Ω a tuhosťou pružiny 47,284 N/m. Takto zostavený test sa použil aj pre ďalšie zátäže a frekvencie. Sumarizáciu týchto testov ukazuje tabuľka 1.

Zátäž	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
	Priemerný výkon [W]			
2 Ω	9.9	22.5	33.9	48.4
8 Ω	20.7	57.5	79.4	96.3
16 Ω	13.8	40.8	61.2	73.5
50 Ω	5.1	12	15.9	39
2 Ω	37.2	78	116.7	139.8
8 Ω	30.7	101	169	196.5
16 Ω	21.5	82.8	119.4	142.5
50 Ω	11.7	27.7	41	51.2

Tab. 2 Hodnoty výsledkov testov (19)

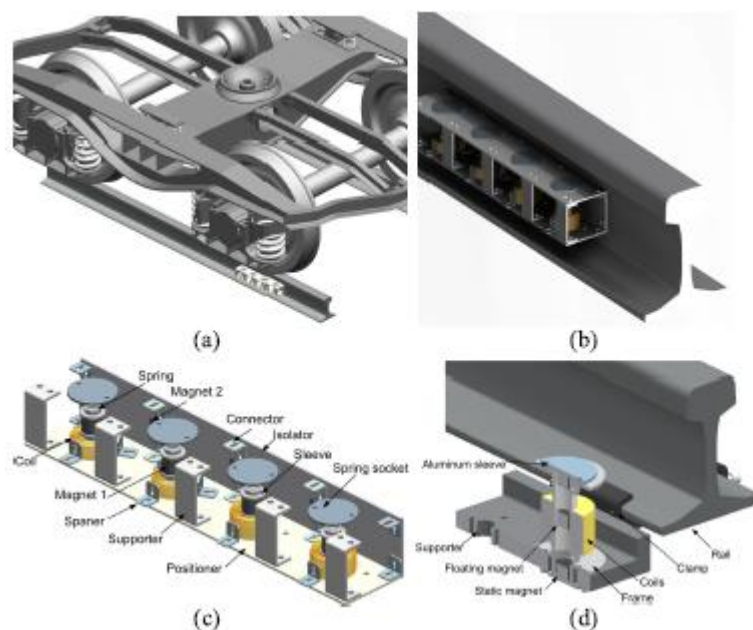
Ako je vidieť z tabuľky 2, najlepšie hodnoty výkonu sa dosahuje pri zátäži 8 Ω .

MMR energy harvestre v dnešnej dobe pútajú pozornosť pre ich výhodné vlastnosti. Zabezpečujú stálejší výkon, ich rozmery vedia byť postačujúco malé, aby sa použili napríklad aj v biomechanike a teda aj v medicíne, kde stály výkon je potrebný pre napájane životne dôležitých zariadení implementovaných v ľudskom tele. Vďaka tomu, že vedia zvýšiť aj pôsobenie vstupných amplitúd sú výhodné aj v aplikáciách kde je potrebný väčší výkon. Nevýhodou týchto harvestrov je v trení, ktoré je všade, pretože jednotlivé komponenty na seba

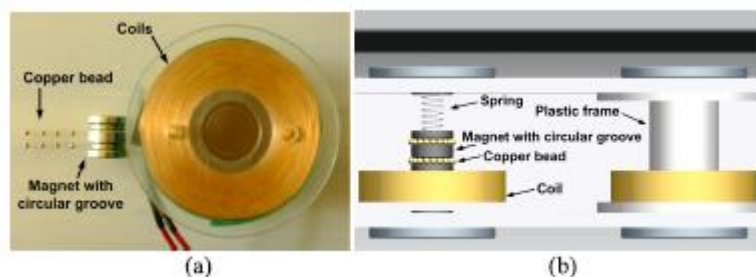
prenášajú svoju energiu cez dotyk a tým sa množstvo energie premení na tepelnú energiu vplyvom trenia ako pre nás potrebnú elektrickú na výstupe. Preto sa znižuje účinnosť, hlavne kde je veľa prevodov. Z tohto hľadiska sú výhodnejšie jednoduchšie zariadenia. Veľkou výhodou, prečo sú tieto harvestre používané v našej problematike pri prejazde vlaku, je získať dostatočnú efektívnu energiu aj z nepravidelných pulzných vibrácií.

5.2 Inovatívny energy harvester

Nasledujúca publikácia [20] popisala zaujímavé riešenie pre získanie energie z prejazdu vibrácií. Kde použili 5 setupov, z toho 4 sú rezonančné zariadenia a jedno magnetické levitačné zariadenie. Elektromagnetický rezonančný harvester je spojený tromi pravouhlými magnetmi na železnici. Ako je znázornené na obr. 20 a obr. 21, rezonančný harvester sa skladá z magnetov, cievky (coil), pružiny (spring), konektoru (connector), izolátoru (isolator), úchytovej (spanner), podložky (supporter), puzdra (sleeve), pružinovej zásuvky (spring socket) a polohovača (positioner). Izolátor je vyrobený z hliníka, slúži ako tienenie medzi magnetmi a oceľovými koľajnicami. Obe strany prameňov sú upevnené do pružinové zásuvky a puzdra; obzvlášť pružina aby bola dosiahnutá nízka frekvencia/ rezonancia. Magnetický levitačný harvester sa skladá zo statických magnetov, „plávajúcich“ magnetov, hliníkového puzdra, viacvrstvej cievky, spodná svorka koľajnice a skrutky. Obr. 2 ukazuje konštrukciu harvestru kde medené guľôčky sú axiálne uložené v drážke, zaisťuje radiálne opretie. Riešenie zaisťuje jednosmerný pohyb magnetov vzhľadom k cievke.

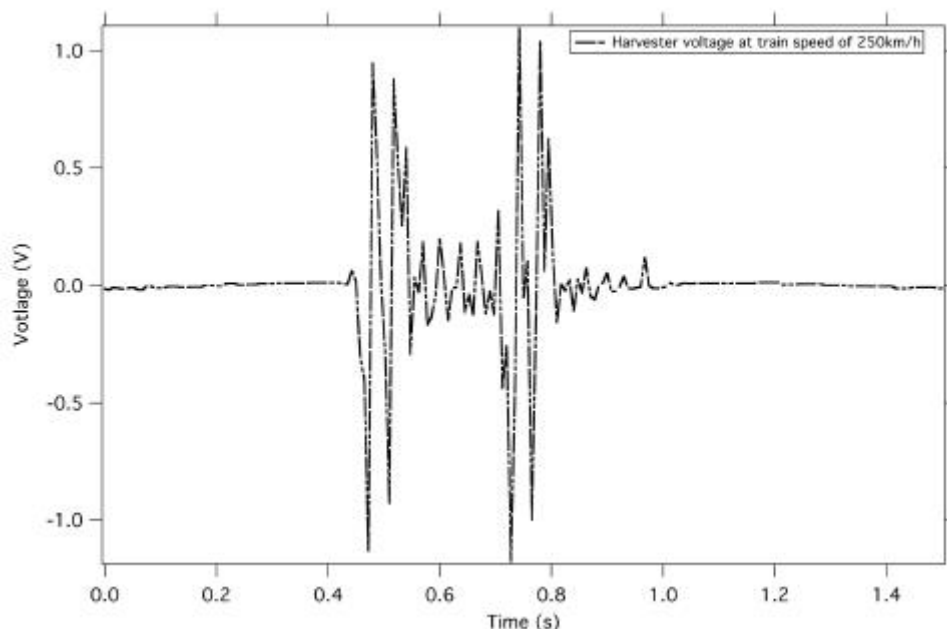


Obr. 20 (a-c) ukážka uloženia sa zostavy magnetických rezonátorov; (d) umiestnenie a zostava magnetického levitačného zariadenia [20]

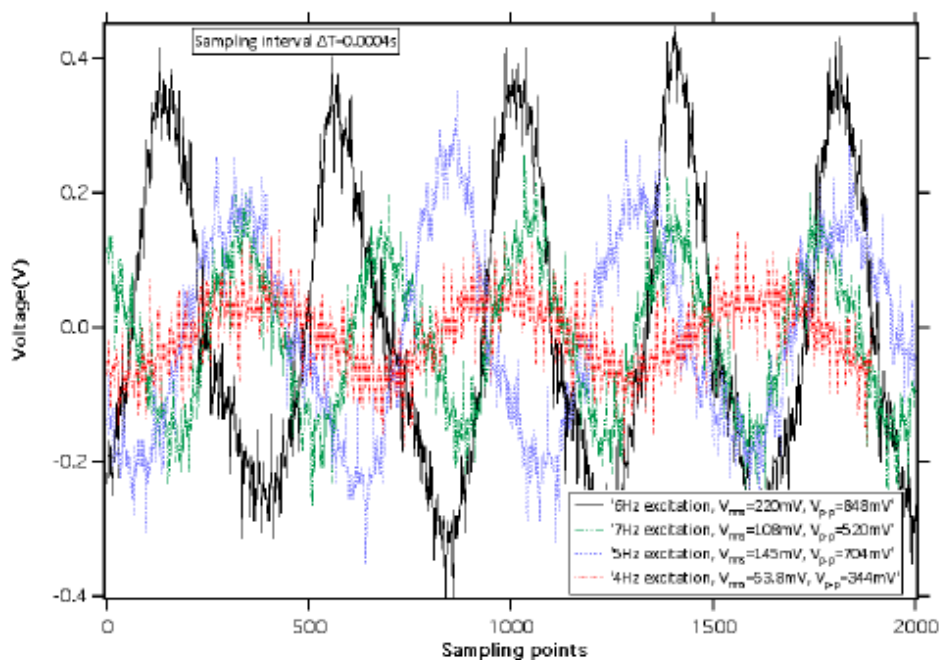


Obr. 21 (a) prototyp jedného setupu (b) a jeho schematické znázornenie(20)

Z testov s využitím Fourierovej rady sa dosiahlo nasledujúcich výsledkov (Obr.22 a Obr. 23). špičkové napätie dosahuje 2 V s počtom závitov cievky 5000. Zaťaženie, ktoré pôsobí na harvester je z prejazdu vlaku rýchlosťou 250 km/h. Meranie sa previedlo na 1 rezonačnom setupe, kde sa menili frekvencie 4 Hz (červené hodnoty), 5 Hz (fialové hodnoty) a 7 Hz (zelené hodnoty). No maximálneho napätie sa dosiahlo pri 6 Hz (čierné hodnoty). RMS v tomto prípade je 220 mV [20].

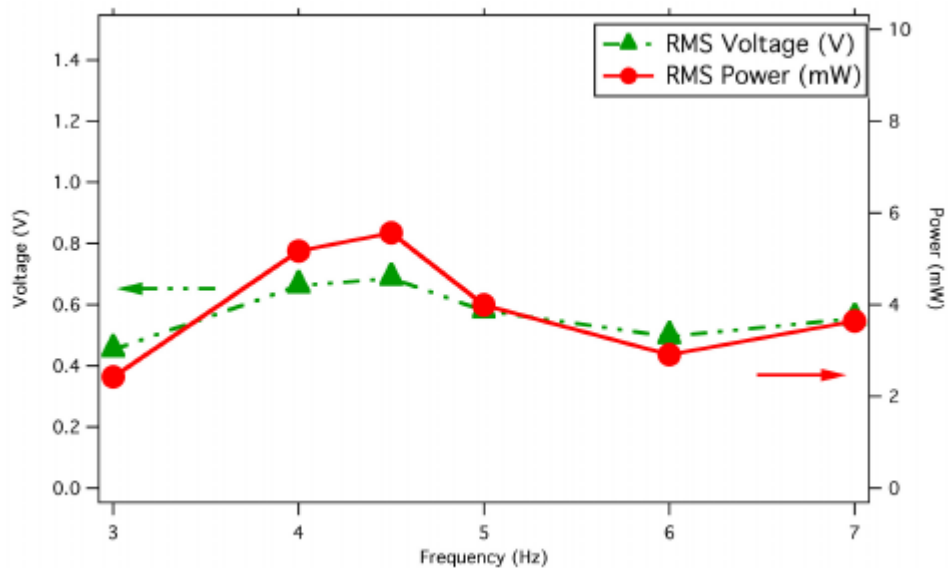


Obr. 22 Priebeh napätia elektromagnetického harvestra [20]



Obr. 23 Indukované napätie [20]

Na magnetickom levitačnom zariadení po prevedení testu dosahujeme RMS výkon a napätie ako znázorňuje obrázok 23. RMS výstupné napätie sa pohybuje medzi 0.4 V až 0.7 V [20].

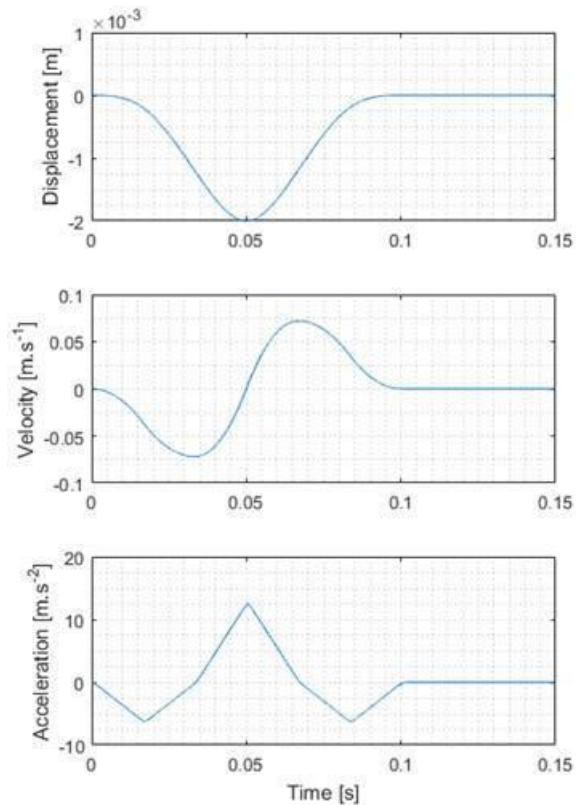


Obr. 24 Napätie a výkon zo zariadenia magnetickej levitácie [20]

Tento typ elektromagnetického harvestru bol prispôsobený pre nízke frekvencie. Nová konštrukcia medených guľičiek zabezpečila pohyb magnetov v jednom smere. Čiže výhodou tohto návrhu je, že je navrhnutý pre nízke frekvencie a tým aj nízke posuny koľajníc.

5.3 Problematika kinematického budenia prejazdu vlaku

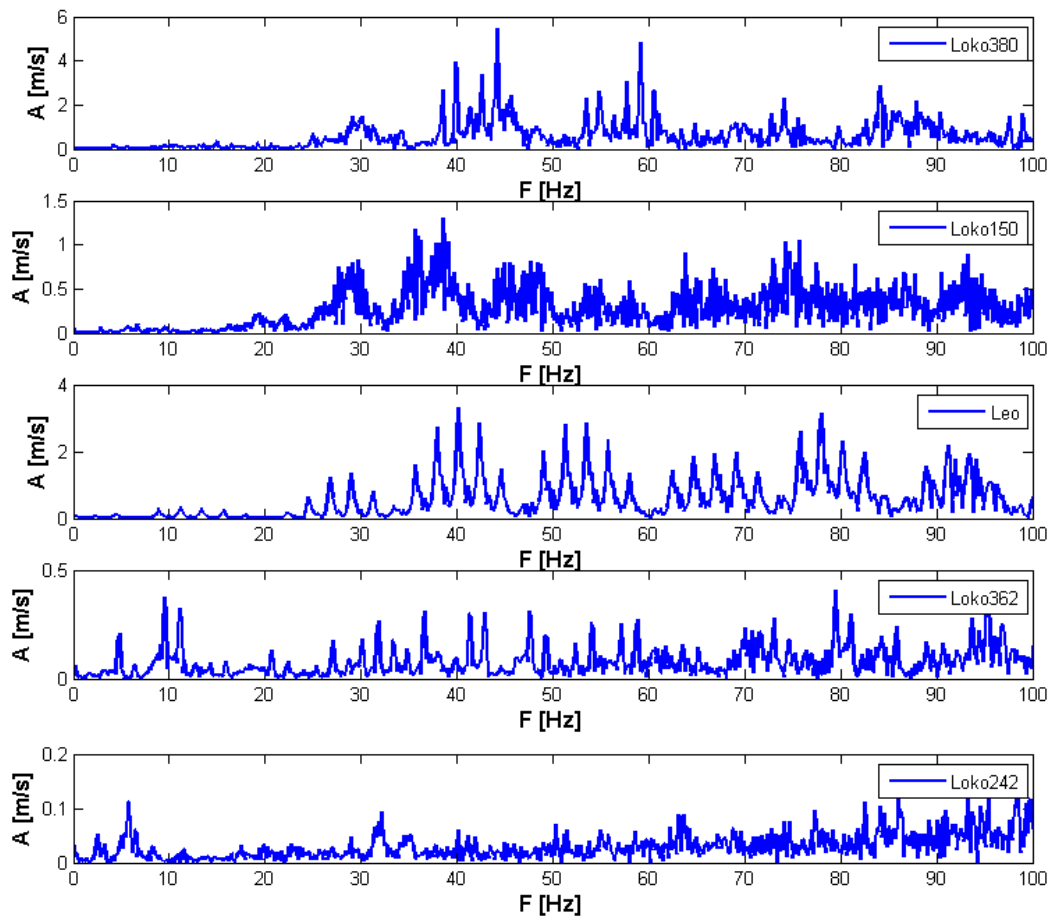
To ako sa bude správať generátor na základe prejazdu, odpovedá typu budenia. V našom prípade ide o typ budenia, ktorý je stochastický a má charakter pulzu. Takýto typ budenia nie je najlepší, keďže chceme napájať signalizáciu pohybu vlakov pretože nemáme stále napätie a keď už prechádza vlak nastávajú pulzy spôsobené podvozkom. Takto získané napätie sa musí usmerňovať a filtrovať. Príklad ako vyzerá zrýchlenie, ktoré spôsobuje prejazd vlaku je na obrázku 25. Kde vidieť ako ideálny priebeh vytvorí akceleračnú pílu. Jej profil a šírka je závislá na rýchlosti prejazdu vlaku.



Obr. 25 Tvar zrýchlenia na základe priehybu koľajnice

Odozvu rezonátora na základe dopravných frekvencií opakujúcimi pulzmi je popísaná v publikácii [21]. Táto analýza je prevedená na „propagating wave“ modeli. Dopravné frekvencie sú zložené superpozíciou nekonečného počtu súvislých sínusoviek a kosínusoviek, charakterizované frekvenciami a amplitúdami dané ich Fourierovým členom. No len niektoré frekvencie sú v efektívnej šírke pásma rezonátora. Pre problematiku vstupných dát z prejazdov vlaku je dôležitá aké je závislosť odozvy na šírke pásma, dĺžke pulzu a opakovateľnosť pulzov. A práve táto publikácia dokázala, že odozva veľmi záleží na efektívnej šírke pásma. Najviac vyťažíme ak trafíme presnú šírku pásma a trvanie pulzu. Opakovateľnosť pulzov nemá taký veľký vplyv.

V rámci štúdie dát z prejazdov vlakov, ktoré poslúžia pre otestovanie model v rámci tejto diplomovej práce, sa spravila FFT analýza. Z piatich dát, ktoré tri sú namerané na mieste výhybky a dve z miesta pražca sa vyhodnotilo frekvenčné spektrum, pre predstavivosť aké dominantné frekvencie sú k dispozícii. Toto spektrum znázorňuje obrázok 26, kde prvé 3 grafy sú pre výhybku a druhé dva pre pražec. Je vidieť, že v prvých troch prípadoch sa dominantné frekvencie vyskytujú, až pri frekvenciách 30 až 40 Hz. V ostatných dvoch vidieť dominantné frekvencie pri nižších hodnotách a to v rozmedzí 3 až 10 Hz. Keďže koncepcia navrhnutého elektromagnetického generátora je myšlená pre miesto na pražci, budeme sa chcieť dostať s vlastnou frekvenciou generátora práve do týchto hodnôt.



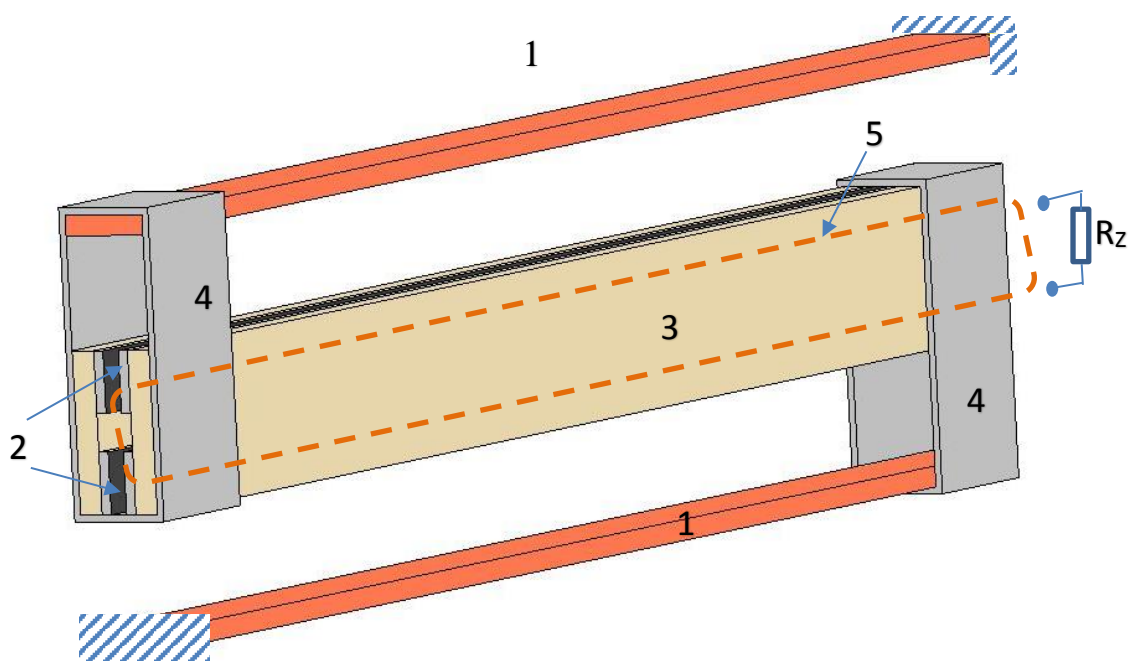
Obr. 26 Amplitúdo-frekvenčné spektrum z dát prejazdov vlakov

6 Analýza konštrukčného riešenia rezonančných generátorov

V prípade našej problematiky sa musíme zamyslieť nad tým, aby daný generátor bol schopný vyprodukovať energiu zo vstupu, čo predstavuje prejazd vlakov. Čo predstavuje podstatný problém. Dôvod je široká škála vstupov pri prejazdoch vlakov. Každý vlak totiž môže ísť rôznou rýchlosťou, môže mať inú hmotnosť, hlavne nákladné vlaky majú vyššiu hmotnosť. Iné rázy spôsobujú vozne a iné rušne. Tiež treba brať zreteľ aj na podložie na akom sú koľaje umiestnené. Je množstvo faktorov, ktoré ovplyvňujú samotné vibrácie, ktoré budú pôsobiť na generátor. Na základe meraní sa prišlo k záveru, že vibrácie vyprodukované vlakmi, sa vyskytujú v nižších frekvenciách, nemajú harmonický charakter a môžeme ich zaradiť do pulzných vibrácií. V rámci tohto poznatku, budú pre nás prekážkou tieto vstupy.

6.1 Generátor s lineárnou tuhosťou

Ako prvý generátor, sme skúmali lineárny generátor, ktorého konštrukcia sa skladá z dvoch rezonujúcich nosníkov (1). V strede nosníkov je sústava predstavujúca hlavnú vibračnú hmotu s magnetmi (2) a medzi magnetmi je navinutá cievka (5), ktorá je stacionárne uložená. Pohybujú sa len magnety, ktoré sú nalepené v páse pozdĺž pásovín (3). Cievka tvorí budiaci obvod, ktorý je napojený na záťaž. Táto sústava je uchytená objímkami (4) k nosníkom. Túto konštrukciu vidieť na obrázku 27.



Obr. 27 Konštrukcia elektromagnetického generátora

Pre zistenie, či táto konštrukcia je vhodná pre naše použitie, ju musíme popísať matematickými rovnicami a vďaka nim, ju môžeme nasimulovať v simulinku a pozrieť sa na výsledky, ktoré z tohto matematického modelu dostaneme.

6.1.1 Matematický popis lineárneho modelu generátora

Pre popis tohto modelu použijeme rovnicu (1), ktorá vychádza zo sústavy s jedným stupňom voľnosti a popisuje pohyb našej sústavy. Ako bolo spomenuté v kapitole 3.2.1 pre systém je priradený faktor kvality $Q = 50$. Nasledujúce parametre popisujúce model vypočítame nasledujúcimi vzťahmi.

$$b = b_m + b_e \quad (2)$$

$$b_m = b_p 2m\Omega \quad (3)$$

kde: b_m predstavuje mechanické tlmenie

b_p pomerný útlm, ktorý sa vypočíta ako $b_p = \frac{1}{2Q}$

Ω je vlastná frekvencia, ktorá sa vypočíta $\Omega = 2\pi f$

$$k = m\Omega^2 \quad (4)$$

kde: k tuhosť sústavy

m hmotnosť sústavy

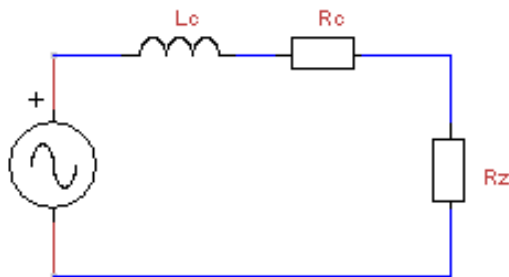
Keďže, ide o elektromagnetický generátor, zavádzame elektromagnetický coupling koeficient označený ako c_{Fe} . Tento koeficient je vyjadrený ako $c_{Fe} = NBl$. Označenie N je pre počet závitov cievky, B je priemerná magnetická indukcia a l je dĺžka cievky. V našom prípade je dĺžka dvakrát väčšia. Spomínané elektrické tlmenie b_e spôsobené vplyvom pohybu cievky v magnetickom poli, sa vypočíta podľa vzťahu:

$$b_e = \frac{c_{Fe}^2}{R_c + R_z} \quad (5)$$

ktorý je uvedený v publikácii (22) (označené ako c_e). Potom pre elektromagnetický generátor dostávame vzťah:

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx + ic_{Fe} = -m\dot{y} \quad (6)$$

kde prúd i dáva silu, ktorá pôsobí v opačnom smere ako relatívny pohyb, ako udáva Lenzovo pravidlo. Prúd i dostaneme na základe uplatnenia Kirchoffovéhó zákona v elektrickom obvode elektromagnetického generátora znázorneného na obrázku 28.



Obr. 28 Elektrický obvod generátoru

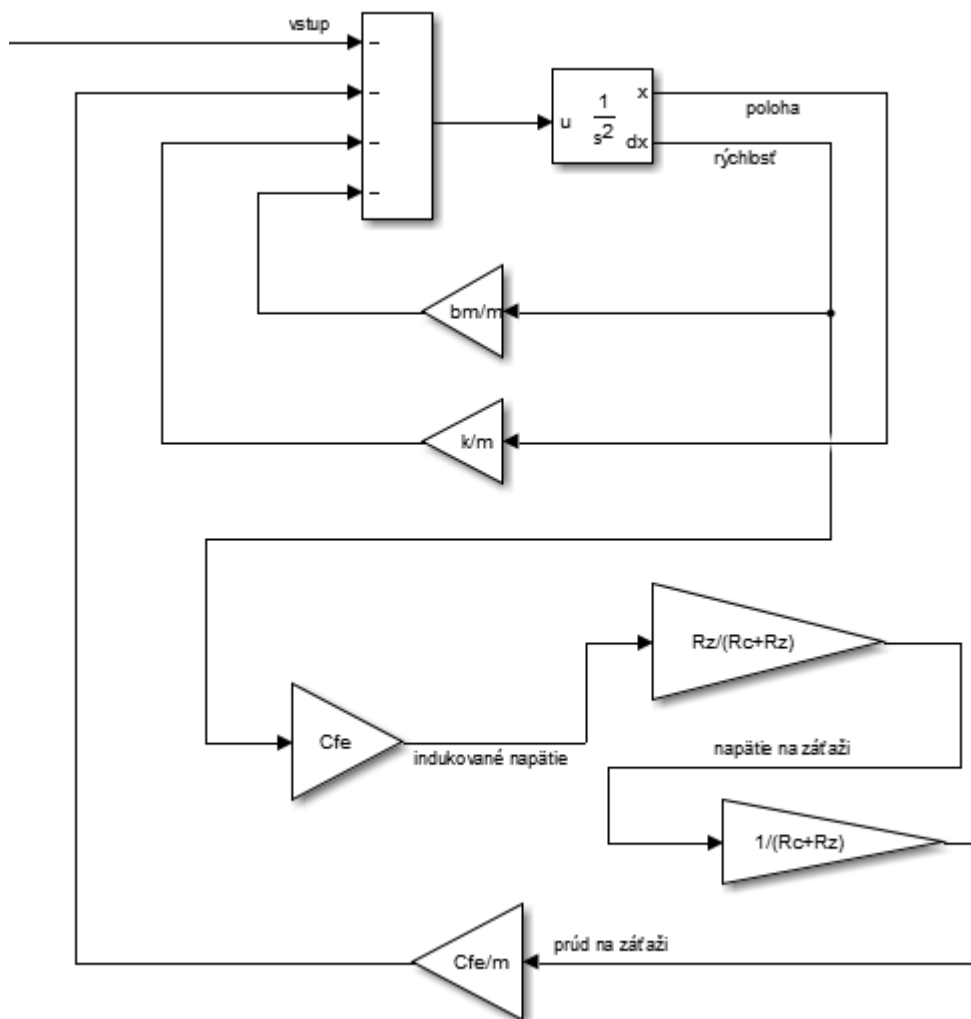
Pre tento obvod dostávame rovnicu, pri podmienke $L_c = 0$ platí:

$$i(R_c + R_z) - u_i = 0 \quad (7)$$

kde $u_i = NBl\dot{x} = c_{Fe}\dot{x}$, R_c je odpor cievky a R_z odpor pripojenej záťaže, potom

$$i = \frac{c_{Fe}\dot{x}}{R_c + R_z} \quad (8)$$

Po aplikácii rovnice (6), pre popis elektromagnetického generátora, vytvoríme model v simulinku ako je možnosť vidieť na obrázku 29.



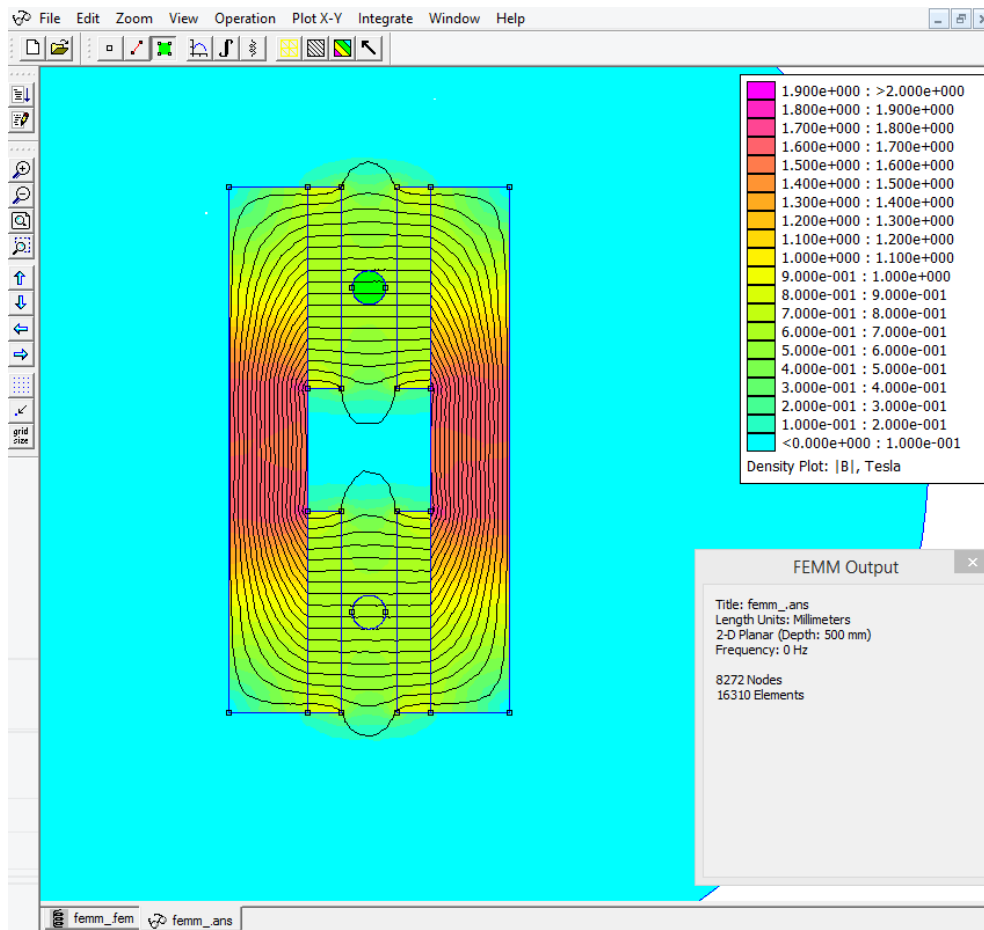
Obr. 29 Elektromagnetický model generátora v simulinku

Takto zostavený model bude pre nás základom, pre simulovanie výsledkov.

6.1.2 Výpočet magnetickej indukcie B

Ďalšia otázka pri zostavovaní modelu a zadávaní parametrov, je veľkosť priemernej magnetickej indukcie B . Pre zistenie magnetickej indukcie budeme pracovať s programom FEMM, kde si zostavíme geometriu (Obr. 30) podľa navrhutej konštrukcie a sa zistí akú

priemernú magnetickú intenzitu možno získať z takejto zostavy. Táto intenzita sa zisťuje v bode, kde sa bude nachádzať cievka. Keďže tento program možno priamo spúšťať, pomocou daných príkazov cez MATLAB, tak je vytvorený skript, ktorým sa spustí FEMM, nakreslí sa daná geometria a následne sa vypočíta priemerná magnetická indukcia. Pri tomto výpočte magnetickej indukcie treba dávať pozor aby nedošlo k nasýteniu železa.

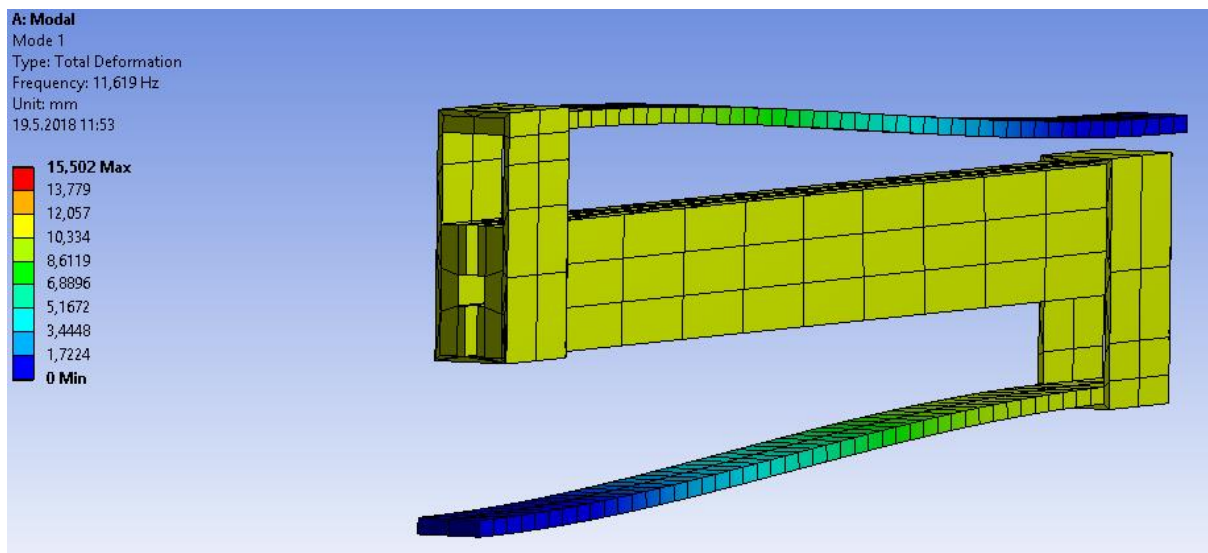


Obr. 30 Prostredie FEMM pre výpočet mag. Indukcie

Z hľadiska výrobitelnosti samotného generátora, sa budú musieť viaceré magnety poskladať vedľa seba aby sa vyrobil pás magnetov. Čo sa týka cievky, tak sa použije 0.3 mm medený drôt, čo môže pri takomto priemere ovplyvniť faktor plnenia pri navíjaní cievky.

6.1.4 Vlastná frekvencia

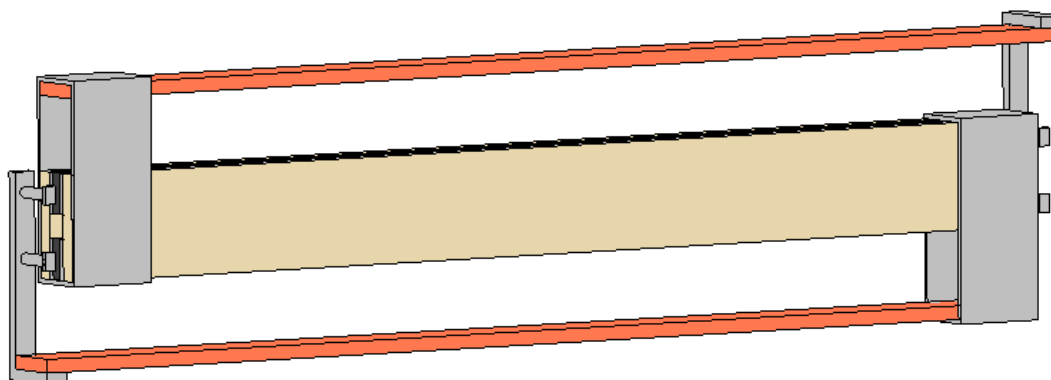
Po návrhu konštrukcie, sa musí otestovať vlastná frekvencia tejto sústavy. Pre zistenie vlastnej frekvencie sa použil ANSYS-Workbench, ktorý obsahuje modálnu analýzu. Celá geometria sa nahrala z Inventoru do Workbenchu, kde sa sledovali vlastné frekvencie. Zaujímali nás hlavne nízke frekvencie. Preto sa hľadala bilancia tuhosti a hmotnosti sústavy aby sme dostali čo najnižšiu vlastnú frekvenciu. Nakoniec sme sa dostali, v prípade prvého vlastného tvaru (Obr. 31), na hodnotu 11.616 Hz.



Obr. 31 Vlastná frekvencia prvého vlastného tvaru

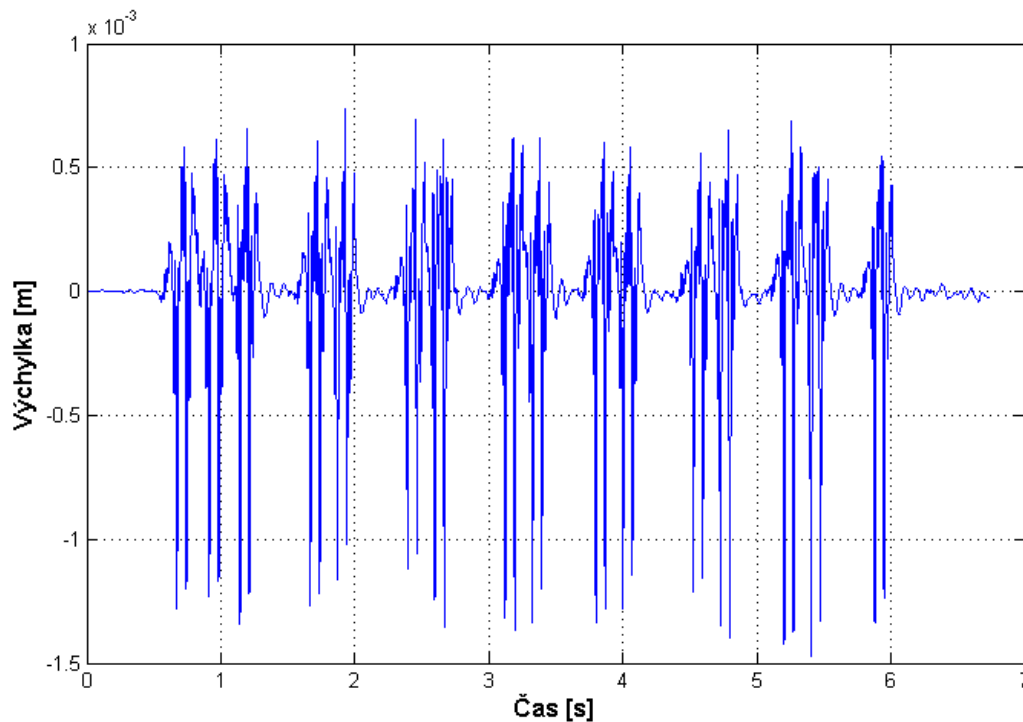
6.1.5 Hľadisko výrobitel'nosti

Z hľadiska výrobitel'nosti sa musíme zamyslieť aj nad reálnymi faktormi, ako je napríklad to, ako sa budeme vedieť čo najlepšie umiestniť cievku, ktorá má byť stacionárna. To sa dá vyriešiť jednoduchým návrhom ako je vidieť na obrázku 32. Kde sa pridajú len držiaky cievky po stranách, ktoré budú uchytené v mieste pevného umiestnenia nosníka.



Obr. 32 Konštrukcia s držiakom

Pri predstave reálnej sústavy treba pomyslieť aj na fakt, že sa vplyvom gravitačného pôsobenia pod svojou váhou konštrukcia prehne. Tento prípad vieme tiež overiť vo Workbenchi static structure analýzou, kde zadáme pôsobenie gravitácie a výsledkom je posun konštrukcie. Najvyššia posun je takmer 1.4 mm a priemerné posunutie zodpovedá hodnote 1.2343 mm. Pri určovaní normálového napätia na našu sústavu za pôsobenia gravitácie, sa zistilo maximálne napätie 11.086 MPa, čo možno vyhodnotiť za bezpečné.

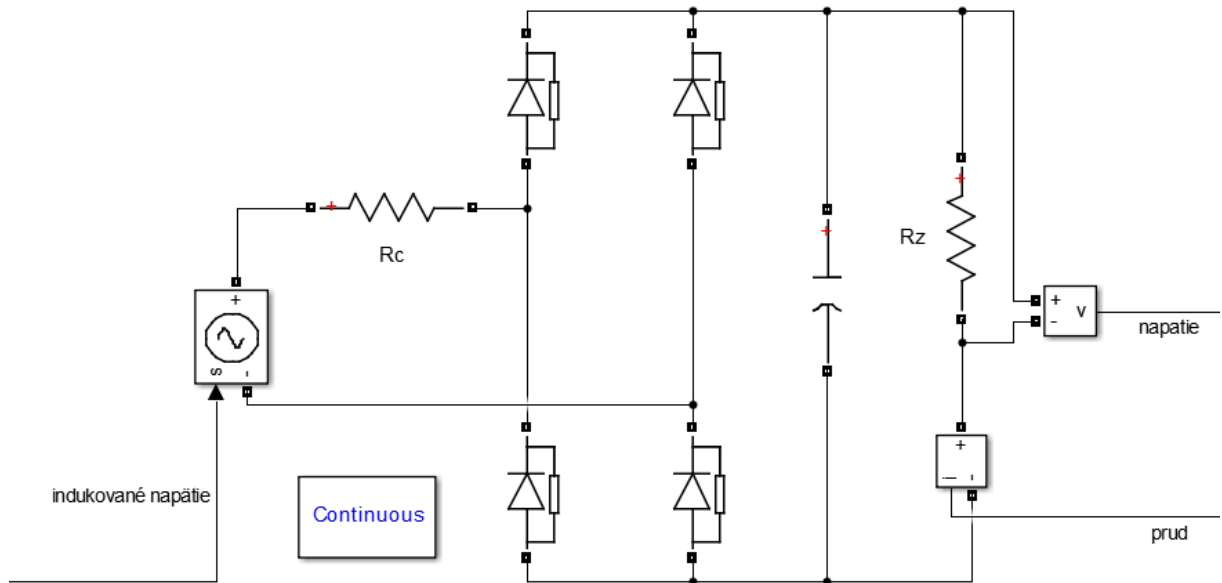


Obr. 33 Výchylka generátora pri prejazde vlaku

Z reálneho pohľadu je potrebné sa pozrieť na to, či pri prejazde vlaku nedôjde k príliš veľkej výchylke na generátore, ktorá by mohla spôsobiť nežiaduce účinky pre cievku a to také, že by mohla naraziť na konštrukciu sústavy alebo by vyšla z polohy, kde na ňu pôsobí magnetické pole, čo by bolo na úkor generovania výkonu. Preto pri preverovaní tejto problematiky, sa zobral prejazd vlaku z dostupných dát, ktoré vykazujú najväčšie kinematické budenie a sledovala sa výchylka generátora pod vplyvom týchto dát. Záver tohto overenia vidieť na obrázku 33, kde maximálna výchylka je 1.5 mm, čo absolútne nenaruší z pohľadu cievky ani indukované napätie, ani ju nijak nepoškodí, keďže dĺžka pohybu cievky je dostatočne veľká a to 18 mm.

6.1.6 Implementácia usmerňovača

So zreteľom na to, že generátor sa bude využívať pre napájanie bezpečnostného a signalizačného zariadenia, snímačov a podobných jednoduchých zariadení, sa implementoval usmerňovač (Obr. 34) pred zvolenú záťaž. Ide o jednoduchý mostíkový usmerňovač s neriadenými diódami a filtračným kondenzátorom. Vzhľadom na to, že je potrebné aby dochádzalo čo k najmenšiemu úbytku napätia na diódach, budú použité Schottkyho diódy. Pre energy harvestre je elektrická časť dôležitá, hlavne v našom prípade, kedy vplyvom pôsobiaceho kinematického budenia dostávame napätie, ktoré aby bolo vhodné pre napájanie, musí byť usmernené. Preto sa k modelu pomocou knihovne SimPowerSystems zostavil usmerňovač. Výpočet modelu s usmerňovačom v Simulinku je vplyvom použitia knihovne SimPowerSystem náročný a zaberie viac času pre výpočet.



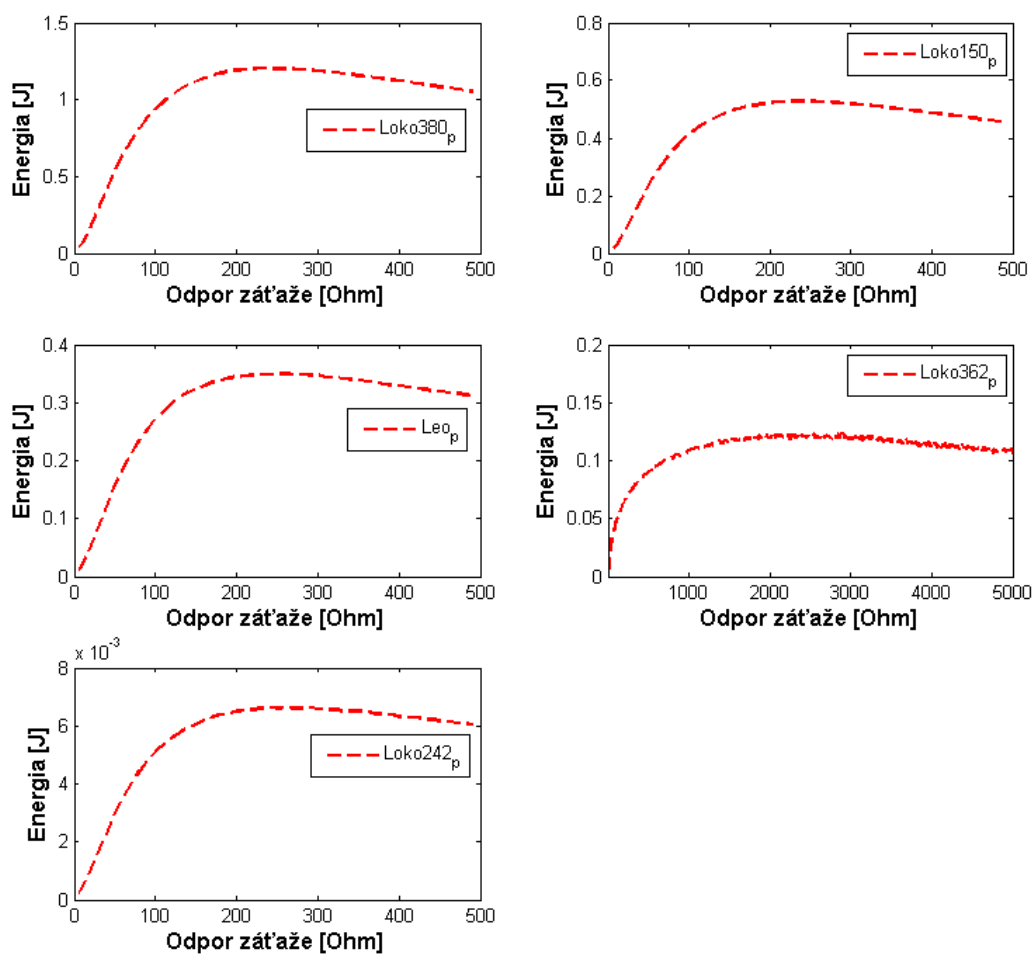
Obr. 34 Usmerňovač

6.2 Výsledky generátora s lineárnou tuhosťou

Pre simulácie, ktoré vyhodnotia účinnosť daného modelu sa použili reálne data z prejazdov vlakov. Označené sú ako Loko380_p, Loko150_p, Loko242_p, Loko362_p a Leo_p. Po navrhnutí modelu do Simulinku sa musí previesť niekoľko simulácií, ktorými sa nielen zistí výkonnosť, ale aj schopnosť daný harvester použiť pre zadanú úlohu. Ako je zvykom, záujem sa kladie na čo najlepšie hodnoty výkonu. Preto treba v prvom rade navrhnuť optimálnu záťaž, ktorá nám zabezpečí aby sme získali, čo najviac energie. Tým sa zaoberá nasledujúca podkapitola. Následne sa bude vyhodnocovať, koľko výkonu dostaneme vplyvom zmeny frekvencií pri danom vstupe.

6.2.1 Návrh optimálnej záťaži

Pri návrhu optimálnej záťaže sa postupovalo tak, že pre každú iteráciu sa použila iná záťaž. Takýto postup sa aplikoval na každé dáta prejazdu vlaku. Každou jednou simuláciou s inou nastavenou záťažou sa dostane energia a tým sa vytvoria grafy, ktoré odpovedajú priebehu energií pri zmene záťaže. Priebehy energií ukazujú grafy na obrázku 35. Krivka stúpa až po bod, kde dosiahne model svojej optimálnej záťaži. Potom začne krivka pozvoľna klesať. Sumarizáciu výsledkov, nájdenie optimálnej záťaže a k tomu odpovedajúca získaná energia pre každý prejazd, ukazuje tabuľka 4.



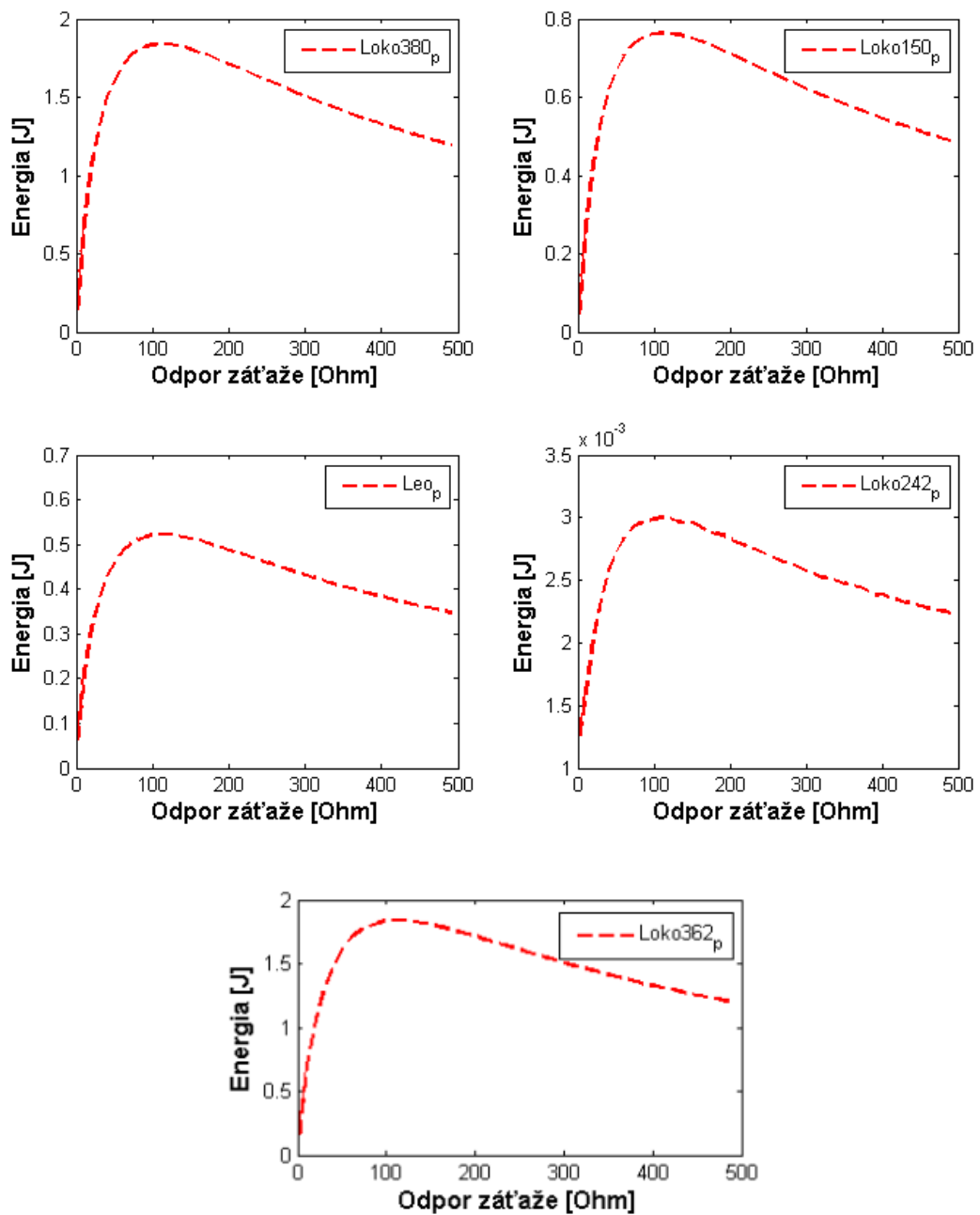
Obr. 35 Priebeh energie pri hľadani optimálnej zát'aže

Vlak	Odpor zát'aže R_z [Ω]	Získaná energia [J]
Loko380 _p	250	1.202
Loko362 _p	2290	0.123
Loko150 _p	240	0.5275
Loko242 _p	250	0.006627
Leo _p	240	0.3492

Tab. 3 Nájdene optimálne odpory

Z tabuľky je vidieť, že sa odpor pohybuje v rozmedzí 240 až 250 Ohmov. Najviac získanej energie dostaneme z prejazdu vlaku Loko380_p a to 1.202 J, čo predstavuje 0.179 W priemerného výkonu. Preto pre model generátoru je z týchto výsledkov najoptimálnejšia zát'až s odporom 250 Ohmov.

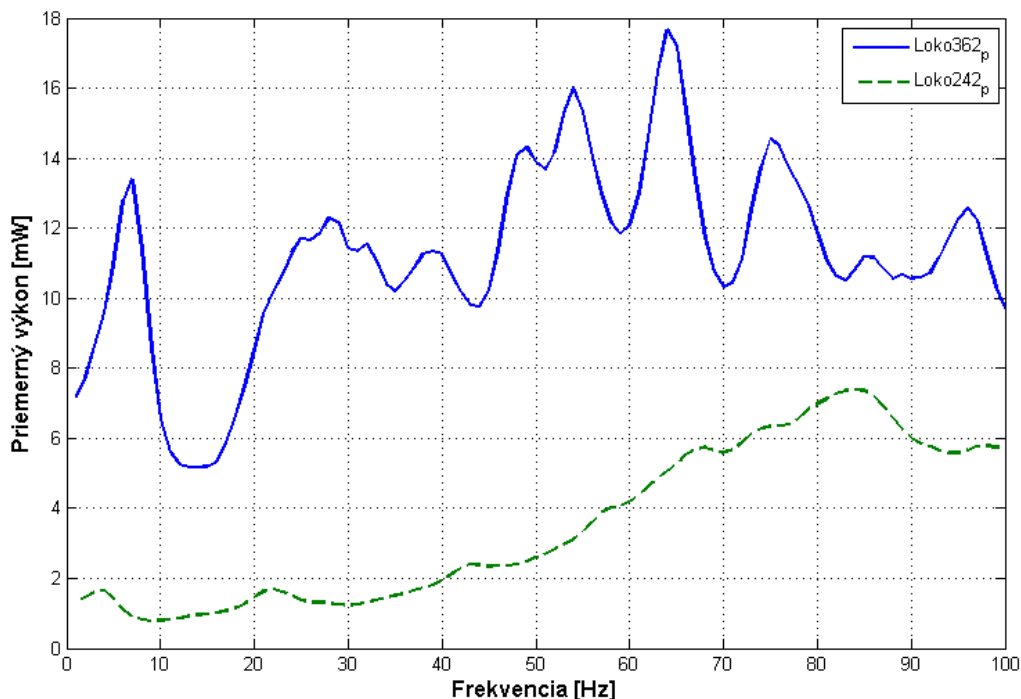
Pri použití usmerňovača sa pre optimálnu zát'až dostala hodnota 110 Ω . Energia sa v približne zvýšila o 0.2 J. Znárodnenie priebehov energie pri zmene zát'aže zobrazuje nasledujúci obrázok 36.



Obr. 36 Priebeh energií pri hľadani optimálnej zát'aže pre usmerňovač

6.2.2 Frekvenčná charakteristika

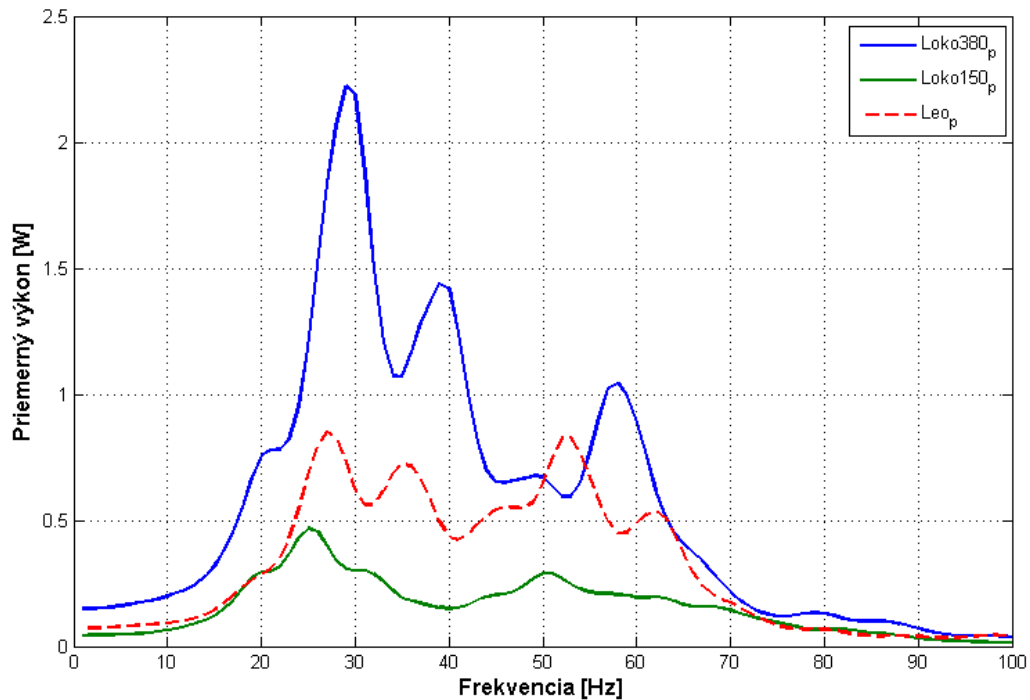
Aby sa pozrelo na odozvu systéme vzhľadom k vstupným dátam pri zmene frekvencie, previedli sa simulácie pre každý prejazd. Tento poznatok je podstatný, pretože sa zistí aké frekvencie sa vyskytujú pri prejazde vlakov a je podstatné koľko z toho vyťaží model elektromagnetického generátora. Grafy znázornené nižšie ukazujú dva druhy vstupných dát. V prípade vlakov Loko362_p a Loko242_p ide o dáta ktoré sú namerané z miesta pražca. V druhom prípade vlaky Loko380_p, Loko150_p a Leo_p ide o dáta, ktoré sú z miesta výhybky.



Obr. 37 Závislosť priemerného výkonu na frekvenciách (pražec)

Pre dáta namerané v mieste pražca (Obr. 37), je vidieť, že frekvencie sa nachádzajú aj pre nižšie hodnoty. Hodnoty priemerného výkonu sa pohybujú od 2 do 13 mW. Je potrebné aby generátor podchytil práve nižšie pásmo frekvencií, pretože navrhnutá koncepcia elektromagnetického generátora bude práve umiestnená v oblasti pražca. Aby sa dala vyhodnotiť tá najlepšie frekvencia mohlo by sa spraviť viac meraní, aj na iných trasách, kde chodí viac nákladných vlakov a oproti tomu, merania na pražcoch, kde chodia len menšie osobné vlaky. Naladený generátor by potom predstavoval komplexnejšie uplatnenie na tratiach.

Čo sa týka dát z výhybiek (Obr. 38), vykazujú hodnoty vyšších frekvencií od 30 do 40 Hz. Tu sa dostane z modelu až 2.2 W. Amplitúda kinematického budenia, je teda podstatne vyššia ako v predchádzajúcom prípade. Možno práve pre tieto miesta by bolo vhodné považovať aj nad inou koncepciou energy harvesteru.

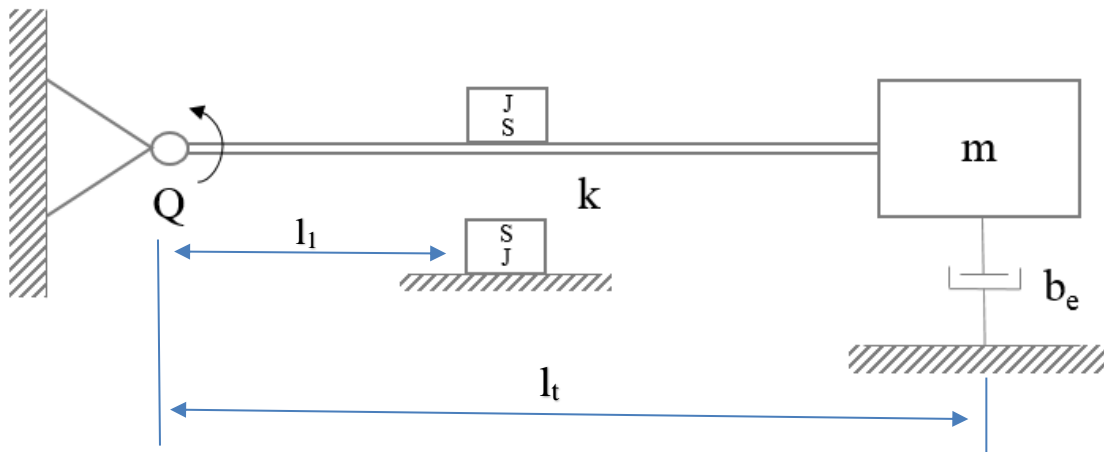


Obr. 38 Závislosť priemerného výkonu na frekvenciách (výhybka)

Výsledky, ktoré sa získali sú v celku uspokojivé a určite navrhnutá konštrukcia je dobrým základom, pre ďalšie vylepšenie z pohľadu návrhu konštrukcie, keďže vlastnú frekvenciu ovplyvňuje tuhosť a hmotnosť konštrukcie. A práve možnosť ovplyvnenia tuhosti sústavy je postavená pre ďalšiu analýzu v prípade generátora s nelineárnou tuhosťou.

6.3 Generátor s nelineárnou tuhosťou

Pri tomto type generátora sa pohráva s myšlienkou, či by sa nedostávalo lepších hodnôt výkonu ak sa využije nelineárnej tuhosti sústavy vplyvom použitia odpudzujúcich sa magnetov a tým pôsobenie samotnej magnetickej sily na sústavu (Obr. 39). Generátor je navrhnutý tak, že je uložený v rotačnej väzbe, preto na túto sústavu pôsobia momenty od pôsobiacich síl. Výslednú rovnicu pre popis tohto systému dostaneme rovnako ako v predchádzajúcom prípade z Lagrangeových rovníc II. druhu.



Obr. 39 Schéma generátora s nelineárnou tuhosťou

Takto nelineárny model popisuje diferenciálna rovnica druhého rádu obdobne ako rovnica (6), kde sa pracuje s uhlovou výchylkou, momentom zotrvačnosti sústavy, sily sa prepočítavajú na momenty a pre elektrickú časť sú použité Ohmove a Kirchhoffove zákony. Keďže ide o rotačný pohyb tak pre pôsobenie na sústavu kinematickým budením platí nasledujúci vzťah. Hľadá sa uhlové zrýchlenie, ktoré sa dostane z pohybovej rovnici:

$$M = \alpha I \quad (8)$$

kde I predstavuje moment zotrvačnosti, ktorý sa vypočíta ako moment zotrvačnosti bodu k ose rotácie. Premenná α , uhlové zrýchlenie, po vyjadrení z rovnice (8) je:

$$\alpha = \frac{M}{I} \quad (9)$$

Moment sa vypočíta ako sila vynásobená vzdialenosťou od osi rotácie. Keď uvažujeme, že v mieste ťažiska pôsobí lineárne zrýchlenie, ktoré sa vyjadří z rovnice $F = am$, potom sa táto sila vynásobí vzdialenosťou ťažiska sústavy l_t od osi rotácie sa dostaneme uhlové zrýchlenie α , ktoré sa rovná:

$$\alpha = \frac{aml_t}{I} \quad (10)$$

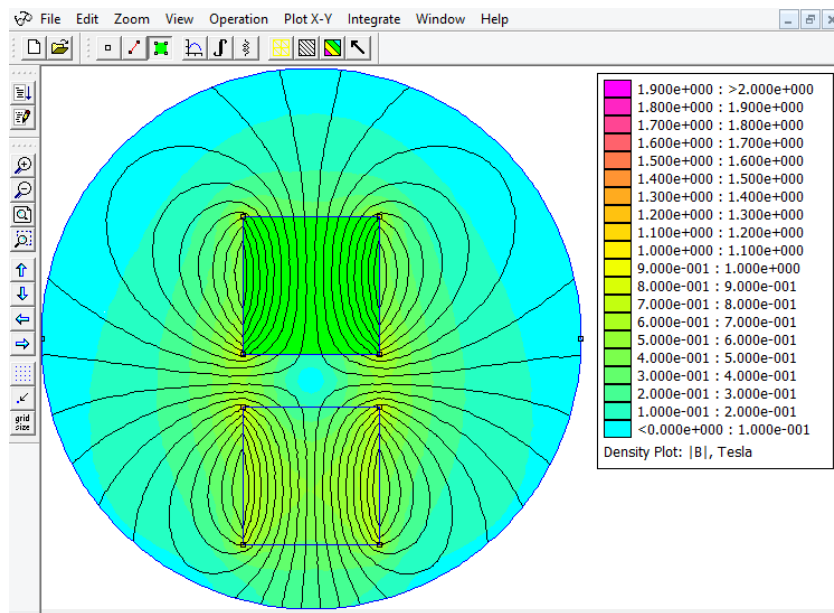
Potom výsledný tvar diferenciálnej rovnice bude:

$$\ddot{\varphi} + \frac{Q}{\Omega} \dot{\varphi} + \frac{i c_{Fe}(\varphi) l_t^2}{I} - \frac{F_{mag}(\varphi) l_1}{I} = -\ddot{\varphi}_{budiace} \quad (11)$$

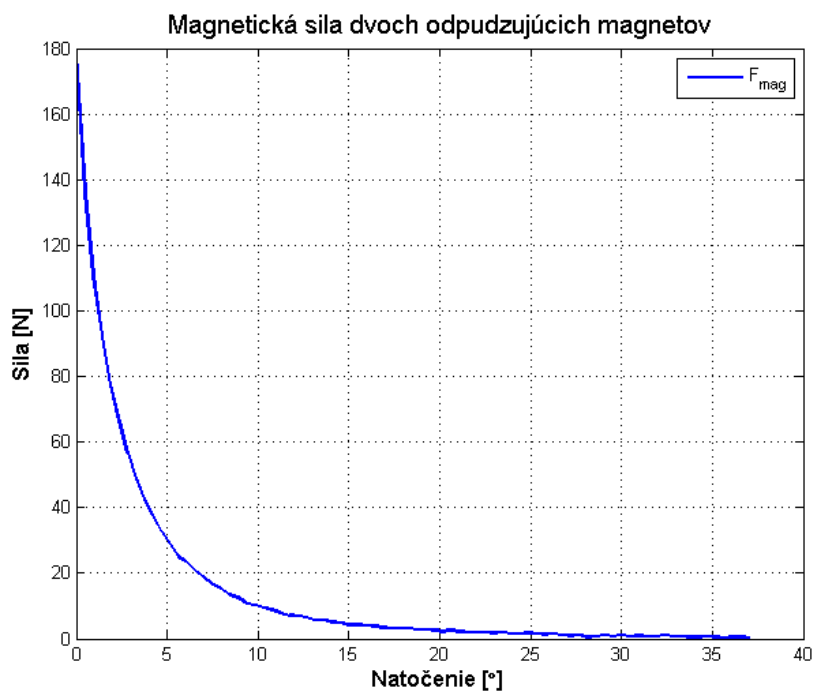
6.3.1 Magnetická sila magnetov a nelineárna tuhosť

Problémom je vyjadrenie magnetickej sily dvoch odpudzujúcich sa magnetov, ktorá nie je lineárna. Magnety musia byť dostatočne silné, aby danú sústavu udržali a splňali funkčnosť takzvaného magnetického dorazu. Vyberú sa neodymové magnety s rozmermi 25.4x25.4x12.

Tieto rozmery sú pre rozmery geometrie, ktoré sa zadajú do programu FEMM a nasimuluje sa pohyb magnetov od seba v určitých uhloch (Obr. 40). Z tejto simulácie sa dostane priebeh magnetickej sily, ktorú použijeme v nelineárnom modeli.



Obr. 40 Simulácia dvoch magnetov v prostredí FEMM



Obr. 41 Priebeh odpudzujúcej magnetickej sily

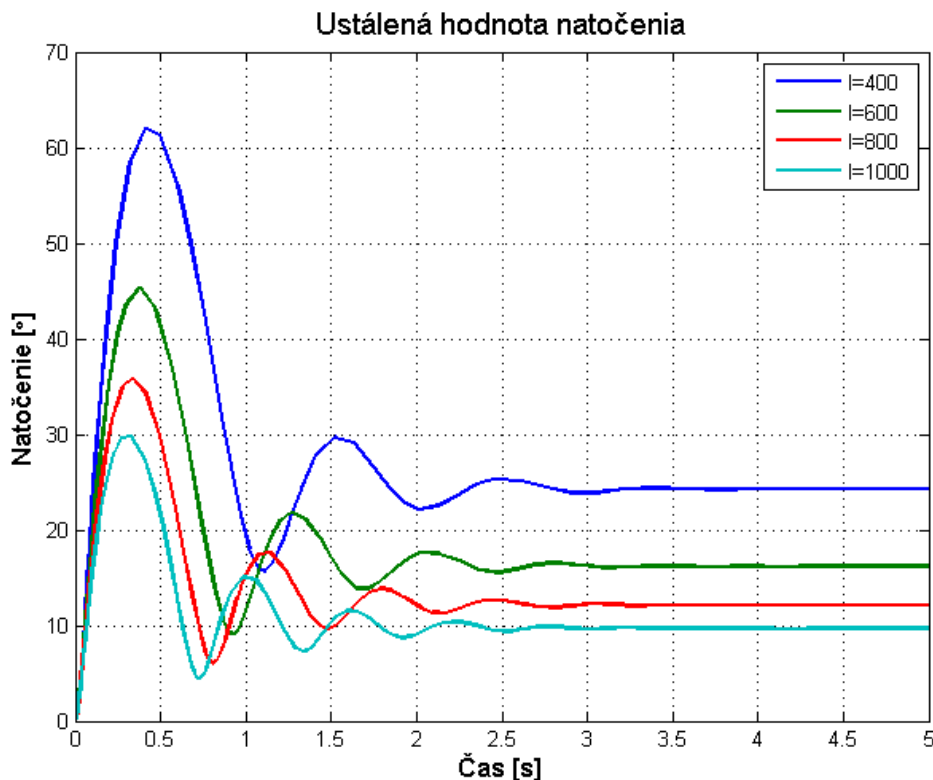
Z charakteru krivky magnetickej sily na obrázku 42, je vidieť, že ide o funkciu približnú $1/x^2$. Sila sa znižuje s pribúdajúcim natočením. Už po prvej tretine natočenie klesne takmer o 70%

oproti pôvodnej hodnote. Táto charakteristika, spôsobená pohybom magnetov, je priamo nelineárnou tuhosťou, ktorá je hľadanou tuhosťou pre sústavu.

Aby sa nelineárna tuhosť dala použiť pre model, musí sa nastaviť magnetická sila a to tak, že sa dá do rovnováhy s pôsobiacou gravitačnou silou. Tým sa zistí rovnovážna poloha sústavy, čo je vtedy, ak je splnená statická rovnováha, čo predstavuje nasledujúca podmienka:

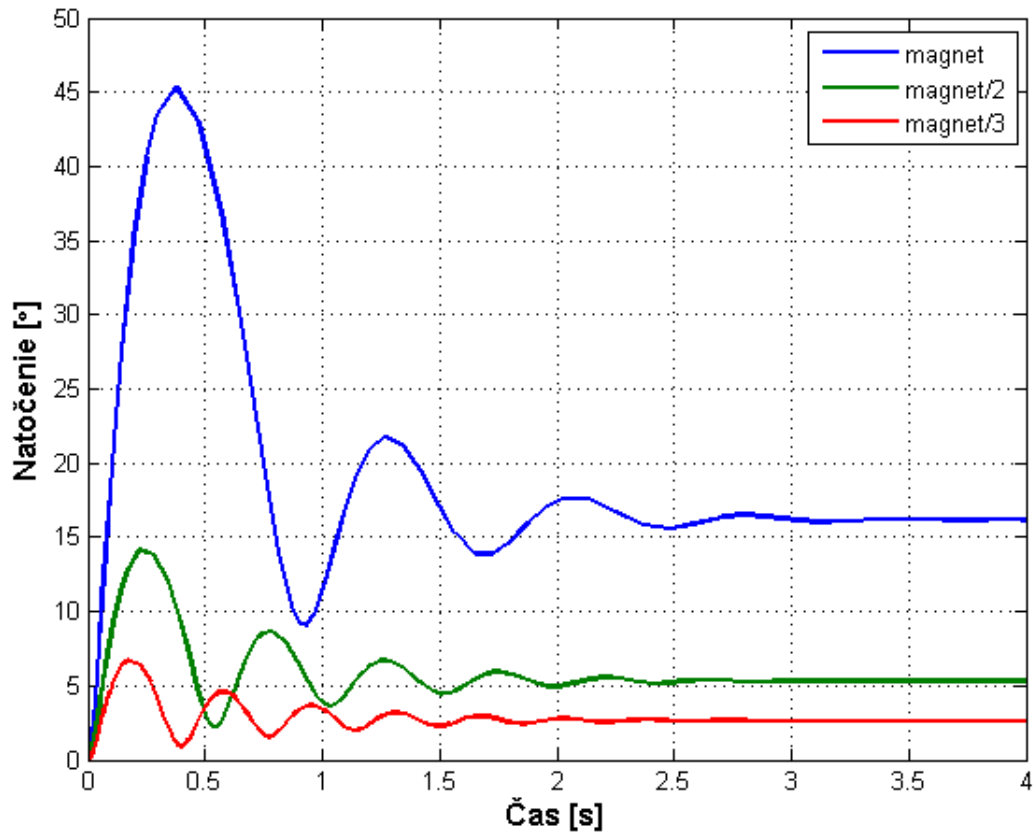
$$-F_{mag}l_1 = F_g l_t \quad (12)$$

Táto podmienka splňuje, že moment od magnetickej sily F_{mag} , ktorá pôsobí na ramene l_1 sa bude rovnať momentu od gravitačnej sily F_g na ramene l_t , čo je dĺžka ťažiska sústavy od osi rotácie. Túto rovnovážnu polohu natočenia zistíme jednoducho cez namodelovanie rovnice 12 v Simulinku. Nasledujúci graf (Obr. 43) ukazuje ako sa mení ustálená hodnota natočenia pri zmene dĺžky ramena l_1 , čiže pri zmene umiestnenia magnetov.



Obr. 43 Ustálené natočenia vzhľadom k dĺžke ramena

Ako znázorňuje obrázok, pri posúvaní magnetov od rotačnej osi, sa mení rovnovážna poloha. Pri väčšej vzdialenosti a to keď, má l_1 dĺžku 1000 mm, sa rameno ustáli na hodnote 10 stupňov. Je vidieť, že so zväčšujúcou dĺžkou sa zvyšuje aj frekvencia. Pre účely čo najlepšieho podchytenia frekvencií, ktoré sa budú vyskytovať pri prejazde vlakov, by bolo dobré túto frekvenciu zvýšiť čo najviac. Z tohto hľadiska sa preverila závislosť veľkosti magnetov pre rovnovážnu polohu natočenie. Výsledok vykresľuje obrázok 44.



Obr. 44 Ustálené natočenie vzhľadom k veľkosti magnetov

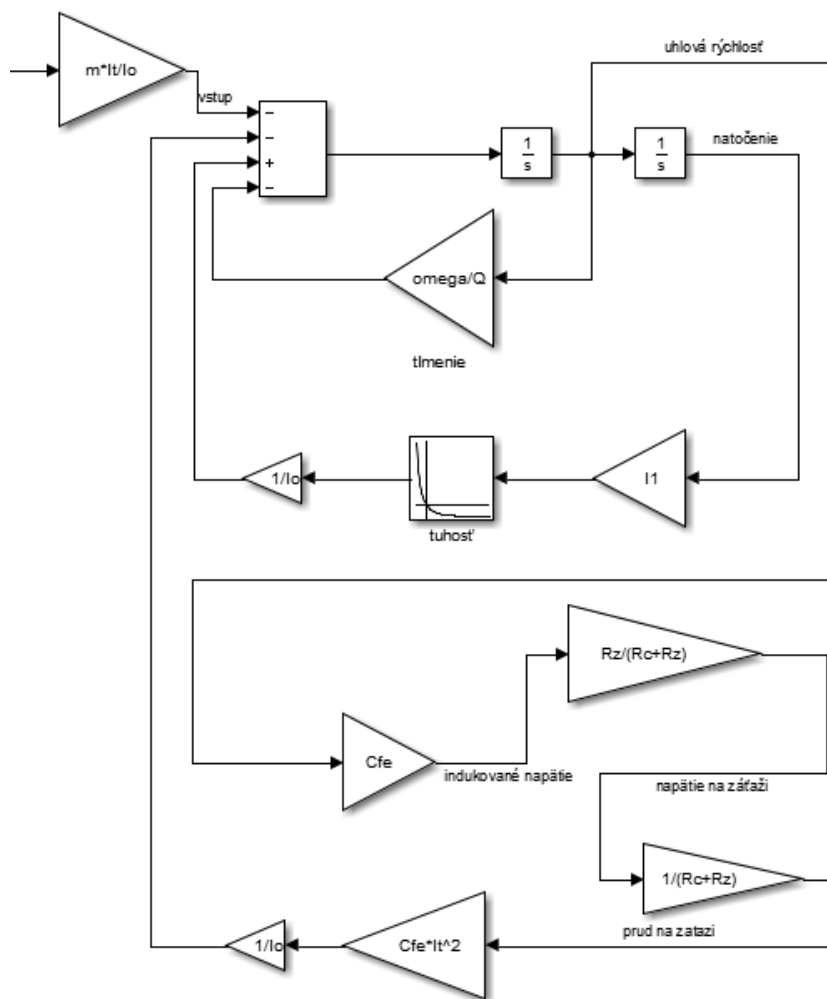
Z obrázku vyplýva, že veľkosť magnetov a teda aj ich vzájomná odpudzujúca sila, podstatne ovplyvňuje ustálenú polohu ramena a čo viac, aj frekvenciu. Dostáva sa poznatku, že čím sú magnety menšie, tým je ustálenie výchylky na nižších hodnotách a frekvencia sa zvyšuje. Po zistení týchto faktov sa využila najlepšia kombinácia, pre danú aplikáciu.

Po zvolení ramena a magnetov sa dostáva výsledná rovnovážna výchylka. Tejto výchylke odpovedá určitá sila. Zavedie sa nový súradnicový systém, ktorého počiatok je práve v získanej výchylke a jej odpovedajúcej sile. Pre takto zadanú tuhosť sa vytvára nová výchylka, s ktorou sa pracuje a to s označením φ^* .

Potom sa dostane výsledný tvar rovnice, podľa rovnice (11), ktorá vyzerá:

$$\ddot{\varphi}^* + \frac{Q}{\Omega} \dot{\varphi}^* + \frac{ic_{Fe}(\varphi^*)l_t^2}{I} - \frac{F_{mag}(\varphi^*)l_1}{I} = -\ddot{\varphi}^*_{budiace} \quad (13)$$

Pre takto zostavenú rovnicu a po nájdení nového súradnicového systému pre tuhosť sa zostaví model v Simulinku (Obr. 45).



Obr. 45 Model nelineárneho generátora

Model obsahuje ako mechanickú tak aj elektrickú časť. Elektrickú a mechanickú časť spája elektrické tlmenie b_e . S vidinou lepšieho dosiahnutia lepších výsledkov vďaka nelineárnej tuhosti, sa previedlo niekoľko simulácií. Ich výsledky zobrazuje nasledujúca podkapitola. Následne sa výsledky porovnávajú a vyvodí sa záver.

6.4 Výsledky nelineárneho modelu

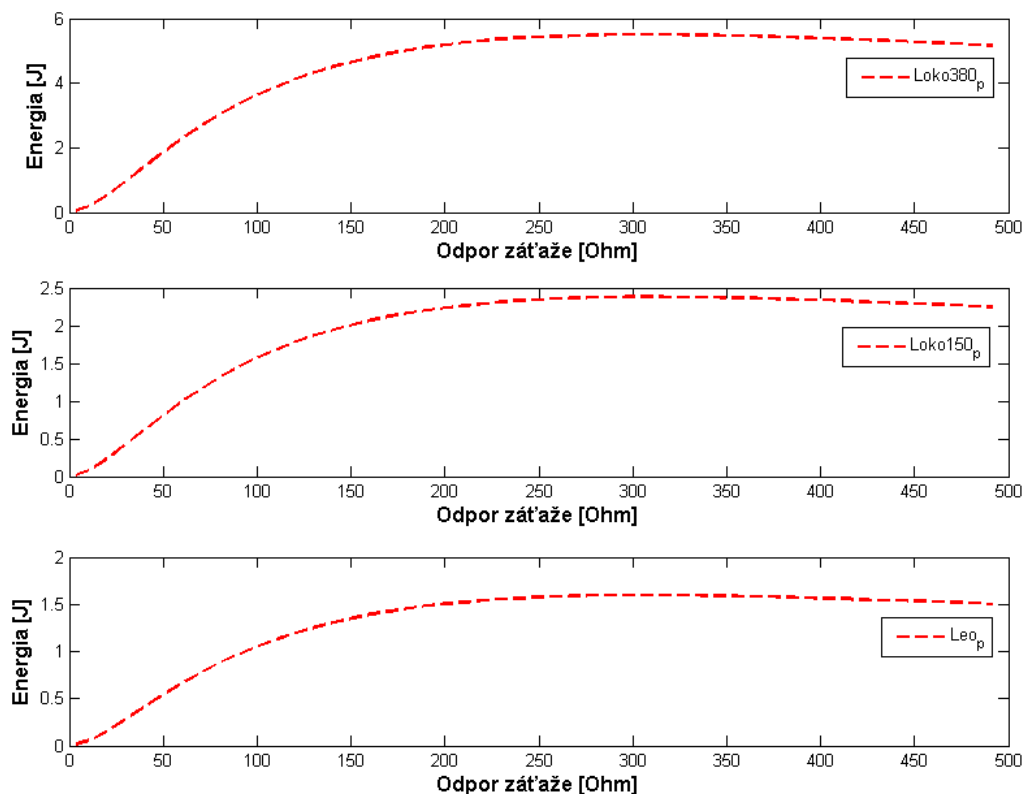
Idea v prípade nelineárneho modelu je v tom, zobrať veľkostne podobný generátor a s rovnakými parametrami ako uvádza tabuľka 4. Hlavným záujmom je zistiť, ktorý z navrhnutých modelov je lepší.

Nemenné parametre generátorov	
Hmotnosť m	2.2 kg
Faktor kvality Q	50
Odpor cievky R_c	112 Ω
Počet závitov cievky N	444
Magnetická indukcia B	0.48 T

Tab. 4 Parametre pre modely

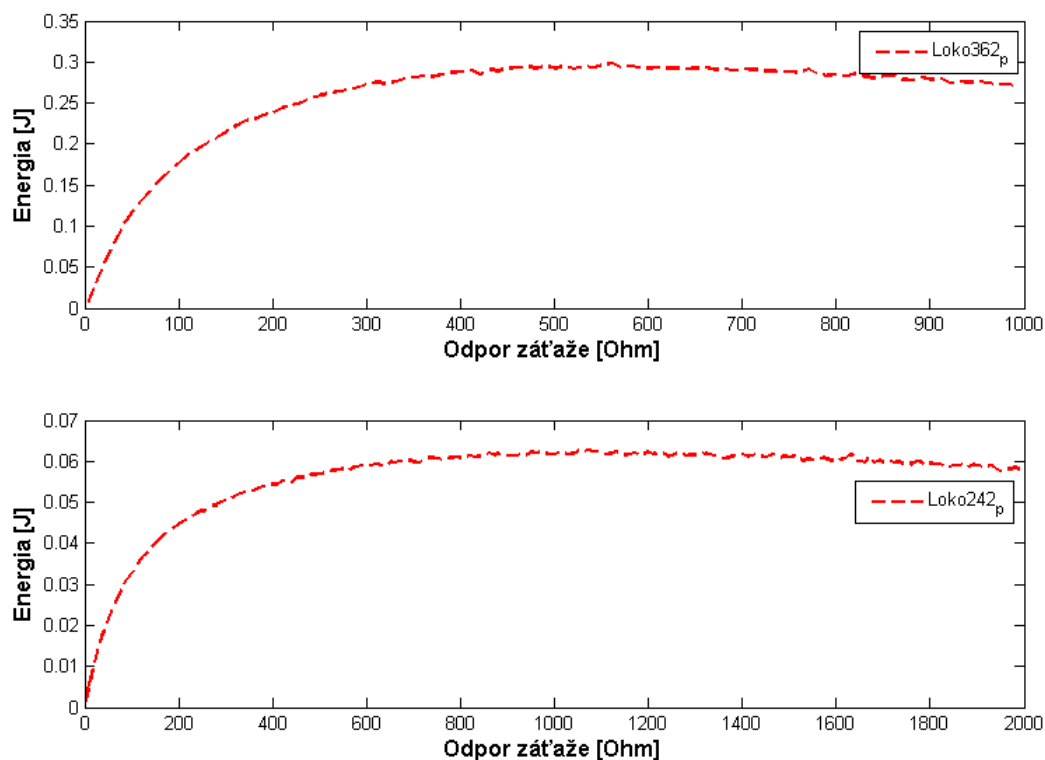
6.4.1 Návrh optimálnej zát'aže pre nelineárny model

Pre návrh v prípade optimálnej zát'aže pre nelineárny generátor sa postupuje obdobne ako v prípade lineárneho. Jednotlivé priebehy energie, ktorá sa získala pri jednotlivých simuláciách je vidieť na nasledujúcich grafoch.



Obr. 46 Priebeh energií pri hľadaní optimálnej zát'aže (výhybka)

Obrázok 46 je z dát nameraných na výhybke a obrázok 47 zas z miesta pražca. Je vidieť, že pri prejazdoch vlakov na výhybke je optimálna zát'až nižšia ako pri prejazdoch na pražcoch. Čiže v prípade nelineárneho modelu je odpor zát'aže výrazne ovplyvnený pôsobiacim kinematickým budením. Tabuľka 6 ukazuje prehľad optimálnych zát'aží a získaných energií.



Obr. 47 priebeh energie pri hľadani optimálnej záťaže (pražec)

Vlak	Odpor záťaže R_z [Ω]	Získaná energia [J]
Loko380 _p	290	5.501
Loko362 _p	560	0.2988
Loko150 _p	330	2.378
Loko242 _p	1130	0.06245
Leo _p	320	1.596

Tab. 5 Výsledky optimálnych záťaží a získanej energie z nelineárneho modelu

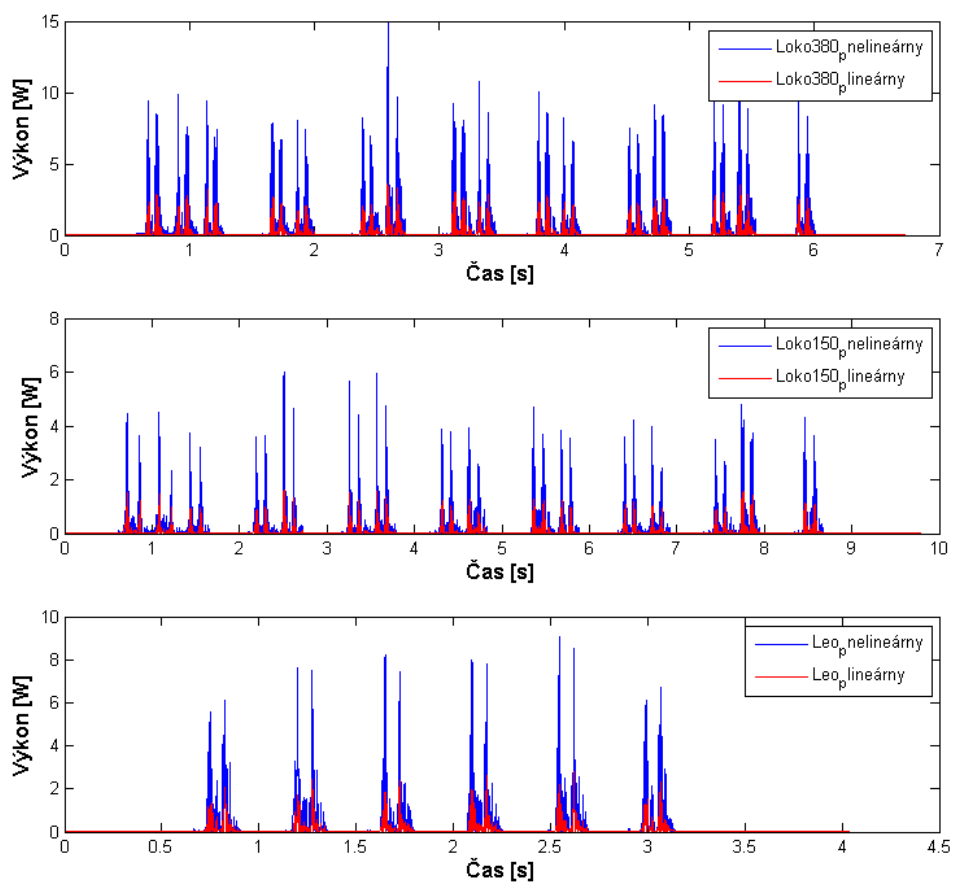
Ako je vidieť, energia, ktorá sa vyťaží z nelineárneho elektromagnetického je podstatne väčšia ako v prípade lineárneho generátora. Len sa dostalo veľkých rozdielov v hodnotách optimálnej záťaži.

6.5 Porovnanie výsledkov

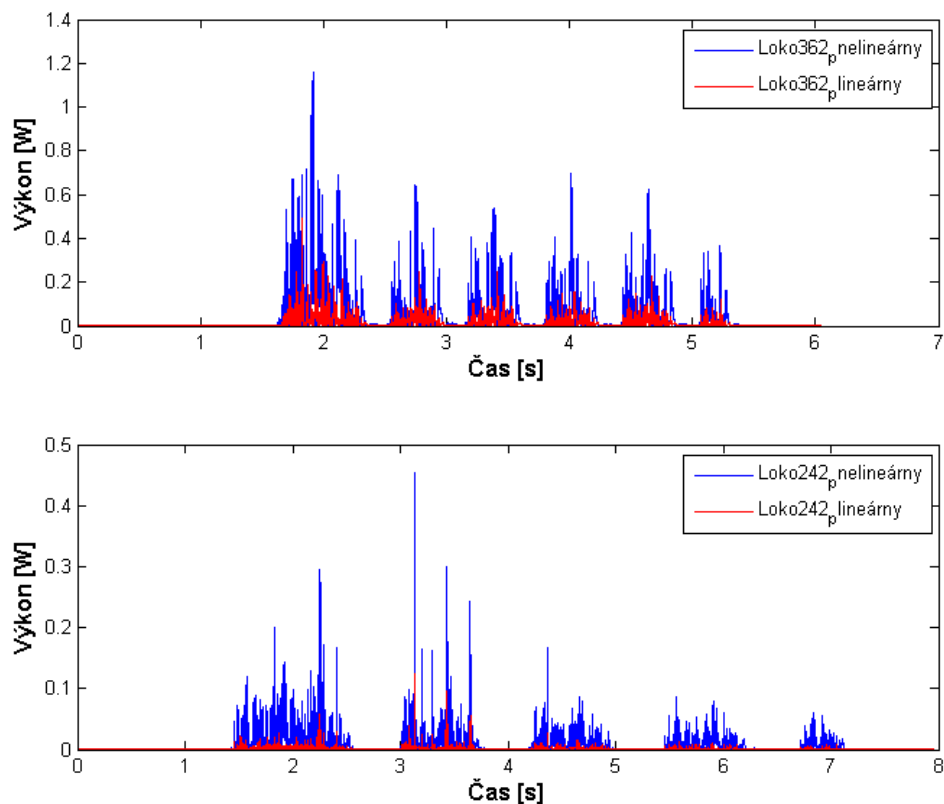
Pre porovnanie modelov sa zobrali všetky prejazdy a vyhodnotil sa okamžitý výkon. Pre možno lepšiu predstavivosť je porovnanie energií na obrázku 50.

Z grafov (Obr. 48 a 49) je evidentné, že okamžitý výkon nelineárneho generátora je v porovnaní s lineárnym generátorom podstatne vyšší. Možno teda povedať, že model s nelineárnou tuhosťou je tým lepším vďaka svojej schopnosti vygenerovať viac výkonu. Z vizuálneho hľadiska, je najväčší rozdiel v prípade dát patriacich vlaku Loko242_p. Čo je spôsobené pravdepodobne tým, že nelineárny model je naladený na nižšie frekvencie a to

približne 3 Hz. Keďže v simuláciách pre lineárny model je nastavená jednotná zát'az tak isto ako je nastavená jednotne u modelu nelineárneho. Preto sa líšia energie na obrázku 50 a energie v tabuľke 7 pri použití optimálnej zát'aži.



Obr. 48 Porovnanie okamžitých výkonov lineárneho a nelineárneho generátora (výhybka)



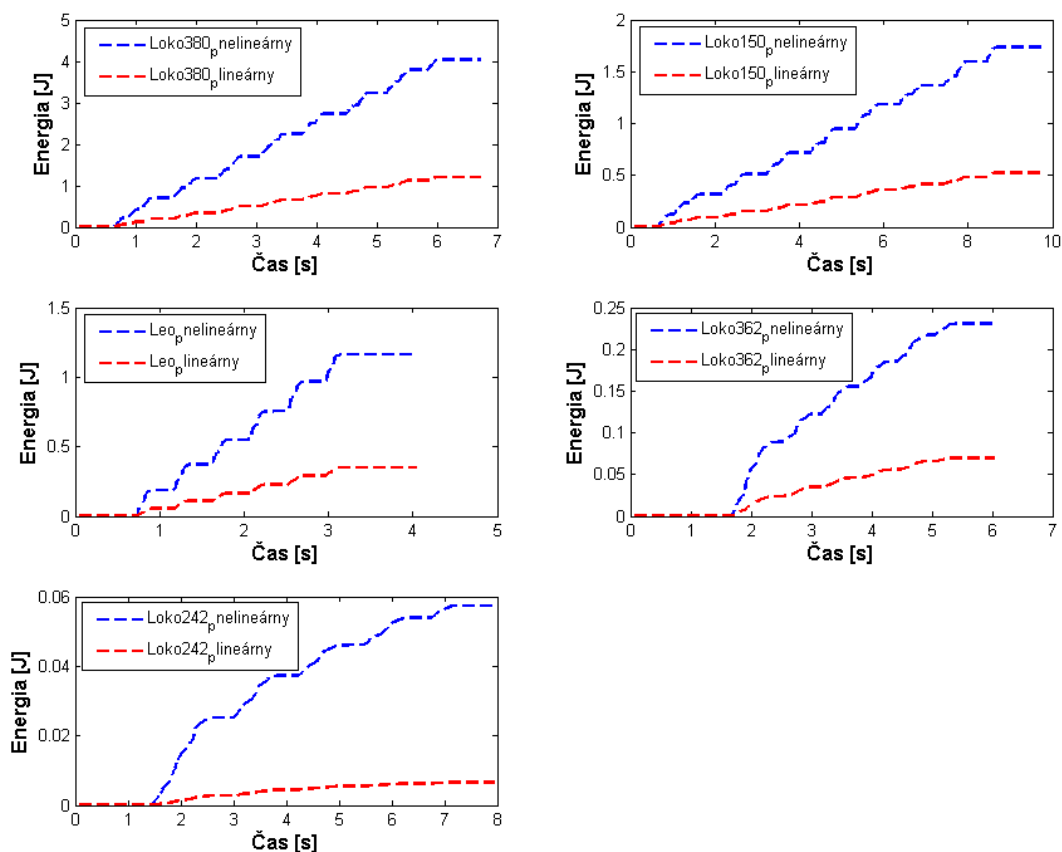
Obr. 49 Porovnanie okamžitých výkonov lineárneho a nelineárneho generátora (pražec)

Pre adekvátne porovnanie získanej energie slúži tabuľka 7, kde má každý prejazd nastavenú svoju optimálnu záťaž. Z nej vyplýva, že energia získaná z nelineárneho modelu, je o približne 4.5x väčšia ako v prípade lineárneho.

Vlak	Získaná energia [J] (lineárny)	Získaná energia [J] (nelineárny)
Loko380 _p (výhybka)	1.202	5.501
Leo _p (výhybka)	0.3492	1.596
Loko150 _p (výhybka)	0.5275	2.378
Loko242 _p (pražec)	0.006627	0.06245
Loko362 _p (pražec)	0.123	0.2988

Tab. 6 Porovnávací tabuľka energií

Z hľadiska vizualizácie a lepšej predstavivosti ponúkajú nasledujúce grafy porovnanie energia, pri tých istých simuláciách ako tomu bolo u okamžitého výkonu. Najväčší rozdiel je znovu vidieť v prípade prejazdu vlaku Loko242_p.



Obr. 50 Porovnanie priebehov energie počas prejazdov

Po zamyslení a vyhodnotí výsledkov je zrejme, že z nelineárneho modelu dostaneme väčší výkon. Najlepšie to vidieť v číselných údajoch v tabuľke 7. Hodnoty energií pri dátach z výhybky (prvé tri) sú v prípade nelineárneho modelu o približne 4.5x väčšie ako u lineárneho. V posledných dvoch prípadoch vidieť dosť veľký rozdiel hlavne u vlaku Loko242_p. Je to spôsobené tým, že pri mieste pražca, odkiaľ sú tieto dáta, sú nízke frekvencie, ktoré dobre podchycuje práve nelineárny model. Pri dátach z vlaku Loko362_p ten rozdiel nie je taký veľký, pretože dominantná frekvencia, ktorá sa tu nachádza je okolo 10 Hz, a v tomto prípade je práve lineárny model naladený na približne túto frekvenciu.

Ako sa ukázalo lineárny elektromagnetický generátor nevie mimo svoju frekvenciu získať toľko energie ako nelineárny generátor. No po uvážení z hľadiska konštrukčného riešenia je lepšou voľbou lineárny generátor, kde odpadáva problematika nelineárnosti, ktorú treba zistiť.

7 Záver

Zmyslom práce bolo navrhnuť alternatívny zdroj energie, ktorý by sa dal použiť pre napájanie signalizačných a bezpečnostných zariadení na vlakových tratiach. Za týmto účelom je práca zameraná na elektromagnetické generátory, ktoré by tvorili autonómny elektrický zdroj pre snímacie a signalizačné prvky. Ide o energy harvester na elektromagnetickom princípe.

Práca postupne oboznamuje a energy harvestingom, vysvetľuje základné princípy potrebné pre pochopenie princípu činnosti rezonátorov.

Následne ukazuje typy elektromagnetických generátorov, ktoré možno rozdeliť na rezonančné, rotačné a hybridné. Ich príklady a analýzy sú popísané v niekoľkých publikáciách, ktoré sú citované aj v tejto práci. Princíp činnosti je zjednodušene popísaný.

Po rozdelí sa konkrétnejšie rozoberajú hlavne hybridné elektromagnetické generátory, ktoré využívajú ako rotačného, tak aj rezonančného princípu. Ich výhodou je implementácia prevodov, ktoré môžu zosilniť pôsobiace kinematické budenie. No to je na úkor toho, že prevody zvyšujú straty vplyvom trenia. Tak isto aj z pohľadu životnosti a spoľahlivosti, to nie je perspektívne riešenie. Napriek tomu sa vymyslelo niekoľko prototypov, práve pre problematiku napájania signalizácie na železničných tratiach. Ich výsledky sú odprezentované v kapitole 4.

Predtým ako sa pristúpilo k samotnému návrhu elektromagnetického generátora, bolo potrebné sa bližšie zamyslieť nad tým aké kinematické budenie vytvára samotný vlak pri prejazde. Ide o pulzné kinematické budenie. Taktiež je dôležité na akom mieste na tratiach meriame vibrácie. Z dostupných dát, ktoré boli jedny z miesta pražca a druhé z miesta výhybky sa zistilo, že na pražci sa vyskytujú nízke frekvencie, kdežto pri výhybke sú frekvencie podstatne vyššie (30-40 Hz).

Na základe poznatkov o vstupných dátach sa vytvorila koncepcia elektromagnetického generátora, ktorého konštrukcia sa navrhla na vlastnú frekvenciu 11 Hz. Konštrukcia podchycuje niekoľko aspektov z pohľadu bezpečnej vyrobiteľnosti a funkčnosti. Pre zistenie účinnosti daného typu generátora sa na základe matematického popisu vytvoril model v Simulinku a prebehlo niekoľko simulácií.

Za vidinou vyššieho výkonu sa zostavil aj model s nelineárnou tuhosťou, ktorá bola zavedená magnetmi, ktoré sa seba pôsobili odpudivou silou. Ide o návrh, ktorý v základe vychádza z predchádzajúceho, čiže určité parametre sú rovnaké.

Po porovnaní výsledkov týchto dvoch typov sa prišlo k záveru, že generátor s nelineárnou tuhosťou vie získať o 4.5x viac energie ako lineárny. A v prípade ak sa bude budiť kinematickým budením a frekvenciou rovnou vlastnou frekvenciou tohto generátora je tam zvýšenie energie až 10x. Nevýhodou je obťažnejšia konštrukcia a tiež nastavenie a výpočet nelineárnej tuhosti pre danú sústavu.

8 Zoznam použitej literatúry

1. YUSUF, Simon Theophylus, Abdul HALIM, Mohammed YATIM, Ahmad Saudi SAMOSIR a Musa ABDULKADIR. MECHANICAL ENERGY HARVESTING DEVICES FOR LOW FREQUENCY APPLICATIONS : REVISITED. 2013, **8**(7), 504–512.
2. KHALIGH, Alireza, Senior MEMBER, Peng ZENG, Student MEMBER, Cong ZHENG a Student MEMBER. Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies — State of the Art. 2010, **57**(3), 850–860.
3. WILLIAMS, C B a R B YATES. s S oRs ACTUATORS Analysis of a micro-electric generator for microsystems dF-1 z (O ii. 1996, **52**, 8–11.
4. DEFORMATION, Resilient. on a heavy haul line. 2010, (May).
5. BEEBY, S P, M J TUDOR, E KOUKHARENKO, N M WHITE, T O DONNELL, C SAHA, S KULKARNI a S ROY. Micromachined silicon Generator for Harvesting Power from Vibrations. nedatováno, 2–5.
6. GENERATION, Vibration-based Power, Rajeevan AMIRTHARAJAH a Anantha P CHANDRAKASAN. Self-Powered Signal Processing Using. 1998, **33**(5), 687–695.
7. SASAKI, Ken, Æ Yuji OSAKI a Æ Jun OKAZAKI. Vibration-based automatic power-generation system [online]. 2005, 965–969. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-005-0506-8
8. EL-HAMI, M, P GLYNNE-JONES, N M WHITE, M HILL a S BEEBY. Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator. 2001, **92**, 335–342.
9. TUDOR, M J, S P BEEBY a N M WHITE. An electromagnetic , vibration-powered generator for intelligent sensor systems [online]. 2004, **110**, 344–349. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2003.09.045
10. NIU, Penglin a Student MEMBER. the underarm par a . elsrk theenormal isigi. nedatováno.
11. SCHERRER, Sarah, Donald G PLUMLEE a Amy J MOLL. Energy Scavenging Device in LTCC Materials. 2005, 77–78.
12. SERRE, Christophe, Æ Alejandro PE, Nuria FONDEVILLA a Æ Joan RAMON. Vibrational energy scavenging with Si technology electromagnetic inertial microgenerators [online]. 2007, 1655–1661. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-006-0338-1
13. WIEGELE, Thomas G. MICRO-TURBO-GENERATOR DESIGN AND FABRICATION: A PRELIMINARY STUDY Thomas. 1996.
14. HOLMES, Andrew S, Guodong HONG a Keith R PULLEN. Axial-Flux Permanent Magnet Machines for Micropower Generation. 2005, **14**(1), 54–62.
15. LI, Zhongjie, Lei ZUO, Jian KUANG a George LUHRS. Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier [online]. 2013. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/2/025008
16. WANG, John J, G P PENAMALLI a Lei ZUO. Electromagnetic Energy Harvesting from Train Induced Railway Track Vibrations. 2012, **11787**, 29–34.
17. ZHANG, Xingtian, Hongye PAN, Lingfei QI, Zutao ZHANG, Yanping YUAN a Yujie

- LIU. A renewable energy harvesting system using a mechanical vibration rectifier (MVR) for railroads. *Applied Energy* [online]. 2017, **204**, 1535–1543. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.064
18. ZHANG, Xingtian, Zutao ZHANG, Hongye PAN, Waleed SALMAN, Yanping YUAN a Yujie LIU. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management* [online]. 2016, **118**, 287–294. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2016.04.012
19. LIN, Teng, Yu PAN, Shikui CHEN a Lei ZUO. Modeling and field testing of an electromagnetic energy harvester for rail tracks with anchorless mounting. *Applied Energy* [online]. 2018, **213**(January), 219–226. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.032
20. GAO, Mingyuan, Ping WANG, Yong CAO, Rong CHEN, Dunjin CAI a A MOTIVATION. Design and Verification of a Rail-Borne Energy Harvester for Powering Wireless Sensor Networks in the Railway Industry. 2017, **18**(6), 1596–1609.
21. OBSERVATIONS, Experimental, Barnana PAL, S K SINHA, Ultrasonic TRANSDUCERS, Hiroshi SUZUKI, Ken-ya HASHIMOTO, Masatsune YAMAGUCHI, Wave Composite RESONATORS, Yoichi MIYASAKA, Shigeki HOSHINO, Sadayuki TAKAHASHI a Barnana PAL. Related content Response of a Composite Resonator under Pulse Excitation : A Numerical Study. 1996.
22. TRAN, Ngan, Mergen H GHAYESH a Maziar ARJOMANDI. International Journal of Engineering Science Ambient vibration energy harvesters : A review on nonlinear techniques for performance enhancement. *International Journal of Engineering Science* [online]. 2018, **127**, 162–185. ISSN 0020-7225. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijengsci.2018.02.003

9 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Výchylky v miestach koľajnice (rail), pražca (sleeper) a podkladu (ballast).....	11
Obr. 2 Jednoduchý mechanický model s jedným stupňom voľnosti.....	13
Obr. 3 Typy generátorov (2)	15
Obr. 4 Schematické znázornenie elektromagnetického generátora (4).....	16
Obr. 5 Znázornenie konštrukcie rezonančných generátorov (10)	16
Obr. 6 Bočný pohľad na EH zariadenie s LTCC cievkou a magnetmi (11).....	17
Obr. 7 Schéma generátora z univerzity v Barcelone (12)	17
Obr. 8 Generátor s axiálnym tokom vzduchu (4).....	18
Obr. 9 Princíp hybridného generátora (2)	19
Obr. 10 Ukážka ohybu koľajnice	20
Obr. 11 Jednoduchý MMR energy harvester (17).....	21
Obr. 12 Pohyb vertikálneho nosiča hore (17)	22
Obr. 13 Pohyb vertikálneho nosiča dole (17).....	22
Obr. 14 Experimentálne výsledky pre 0.5 Hz a 1 Hz (17)	23
Obr. 15 Prototyp (18)	23
Obr. 16 Rýchlosti otáčania výstupného hriadeľa pri rôznych rýchlostiach (18).....	24
Obr. 17 Externá sila (18).....	24
Obr. 18 Pohľad na neukotvený energy harvester MMR (19).....	24
Obr. 19 Výsledky testu pri 5 mm a 1 Hz sínusovom vstupe (19)	25
Obr. 20 (a-c) ukážka uloženia sa zostavy magnetických rezonátorov; (d) umiestnenie a zostava magnetického levitačného zariadenia (20).....	26
Obr. 21 (a) prototyp jedného setupu (b) a jeho schematické znázornenie(20).....	26
Obr. 22 Priebeh napätia elektromagnetického harvestra (20)	27
Obr. 23 Indukované napätie (20).....	27
Obr. 24 Napätie a výkon zo zariadenia magnetickej levitácie (20).....	28
Obr. 25 Tvar zrýchlenia na základe priehybu koľajnice	29
Obr. 26 Amplitúdo-frekvenčné spektrum z dát prejazdov vlakov	30
Obr. 27 Konštrukcia elektromagnetického generátora.....	31
Obr. 28 Elektrický obvod generátoru.....	32
Obr. 29 Elektromagnetický model generátora v simulinku	33
Obr. 30 Prostredie FEMM pre výpočet mag. Indukcie	34
Obr. 31 Vlastná frekvencia prvého vlastného tvaru	35
Obr. 32 Konštrukcia s držiakom	35
Obr. 33 Výchylka generátora pri prejazde vlaku	36
Obr. 34 Usmerňovač	37
Obr. 35 Priebeh energie pri hľadaní optimálnej záťaže	38
Obr. 36 Priebeh energií pri hľadaní optimálnej záťaže pre usmerňovač.....	39
Obr. 37 Závislosť priemerného výkonu na frekvenciách (pražec).....	40
Obr. 38 Závislosť priemerného výkonu na frekvenciách (výhybka)	41
Obr. 39 Schéma generátora s nelineárnou tuhosťou	42
Obr. 40 Simulácia dvoch magnetov v prostredí FEMM	43
Obr. 41 Priebeh odpudzujúcej magnetickej sily.....	43
Obr. 43 Ustálené natočenia vzhľadom k dĺžke ramena.....	44
Obr. 44 Ustálené natočenie vzhľadom k veľkosti magnetov	45
Obr. 45 Model nelineárneho generátora.....	46
Obr. 46 Priebeh energií pri hľadaní optimálnej záťaže (výhybka).....	47

Obr. 47 priebeh energie pri hľadani optimálnej záťaže (pražec).....	48
Obr. 48 Porovnanie okamžitých výkonov lineárneho a nelineárneho generátora (výhybka).....	49
Obr. 49 Porovnanie okamžitých výkonov lineárneho a nelineárneho generátora (pražec)	50
Obr. 50 Porovnanie priebehov energie počas prejazdov	51

10 Zoznam tabuliek

Tab. 1 Mechanické zdroje energie pre energy harvesting (1)	12
Tab. 2 Hodnoty výsledkov testov (19).....	25
Tab. 4 Nájdené optimálne odpory	38
Tab. 5 Parametre pre modely	46
Tab. 6 Výsledky optimálnych záťaží a získanej energie z nelineárneho modelu.....	48
Tab. 7 Porovnávacía tabuľka energií	50

11 Zoznam príloh

Prílohu práce tvorí CD, ktoré obsahuje:

- Modely v Simulinku
- Príslušné skripty v Matlabe
- Elektronická verzia diplomovej práce