



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

MAGNETICKÝ VIBRAČNÍ GENERÁTOR PRO NÍZKÉ BUDÍCÍ FREKVENCE

MAGNETIC ENERGY HARVESTING DEVICE FOR LOW EXCITATION VIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hugo Szabó

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Hugo Szabó
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Rubeš
Akademický rok:	2018/19

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 bakalářské práce:

Magnetický vibrační generátor pro nízké budící frekvence

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V některých průmyslových aplikacích se setkáváme s vibracemi o nízké nosné frekvenci, které lze přeměnit na elektrickou energii. Úkolem práce je analýza a návrh magnetického vibračního generátoru pro nízké frekvence vibrací, který bude využit jako autonomní zdroj elektrické energie pro internet věcí.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše magnetických generátorů pro nízké frekvence.
2. Analýza a návrh koncepce konstrukce generátoru.
3. Vytvoření simulačního modelu a návrh parametrů generátoru.
4. Výroba a testování zvolené konstrukce generátoru.

Seznam doporučené literatury:

BEEBY, S. P. a D. ZHU, 2015. Vibration energy harvesting: fabrication, miniaturisation and applications. In: José Luis SÁNCHEZ-ROJAS a Riccardo BRAMA, ed. Smart Sensors, Actuators, and MEMS VII; and Cyber Physical Systems [online]. s. 951703.

BRADAI, S., S. NAIFAR, C. VIEHWEGER, O. KANOUN a G. LITAK, 2015. Nonlinear analysis of an electrodynamic broadband energy harvester. The European Physical Journal Special Topics [online]. 20.11., roč. 224, č. 14–15, s. 2919–2927. ISSN 1951-6355.

COTTONE, Francesco, Riccardo MINCIGRUCCI, Igor NERI, Francesco ORFEI, Flavio TRAVASSO, Helios VOCCA a Luca GAMMAITONI, 2011. Nonlinear kinetic energy harvesting. In: Procedia Computer Science [online]. s. 190–191.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca je zameraná na návrh magnetického vibračného generátora pre nízke budiace frekvencie. Generátor sa skladá z mechanickej a elektrickej časti, pričom mechanická časť je tvorená dvoma levitujúcimi magnetmi, ktoré sa navzájom odpudzujú a elektrická časť je tvorená magnetickým obvodom a cievkou, ktorých relatívnym pohybom sa v cievke indukuje napätie. Matematický model je tvorený v programoch Matlab, Simulink a FEMM. Konštrukčný model je tvorený v programe Inventor.

Abstract

This bachelor theasis is focused on a concept of a magnetic energy harvesting device for low excitation frequencies. The device is made out of mechanical and electrical part where mechanical part is made out of two levitating magnets that repel each other and an electrical part is made out of magnetic circuit and a coil whose relative motion induces voltage in the coil. Mathematical model is made in Matlab, Simulink and FEMM. Construction model is made in Inventor.

Kľúčové slová

energy harvesting, vibračný generátor, magnetizmus, elektromagnetická indukcia, rezonančná frekvencia, matlab, simulink, femm, inventor

Key words

energy harvesting, vibration powered generator, magnetism, electromagnetic induction, resonance frequency, matlab, simulink, femm, inventor

Bibliografická citácia

SZABÓ, H. *Magnetický vibrační generátor pro nízké budící frekvence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Rubeš.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu Vibrační magnetický generátor pro nízke budící frekvence vypracoval samostatne za pomoci vedúceho práce Ing. Ondřeje Rubeše a literatúry, ktorú som uviedol v použitých zdrojoch.

V Brne dňa:

.....

Hugo Szabó

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať pánovi Ing. Ondřejovi Rubešovi za ústretový prístup, cenné rady, pripomienky a usmerňovanie pri tvorbe tejto bakalárskej práce.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Ciele práce	10
3. Energy harvesting	11
3.1 Vibračné generátory	11
3.1.1 Mass-spring-damper systémy	11
3.1.2 Piezoelektrický jav	13
3.1.3 Elektromagnetická indukcia	13
3.2.4 Elektrostatická indukcia	14
3.2 Magnetické vibračné generátory	15
4. Existujúce lineárne magnetické generátory	17
4.1 Torzný generátor pre leteckú aplikáciu	17
4.2 MEMS generátor	18
4.3 Maglev generátor	19
5. Koncept elektromagnetického vibračného generátora.....	20
4.1 Mechanická časť	20
4.2 Elektromagnetická časť.....	21
6. Programy pre vytvorenie modelu	23
6.1 Matlab	23
6.2 Simulink	23
6.3 FEMM.....	23
6.3 Inventor	24
7. Matematický model a návrh parametrov	25
7.1 Model mechanickej časti.....	25
7.2 Model elektromagnetickej časti	26
7.3 Ladenie maximálneho výkonu	27
7.4 Voľba parametrov	28
8. Konštrukčné riešenie.....	31
8.1 Pohyblivá časť.....	31
8.2 Rám	32
9. Merania	33
9.1 Ideálny odpor zát'aže.....	34

9.2 Frekvenčná charakteristika pri záťaži 200Ω	35
9.3 Ideálny odpor záťaže pri budiacej frekvencii rovnej rezonančnej frekvencii	36
10. Záver	38
11. Zoznam obrázkov	39
12. Zoznam použitej literatúry	40
13. Zoznam použitých skratiek a symbolov	42
14. Zoznam príloh	43

1. Úvod

Elektronika sa v dnešnej dobe nachádza častejšie vo viacerých aplikáciách. Každé elektrické zariadenie potrebuje svoj vlastný zdroj elektrickej energie, no nie vždy je možné pre danú aplikáciu použiť energiu dodávanú z elektrickej siete. Naskytuje sa možnosť využívania batérií, ktoré sa dokážu samé nabíjať z ambientných zdrojov energie, aké nám napríklad poskytuje slnečné žiarenie, vietor alebo tok rieky. Jedným z ambientných zdrojov energie sú aj vibrácie.

Energia získaná z vibrácií sa často používa na napájanie bezdrôtových senzorov internetu vecí (IOT). Napájanie môže fungovať na princípe elektromagnetickej indukcie, elektrostatickej indukcie alebo piezoelektrického javu. Príkladom aplikácie môže byť senzor umiestnený na dverách, po ktorých otvorení sa rozvibruje piezoelektrický nosník, ktorý produkuje energiu svojou deformáciou a na ktorého koncoch sú umiestnené magnety, ktoré kmitaním v blízkosti cievky indukujú napätie [1]. Takýto mechanizmus dokáže vyprodukovať dostatočné množstvo energie na odoslanie informácie do centrály, ktorá po otvorení dverí napríklad zasvieti svetlo. Rádovo sme podobnými zariadeniami schopní vyprodukovať niekoľko miliwattov energie.

Energy harvesting, získavanie energie pre napájanie samostatných zariadení z ambientných zdrojov, je teda ekologickým a praktickým riešením danej problematiky.

2. Ciele práce

Cieľom tejto práce je vytvoriť rešerš magnetických generátorov pre nízke budiace frekvencie, analyzovať a navrhnúť konštrukcie generátora, vytvoriť jeho matematický model, navrhnúť jeho parametre, dať generátor vyrobiť, otestovať ho, spracovať namerané dáta a porovnať ich s matematickým modelom.

Generátor sa pre ďalšiu aplikáciu musí zmestiť do valcovej tuby o priemere 7 cm.

3. Energy harvesting

Energy harvesting je spôsob získavania energie z ambientných, obnoviteľných zdrojov energie. Je to ekologický spôsob získavania energie bez využitia neobnoviteľných nerastných surovín, ktoré majú negatívny vplyv na našu planétu. Energia sa dá získavať z rôznych alternatívnych zdrojov ako napríklad z vibrácií, vodného toku, pomocou sily vetra, alebo slnečného žiarenia. Klasickým príkladom sú veterné, alebo vodné elektrárne, v ktorých sila vetra alebo vody roztáča turbínu napojenú na synchronný, prípadne asynchronný elektrický stroj, ktorý po roztočení pracuje v generátorovom režime. Ďalším príkladom môže byť slnečná energia, ktorá na Zem dopadá vo forme elektromagnetického žiarenia. Solárne elektrárne zas využívajú fotovoltanický jav na premenu tohto žiarenia na elektrickú energiu za využitia polovodičových materiálov.

Táto energia sa dá využiť na napájanie zariadení, ktoré nie je možné, alebo je prakticky nevýhodné napájať zo siete alebo z batérie. Špecificky máme na mysli napájanie senzorov internetu vecí. Takéto senzory nevyžadujú veľkú spotrebu energie a rádovo ich stačí napájať energiou o veľkosti niekoľko miliwattov. Čím väčšie dokážeme energy harvesting zariadenie vyrobiť, tým viac z neho dokážeme dostať energie. V tejto práci sa budeme venovať zariadeniam, ktoré získavajú energiu z vibrácií.

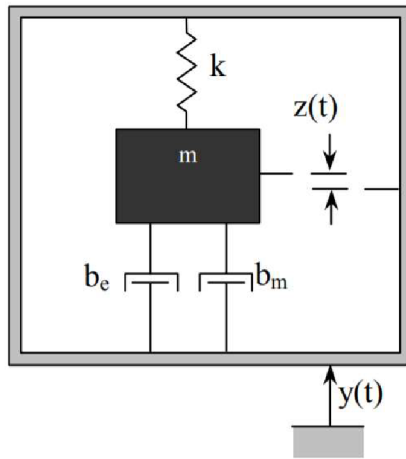
3.1 Vibračné generátory

Vibračné generátory získavajú energiu z pohybu. Po mechanickej stránke sú vibračné generátory mass-spring-damper systémy [2]. Ak na takéto zariadenie zapôsobí vonkajšia sila, mechanická časť generátora sa rozkmitá. Mechanickou časťou môže byť napríklad nosník z piezoelektrického materiálu, levitujúci magnet alebo pohyb dosiek kondenzátora. Energia sa potom dá získať z ohybu piezoelektrického nosníka pomocou piezoelektrického javu, pohybom magnetu v blízkosti cievky pomocou elektromagnetickej indukcie alebo pohybom dosiek kondenzátoru proti sile, ktorá medzi nimi pôsobí elektrostatickou indukciou.

3.1.1 Mass-spring-damper systémy

Mass-spring-damper systém je matematický model, ktorý sa skladá z hmotného telesa, na ktoré pôsobí externá sila (vibrácie), sila od pružiny a sila od tlmenia. Tlmenie sa pri vibračných generátoroch skladá z elektrického tlmenia od cievky a z mechanického tlmenia, ktoré môže reprezentovať trenie. Matematicky sa tento model popisuje rovnicou odvodenou z druhého Newtonovho zákona:

$$m * \ddot{z} + (b_e + b_m) * \dot{z} + k * z = -m * \ddot{y} \quad (1)$$

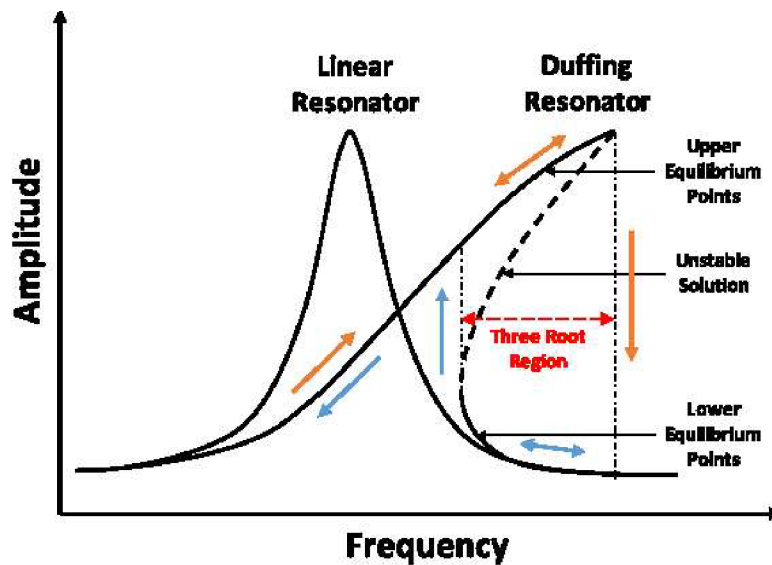


Obrázok 1: mass-spring-damper systém [3]

Budiaca sila spôsobujúca vibrácie má sínusový priebeh. Ako nám je z dynamiky známe, maximálne výchylky z od rovnovážnej polohy telesa sú závislé na kmitočte budiacej sily. Maximálna výchylka, amplitúda, nastáva u lineárnych systémov na vlastnej, rezonančnej frekvencii ω_0 .

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

Vibračné generátory však nie sú vždy lineárne. U nelineárnych systémov je to komplikovanejšie. U nich nie sme schopní presne predvídať, kde sa bude rezonancia nachádzať a najväčšiu amplitúdu musíme hľadať na základe numerických výpočtov. Pre porovnanie môže amplitúdovo-frekvenčná charakteristika lineárneho a nelineárneho systému vyzeráť takto:



Obrázok 2: amplitúdovo-frekvenčná charakteristika lineárneho a nelineárneho systému [4]

Na modelovanie nelineárnej amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky v obrázku 2 bola v [4] použitá Duffingová rovnica.

Pri väčších výchylkách sa vo vibračných generátoroch generuje väčšie množstvo energie. Je teda vhodné tieto zariadenia navrhovať tak, aby na pracovnej frekvencii dosahovali rezonancie.

3.1.2 Piezoelektrický jav

Piezoelektrický jav sa prejavuje ako schopnosť elektrického náboja akumulovať sa v rôznych tuhých (isté druhy keramiky, kryštály, kosti...), ale aj v biologických materiáloch (DNA, niektoré bielkoviny...) pri ich deformovaní [5]. Prejavuje sa lineárnou elektromechanickou interakciou medzi mechanickými a elektrickými stavmi v kryštalických materiáloch, ktorých mriežka nie je inverzne symetrická [6]. Deformáciou sa v kryštalickej mriežke posúvajú ťažiská kladného a záporného náboja, čo má za dôsledok vznik elektrických dipólov [7]. Tieto dipóly sa vzájomne vyrušia a na povrchu materiálu vzniká elektrický. Piezoelektrický jav bol objavený v roku 1880 bratmi Pierre a Jacques Curie [8].

3.1.3 Elektromagnetická indukcia

Ide o metódu, ktorá sa využíva na indukovanie napätia v elektrických strojoch. Princíp elektromagnetickej indukcie spočíva v menení veľkosti magnetického toku v cievke. V cievke sa zmenou magnetického toku indukuje napätie, ktoré vytvára vlastné magnetické pole pôsobiace proti zmene, ktorá ho vyvolala. Cievkou po pripojení záťaže začne pretekať prúd o veľkosti, ktorú vieme vypočítať z Ohmovho zákona. Michael Faraday v roku 1831 matematicky popísal veľkosť indukovaného napätia v cievke o N závitoch nasledovne:

$$u_{ind} = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Pre mnoho aplikácii je však praktickejšie použiť vzťah pre indukované napätie v inej forme. Za predpokladu, že sa cievka nachádza v homogénnom magnetickom poli, tj. magnetický tok prechádzajúci závitmi cievky je v každom mieste rovnaký, môžeme použiť nasledujúci vzorec:

$$u_{ind} = N * B * l * v \quad (4)$$

V tomto vzorci je l dĺžka jedného závitov cievky o počte N závitov, ktorá sa pohybuje rýchlosťou v kolmo na magnetické pole o hustote B . Predpokladáme, že pri pohybe cievky sa v nej mení hodnota magnetickej indukcie (relatívny pohyb magnetov vytvárajúcich magnetické pole a cievky).

Vzťah (4) sa dá odvodiť zo vzťahu:

$$u_{ind} = \int \vec{v} \times \vec{B} d\vec{r} \quad (5)$$

ktorý sa dá odvodiť z Lorentzovho zákona. Ten hovorí o Lorentzovej sile, ktorá pôsobí na elektróny vo vnútri vodiča pohybujúceho sa v homogénnom magnetickom poli proti smeru pohybu vodiča. Práca ktorou prekonávame Lorentzovú silu sa prejavuje vo forme elektrickej energie. Lorentzová sila je definovaná nasledovne:

$$F_l = q * \vec{v} \times \vec{B} \quad (6)$$

Vzťahy sú prebraté z [9].

3.2.4 Elektrostatická indukcia

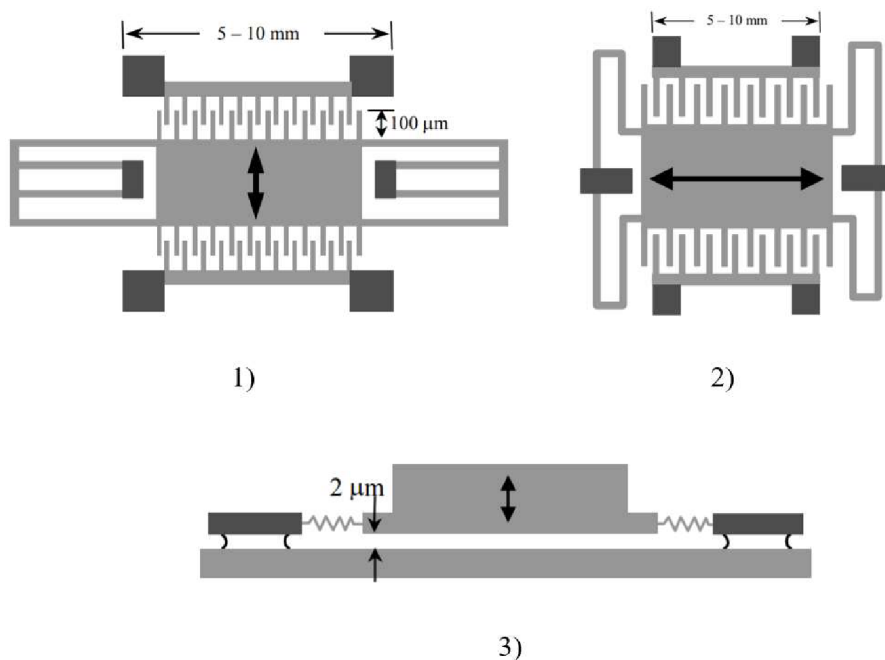
Napojením doskového kondenzátora na batériu s napätím U sa na jednotlivé dosky kondenzátora ukladá náboj, ktorý je na doskách opačný. Dosky na seba pôsobia silou

$$F_C = \frac{1}{2} \varepsilon * S * \frac{U^2}{d^2} \quad (7)$$

kde ε je permeabilita materiálu medzi doskami kondenzátora, S je plocha dosiek, a d je vzdialenosť medzi doskami.

Získavanie energie formou elektrostatickej indukcie prebieha vykonávaním práce pohybom dosiek nabitého kondenzátora proti sile, ktorá medzi doskami kondenzátora pôsobí [2]. Práca sa prejaví vo forme elektrickej energie. Podľa typu pohybu dosiek rozlišujeme tri typy elektrostatických generátorov [10]:

- 1) Prekrývanie dosiek v rovine
- 2) Zatváranie medzery v rovine
- 3) Zatváranie medzery mimo roviny



Obrázok 3: typy elektrostatických generátorov [10]

Nevýhodou elektrostatickej indukcie je potreba nabitých kondenzátorov.

3.2 Magnetické vibračné generátory

Magnetické vibračné generátory pre premenu mechanickej energie na elektrickú využívajú princíp elektromagnetickej indukcie. Pri navrhovaní takýchto generátorov je našim cieľom dosiahnuť relatívny pohyb magnetov poskytujúcich v svojom okolí magnetické pole a cievky. Na to môžeme využívať vibrácie z okolia. Naskytuje sa nám niekoľko konštrukčných možností ako daný pohyb realizovať. Vo všeobecnosti vieme rozdeliť magnetické vibračné generátory na dva typy a to na rotujúce elektromagnetické generátory a na lineárne elektromagnetické generátory. Toto rozdelenie je popísané v [11].

Rotujúce elektromagnetické generátory využívajú na premenu mechanickej energie na elektrickú lineárny pohyb, ktorý premieňajú na pohyb rotujúci. Príkladom sú vodné, veterné alebo párne generátory. Problematikou konštrukcie rotujúcich elektromagnetických generátorov sa zaoberá teória elektrických strojov.

Lineárne elektromagnetické generátory sú vhodné pre premenu energie zo striedavého pohybu. Takýto pohyb môže poskytovať napríklad pohyb morských vln alebo pohyb ľudského tela. Nakoľko lineárne elektromagnetické generátory nepotrebuje premieňať lineárny pohyb na rotujúci majú poväčšine väčšiu efektivitu. Ich najbežnejšou aplikáciou je poväčšine napájanie senzorov s výkonom pár miliwattov. Konštrukcia takýchto

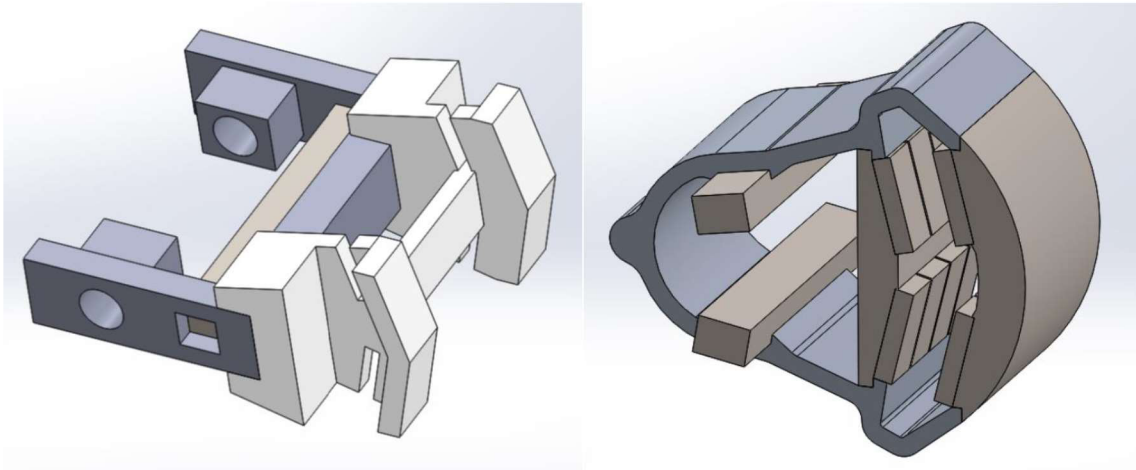
zariadení sa dá realizovať rôzne. Môžeme využiť koncept ako v [12], kde autor umiestnil permanentné magnety na nosník, ktorý sa pri vibráciách ohýbal v blízkosti cievky alebo ako v [13], kde autori využili odpudivú silu medzi magnetmi pre vytvorenie levitácie magnetov v tube okolo ktorej bola omotaná cievka, prípadne iné. Niektoré zariadenia predstavíme v nasledujúcej kapitole.

4. Existujúce lineárne magnetické generátory

V tejto kapitole predstavíme niektoré konštrukcie lineárnych elektromagnetických generátorov.

4.1 Torzný generátor pre leteckú aplikáciu

Generátor v práci [12] pozostáva z rámu držiaceho rameno, na ktorom sú umiestnené magnety. Rameno je na ráme pripevnené rotačnou väzbou a tvorí pohyblivú časť generátora. Na ráme je navinutá cievka, ktorá prechádza medzerou magnetického obvodu ramena.



Obrázok 4: rám (vľavo) a rameno (vpravo) torzného generátora [12]

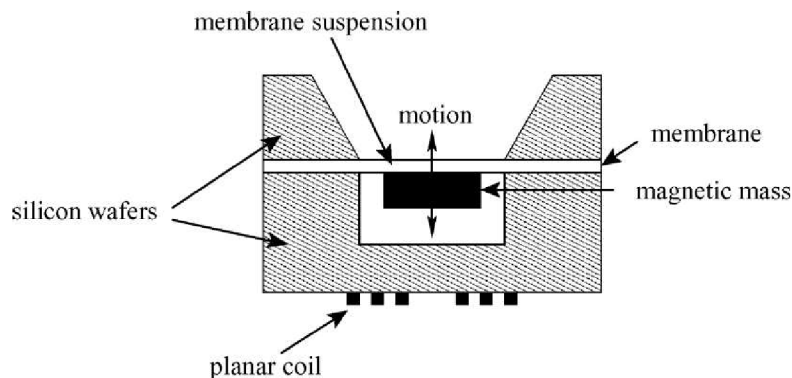
Pri návrhu magnetickej časti autor vytváral model torznej tuhosti, spoločne s modelom magnetického obvodu. Šlo mu o dosiahnutie vhodnej tuhosti a zároveň o najvyšší magnetický tok v cievke bez presýtenia v konštrukcii. Z výstupov simulácii určil rozmery a polohy magnetov.

Pri výpočte výkonu vytvoril model v programe Simulink, ktorého vstupom boli parametre z magnetických modelov. Pre dynamiku ramena boli dôležité hmotnosť, vzdialenosť ťažiska od osy otáčania, tuhosť, činiteľ akosti a moment zotrvačnosti. Tie autor získal modelovaním v programe SolidWorks.

Vyrobený generátor mal výkon 6,43mW/100g pohyblivej hmotnosti.

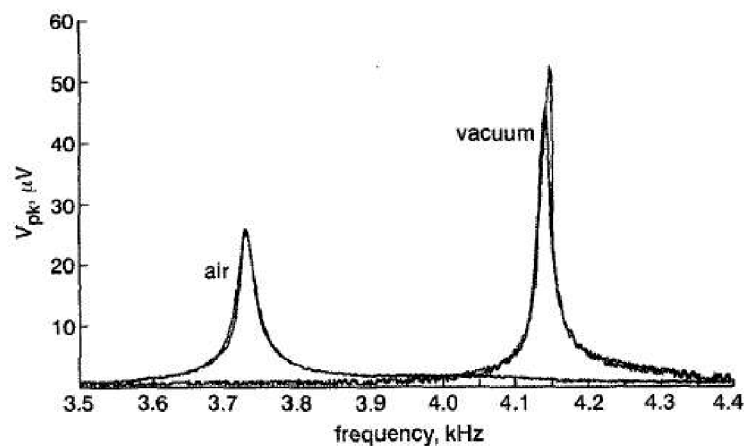
4.2 MEMS generátor

V práci [15] autori navrhli MEMS (microelectromechanical system) generátor, ktorého pohyblivou časťou bol magnet pripevnený na membráne vytvorenej z GaAs substrátu potiahnutým polyimidom, ktorá zabezpečuje robustnosť, ľahkosť výroby a možnosť dosahovať veľké výchylky. Do membrány boli vyvrtané diery ktoré umožnili odsávanie vzduchu. Použitý magnet mal rozmery 1mm x 1mm x 0,3 mm a vážil 2,4mg. Cievka mala 13 závitov, bola vyrobená zo zlata a mala priemer drôtu 2,5 μm . Výška generátora bola 700 μm .



Obrázok 5: možná implementácia membránového mikrogenerátora [14]

Pri malých výchylkách budenia mal generátor pomerne lineárnu frekvenčnú odozvu. S rastúcim budením sa rezonančná frekvencia zväčšovala a u generátora sa prejavila nelinearita. Dôvodom je pohyb prítomného vzduchu, ktorý stužuje pružnosť systému a tak redukuje výkon pretože hmotnosť nie je schopná posunúť sa tak ďaleko ako pri lineárnej pružnosti systému. Pri takto malom zariadení majú aerodynamické sily na pružnosť sústavy vysoký vplyv, nakoľko dierami v membráne prechádza pomerne veľké množstvo vzduchu. Pri odsatí vzduchu sa posúva rezonančná frekvencia generátora na vyššiu hodnotu a dosahuje vyšších výchyliek. Fenomén je znázornený na obrázku 6. Navrhnutý generátor dosahoval 0,3 μW na 4MHz.

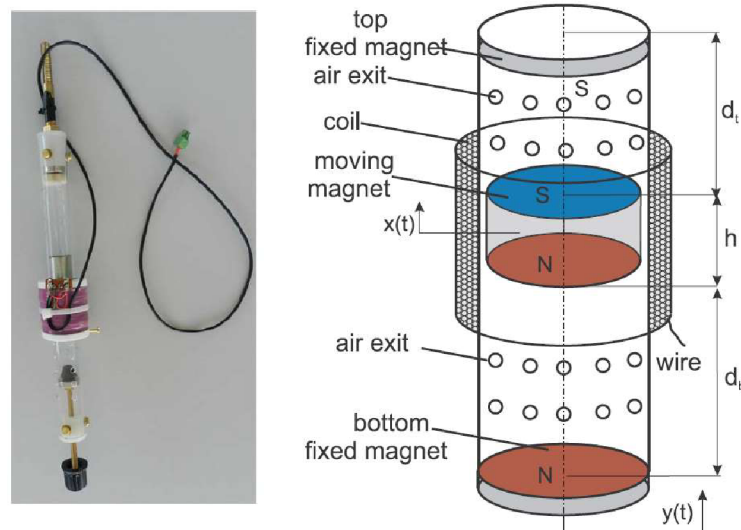


Obrázok 6: porovnanie rezonancie pri meraní so vzduchom a vo vákuu (odchýlka budenia 1mm) [15]

4.3 Maglev generátor

Názov maglev je skratka pre magnetic levitation. V práci [13] sa na takomto generátore testoval rozdiel medzi modelovaním s konštantným a s nekonštantným coupling koeficientom. Coupling koeficient popisuje závislosť medzi indukovaným napätím a rýchlosťou pohyblivej časti generátora. V tomto prípade generátor využíva levitujúci magnet.

Generátor pozostáva z valcovej cylindrickej tuby z plexiskla, na ktorej koncoch sú umiestnené dva permanentné magnety. Tretí permanentný magnet sa nachádza v tube a osciluje okolo svojej rovnovážnej polohy. Magnety sú od spodu orientované N-N S-S, aby sa navzájom odpudzovali. Okolo rovnovážnej polohy je navinutá cievka, v ktorej sa indukuje napätie. Pri okrajových magnetoch sú vyvŕtané diery, aby sa obmedzilo tlmenie. Pri testoch bol budený harmonickým signálom.



Obrázok 7: maglev generátor [13]

Model popisuje nelineárnu silu medzi magnetmi pomocou monostabilnej tvrdej Duffingovej charakteristiky

$$F = kx + k_1x^3 \quad (8)$$

kde hodnoty lineárnej a nelineárnej tuhosti (k a k_1) sú volené na základe meraní.

Výsledkom štúdie bolo, že pri správne zvolenej hodnote coupling koeficientu sa výsledky vo výpočtoch a meraniach nejak výrazne nelíšia. Pri použitých magnetoch a budení autori namerali výkon okolo 3W. Zároveň predpokladajú, že pri väčších maglev generátoroch so silnejšími magnetmi je možné získať vyšší výkon.

5. Koncept elektromagnetického vibračného generátora

Ako sme už spomínali, vibračné generátory sú mass-spring-damper systémy a konkrétne elektromagnetické vibračné generátory využívajú na premenu mechanickej energie na elektrickú princíp elektromagnetickej indukcie. Ide o dva zdanlivo odlišné problémy, ku ktorých riešeniu musíme pristupovať mechatronicky. Naskytuje sa plno možností ako elektromagnetický vibračný generátor môžeme skonštruovať, no vzhľadom na našu aplikáciu sme sa rozhodli využiť pre mechanickú časť levitáciu magnetov, ktorá poskytuje minimálne tlmenie vo forme trenia a pre elektromagnetickú časť magnetický obvod s neodymovými magnetmi a ocelovým hrncom pre vytvorenie homogénneho poľa v závitoch cievky.

4.1 Mechanická časť

Mechanická časť pozostáva z dvoch magnetov o rôznej veľkosti. Magnety sú oproti sebe situované rovnakými pólmi, aby sila medzi nimi bola odpudivá. Táto sila má nelineárnu závislosť na vzdialenosti magnetov a predstavuje silu reprezentujúcu tuhosť sústavy. Nakoľko chceme, aby mal generátor najväčší výkon (nachádzal sa v rezonancii), musíme magnety voliť tak, aby harmonický pohyb spodného magnetu spôsobil najväčšie amplitúdy v relatívnom pohybe týchto dvoch magnetov. Na levitujúci magnet ďalej pripojíme ocelovú tyč, aby si udržiaval pohyb v jednom smere a nevychýľoval sa. Na vrch tyče pripojíme magnetický obvod. Hmotnosť sústavy bude predstavovať hmotnosť celej pohyblivej časti a teda levitujúceho magnetu, tyče a magnetického obvodu. Ocelová tyč bude umiestnená v doskách s dierami vypchanými teflónovou vrstvou, ktoré zabezpečia jeho pohyb v jednom smere. Mechanické tlmenie budeme modelovať podľa rovnice:

$$F_{mech} = 2 * b_r * m * \Omega_0 * v \quad (9)$$

Kde:

b_r – pomerný útlm

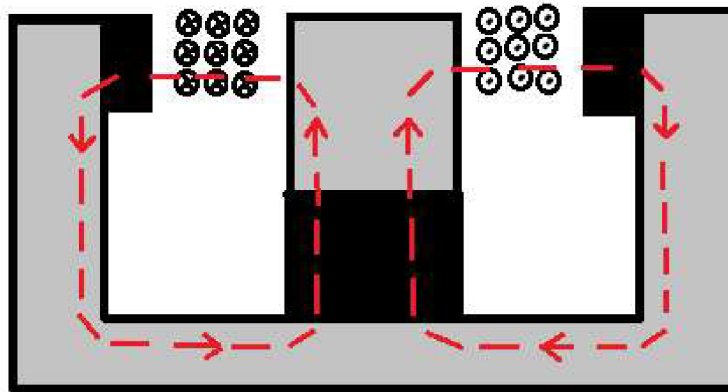
m – hmotnosť pohyblivej časti

v – rýchlosť pohyblivej časti

Ω_0 – vlastná frekvencia nelineárneho systému

4.2 Elektromagnetická časť

Elektromechanická časť pozostáva z neodymového valcového magnetu, neodymových oblúkových magnetov, ocelového hrnca, ocelového valca a cievky. Valcový neodymový magnet sa bude nachádzať v strede hrnca a pripevníme naň ocelový valec o priemere zhodnom s priemerom valcového magnetu. Na vnútorný priemer hrnca pripevníme oblúkové neodymové magnety. Pri správne zvolenej orientácii magnetov vznikne medzi ocelovým valcom a oblúkovými magnetmi homogénne magnetické pole, do ktorého umiestnime cievku.



Obrázok 8: rez magnetickým obvodom

Voľbou veľkosti magnetov zvyšujeme tok v magnetickom obvode. Pre oceľ sme zvolili maximálne magnetické sýtenie 1,5T. Vďaka valcovému homogénnemu poľu môžeme pre výpočet indukovaného napätia v cievke použiť vzorec (4). Rýchlosť v vo vzťahu (4) reprezentuje rýchlosť celej pohyblivej časti. Cievka, ako popisuje vzťah (3), sa bude brániť zmene, ktorá ju vyvolala a bude vytvárať elektrické tlmenie, ktoré vieme spočítať:

$$b_e = \frac{(N * B * l)^2}{R_z + R_l} \quad (10)$$

kde:

N – počet závitov cievky

B – magnetická indukcia

l – dĺžka jedného závitov cievky

R_z – odpor záťaže

R_l – odpor cievky

Odpor cievky je rovný odporu drôtu, ktorý naň použijeme a vypočítame ho nasledovne:

$$R_l = N * \rho * \frac{l}{S} \quad (11)$$

kde:

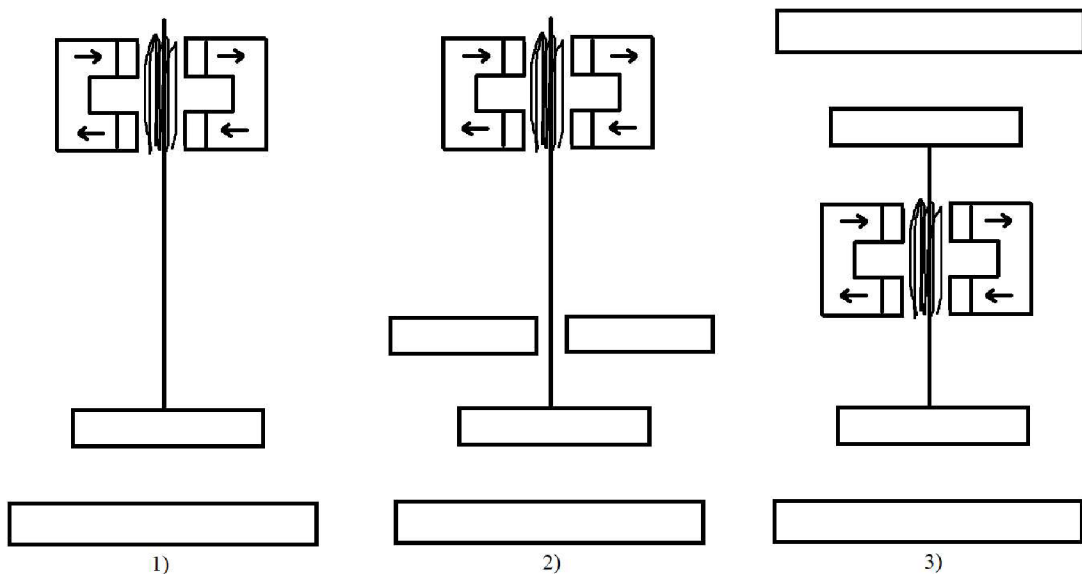
ρ – rezistivita materiálu

S – prierez cievky

Cievka bude ďalej napojená na elektrickú záťaž a bude ňou pretekať prúd závislý na indukovanom napätí a veľkosti záťaže.

Pre aplikáciu sme sa rozhodli použiť neodýmové magnety kvôli ich silným magnetickým vlastnostiam. Sú tvorené zo zliatiny neodymu, železa a bóru $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Ich citlivosť na vysoké teploty pri ktorých strácajú svoje vlastnosti a náchylnosť na koróziu nás nemusí trápiť, nakoľko sa náš generátor nebude vyskytovať vo vlhkom prostredí a ani v prostredí s vysokou teplotou.

Pri tvorbe matematického modelu sme testovali aj iné možnosti konštrukcie, ale kvôli realizovateľnosti a možnostiam ladenia sme sa nakoniec rozhodli pre variantu s oceľovým hrcnom.



Obrázok 9: iné testované konštrukcie

6. Programy pre vytvorenie modelu

Pre vytvorenie modelu budeme pracovať v programoch Matlab, Simulink, FEMM a Inventor.

6.1 Matlab

Matlab (Matrix laboratory) je výpočtový software s vlastným programovacím jazykom. Má vhodné prostredie na počítanie s maticami, vykresľovanie grafov, tvorenie algoritmov, tvorenie GUI, simulovanie a ďalšie. Matlab v našej práci využijeme na ovládanie FEMMu a Simulinku. Bude to náš hlavný program pre vytvorenie matematického modelu.

6.2 Simulink

Simulink je podprogram Matlabu. Obsahuje prostredie na grafické programovanie. Je vhodný na programovanie diferenciálnych rovníc a na tvorbu modelov. Dá sa využiť aj na real-time riadenie. V tejto práci v ňom vytvoríme vzťahy medzi pohybom magnetu a indukciou. Simulink voláme z Matlabu a po výpočte do Matlabu ukladáme vypočítané hodnoty.

6.3 FEMM

Finite element method magnetics (skrátene FEMM) je open source program, ktorý využíva metódu konečných prvkov na riešenie magnetických a elektrostatických problémov alebo problémov elektrického, či tepelného toku. Je vhodný na riešenie 2D, prípadne axisymetrických úloh. Na komplikovanejšie konštrukcie je potrebné zvoliť iný program. Konštrukciu je možné nakresliť ručne, importovať ju z CAD modelu, vytvoriť ju pomocou príkazov z programov Mathematica, Matlab, Octave, prípadne pomocou jazyka LUA 4.0. Po nakreslení konštrukcie je potrebné priradiť jednotlivým častiam ich materiálové vlastnosti a vytvoriť prostredie v ktorom sa problém rieši. Po výpočte pomocou MKP je následne v post-procesore možné vypočítať silové účinky, magnetický tok a iné. V našej práci ho využijeme na modelovanie sily medzi magnetmi v mechanickej časti a na výpočet magnetického toku cievkou v elektromagnetickej časti.

6.3 Inventor

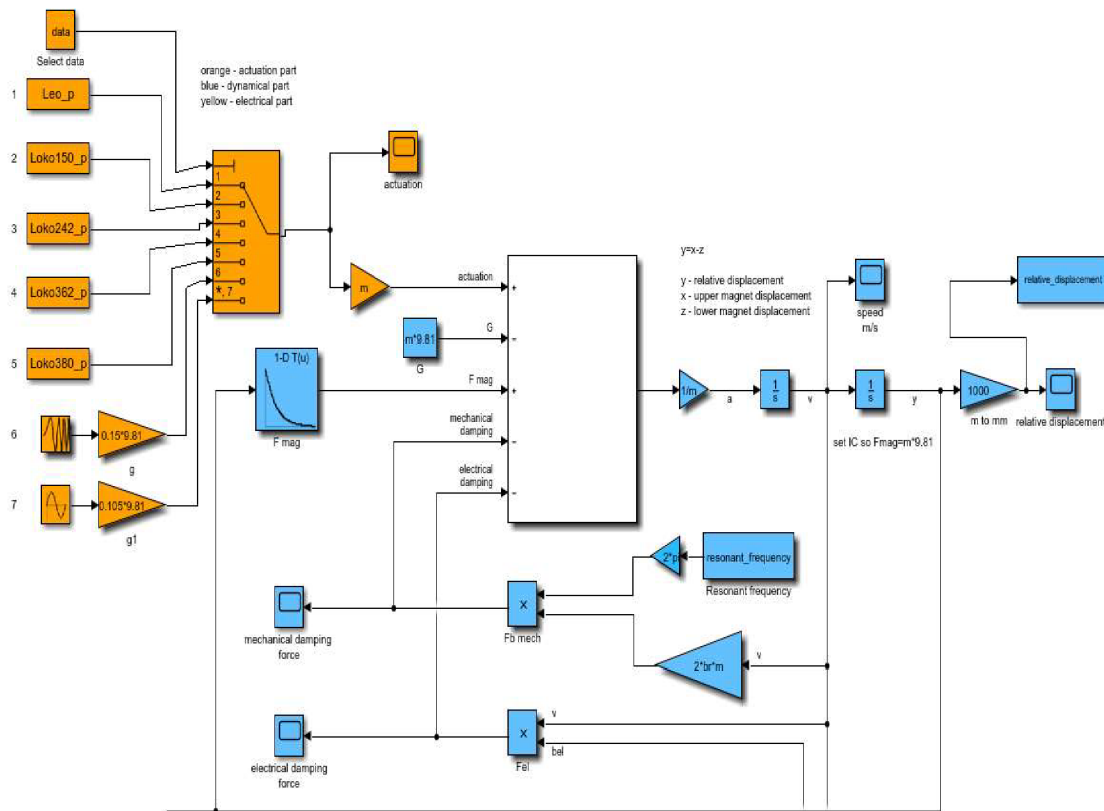
Inventor je grafický program na tvorenie konštrukcií a technickej dokumentácie. Umožňuje tvorbu 3D súčastí z ktorých je následne možné vytvoriť zostavu. Pomocou Inventoru je možné zistiť hmotnosť pohyblivej časti generátora, čoho využijeme pri návrhu parametrov pre získanie maximálneho výkonu.

7. Matematický model a návrh parametrov

Ako sme spomínali, náš model pozostáva z mechanickej časti, ktorá je reprezentovaná relatívnym pohybom celej pohyblivej časti a magnetu pripevneného na ráme konštrukcie a z elektromagnetickej časti, ktorá je reprezentovaná magnetickým obvodom. V tejto kapitole sa budeme venovať prepojeniu týchto dvoch častí a objasníme náš postup pri návrhu maximálneho výkonu na záťaži.

7.1 Model mechanickej časti

Pri návrhu mechanickej časti sa snažíme naladiť generátor vhodným výberom magnetov a hmotnosti celej pohyblivej časti do rezonancie pre najvyšší možný výkon. Pri výpočte sily medzi magnetmi vo FEMME modelujeme dva vzájomne sa vzdľahujúce magnety a následne v post-procesore z FEMMu dostávame ich závislosť sily na polohe. Tieto dáta po výpočte potrebných veličín magnetického obvodu posúvame do Simulinku, kde modelujeme pohybovú rovnicu 1) do ktorej sme pridali vplyv gravitácie.

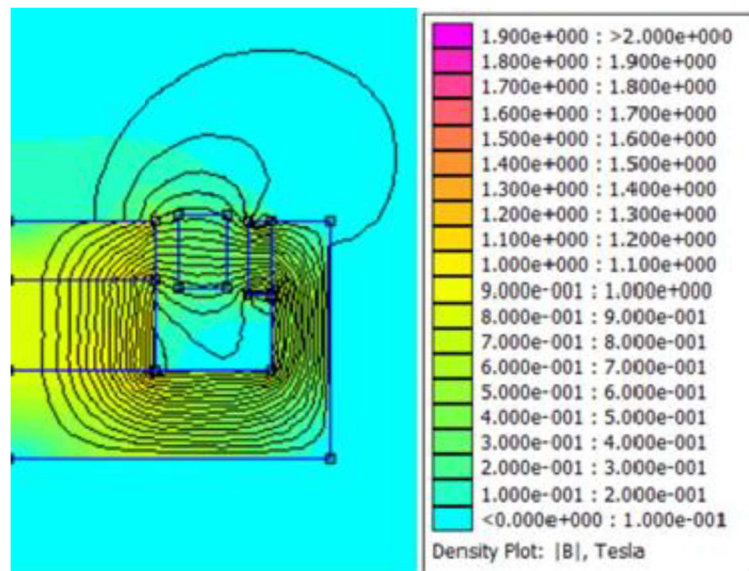


Obrázok 10: mechanická rovnica v Simulinku

7.2 Model elektromagnetickej časti

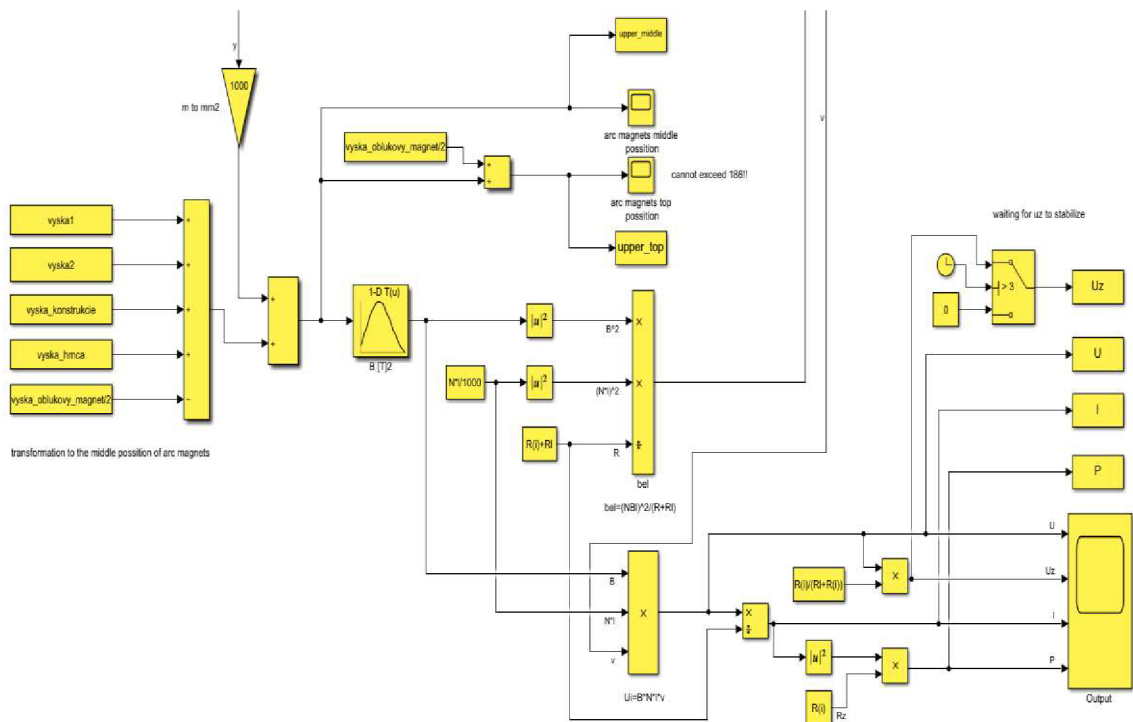
Pri návrhu elektromagnetickej časti kladieme dôraz na realizovateľnosť. Magnetický obvod realizujeme pomocou dostupných magnetov pričom sa snažíme o vytvorenie čo najsilnejšieho homogénneho magnetického poľa. Musíme však dávať pozor, aby magnetická indukcia v oceli neprekročila hodnotu 1,5T. Hmotnosť celej pohyblivej časti musí byť zhodná s hmotnosťou, pre ktorú dostávame maximálny výkon.

Výpočet magnetického toku realizujeme vo FEMMe. Magnetickú indukciu počítame v oblasti medzi valcovou oceľovou časťou v strede hrnca a oblúkovými magnetmi, kam umiestnime cievku. Zaujímá nás hodnota magnetického toku v závislosti na polohe. Magnetický obvod modelujeme pomocou axisymetrie.



Obrázok 11: Výpočet magnetickej indukcie

Vstupom do elektromagnetickej časti v Simulinku je relatívna poloha levitujúceho a fixného magnetu. Po transformácii do výšky v ktorej bude cievkou prechádzať maximálny magnetický tok môžeme pomocou rovnice 9) určiť elektrické tlmenie cievky, ktoré vstupuje do mechanickej časti. Indukované napätie v cievke určíme pomocou rovnice 4). To ďalej pomocou Ohmovho zákona vieme po pripojení záťaže prepočítať na prúd záťažou a na výkon na záťaži. Dôležitým faktorom pri výpočte maximálneho výkonu na záťaži je voľba cievky a odpor na záťaži. Maximálny výkon budeme počítať v Matlabe po získaní potrebných dát zo Simulinku.



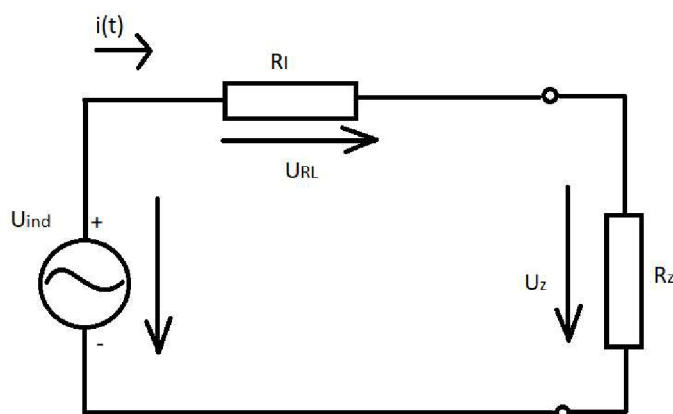
Obrázok 12: elektromagnetická časť v Simulinku

7.3 Ladenie maximálneho výkonu

Ako sme modelovaním zistili, pri použití väčších magnetov pre levitáciu sme dosiahli širšiu závislosť sily magnetov na ich relatívnej polohe a tým sme pridávaním hmotnosti do pohyblivej časti vedeli ovplyvňovať jej maximálny výkon. Hmotnosť ovplyvňuje počiatočnú polohu a teda silu reprezentujúcu tuhosť sústavy, ktorá pôsobí medzi magnetmi.

V modeli je potrebné pred spustením simulácie nastaviť počiatočnú polohu levitujúceho magnetu tak, aby sa gravitačná sila pôsobiaca na pohyblivú časť generátora rovnala sile, ktorou sa magnety v mechanickej časti odpudzujú. Zmenou hmotnosti sa zmení aj počiatočná tuhosť sústavy a teda je ťažké predpokladať pri akých parametroch bude generátor naladený na maximálny výkon. Hmotnosť môžeme ovplyvňovať zväčšovaním alebo znižovaním oceľového hrnca magnetického obvodu, pričom si musíme dávať pozor na magnetické sýtenie.

Voľba cievky ovplyvní počet závitov, v ktorých sa bude indukovať napätie a odpor cievky, ktorý vieme vypočítať podľa vzťahu 10). Pri väčšom odpore cievky sa po pripojení na záťaž bude indukovať väčšie napätie a prúd sa zmenší. Našou úlohou je nájsť ideálnu hodnotu záťaže tak, aby na nej bol čo najväčší výkon. Schéma pre zapojenie elektromagnetickej časti je na obrázku 13.



Obrázok 13: náhradná schéma elektromagnetickej časti

Kde:

U_{ind} – indukované napätie v cievke

R_l – odpor cievky

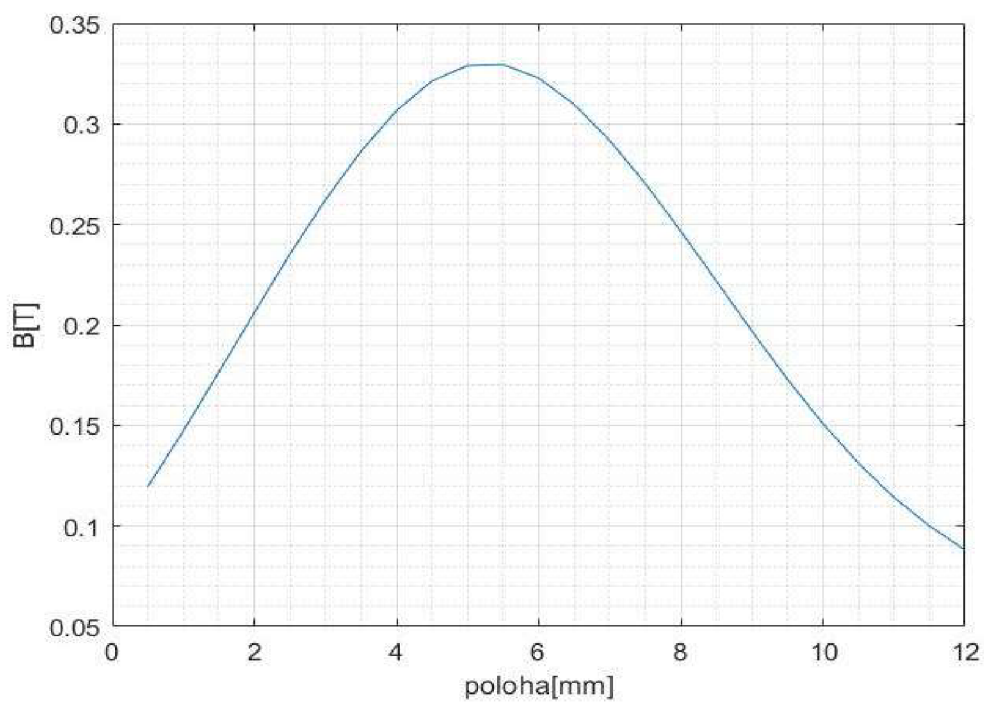
R_z – odpor na záťaži

Model budeme spúšťať pre rôzne hmotnosti a odpory na záťaži a tým dostaneme závislosti výkonu na týchto veličinách.

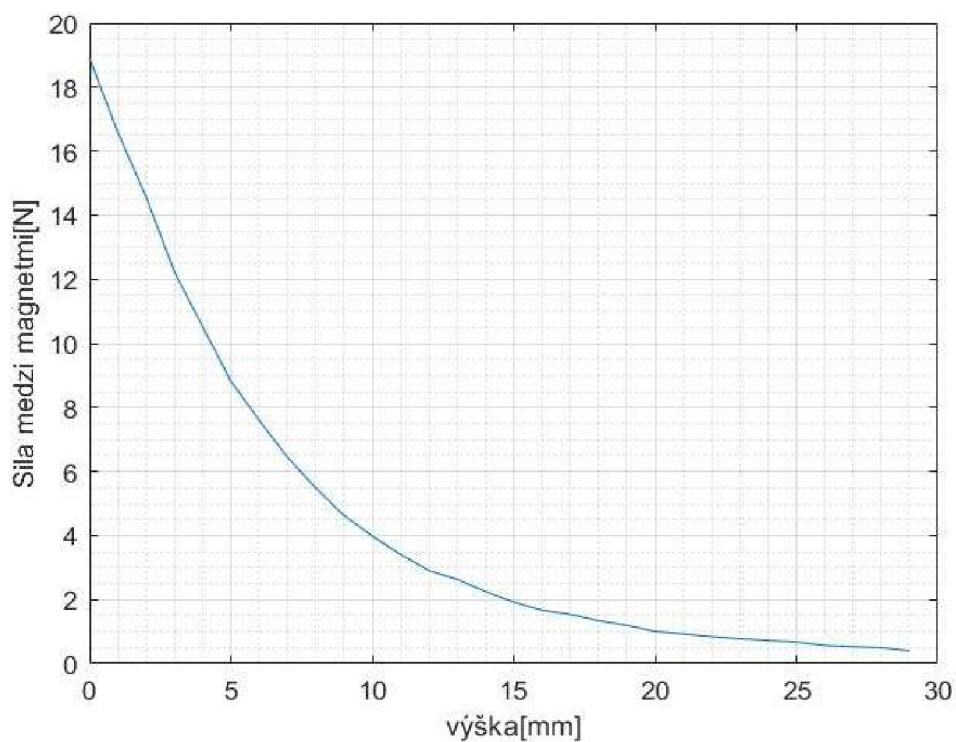
7.4 Voľba parametrov

Po modelovaní a výbere z katalógu sme sa rozhodli pre elektromagnetickú časť vybrať valcový magnet s rozmermi 10x6mm a za oblúkové magnety sme vybrali štyri magnety R17,75x r16,25x89°x5mm. Maximálnu magnetickú indukciu v cievke sme dostali približne 0,33T. Pri výpočtoch budeme cievku umiestňovať do rovnovážnej polohy s maximálnou magnetickou indukciou.

Po modelovaní a výbere z katalógu sme sa rozhodli pre mechanickú časť vybrať valcový magnet 20x10mm, ktorý bude pripevnený k oceľovému hrncu a valcový magnet 12x5mm, ktorý bude pripevnený k pohyblivej časti. Takto silné magnety zabezpečia dostatočne širokú závislosť sily na vzájomnej vzdialenosti a pridávaním hmotnosti sa bude ľahko ladiť maximálny výkon. Závislosť sily na vzájomnej vzdialenosti je na obrázku 14.



Obrázok 14: závislosť magnetickej indukcie na polohe cievky vzhľadom k magnetickému obvodu

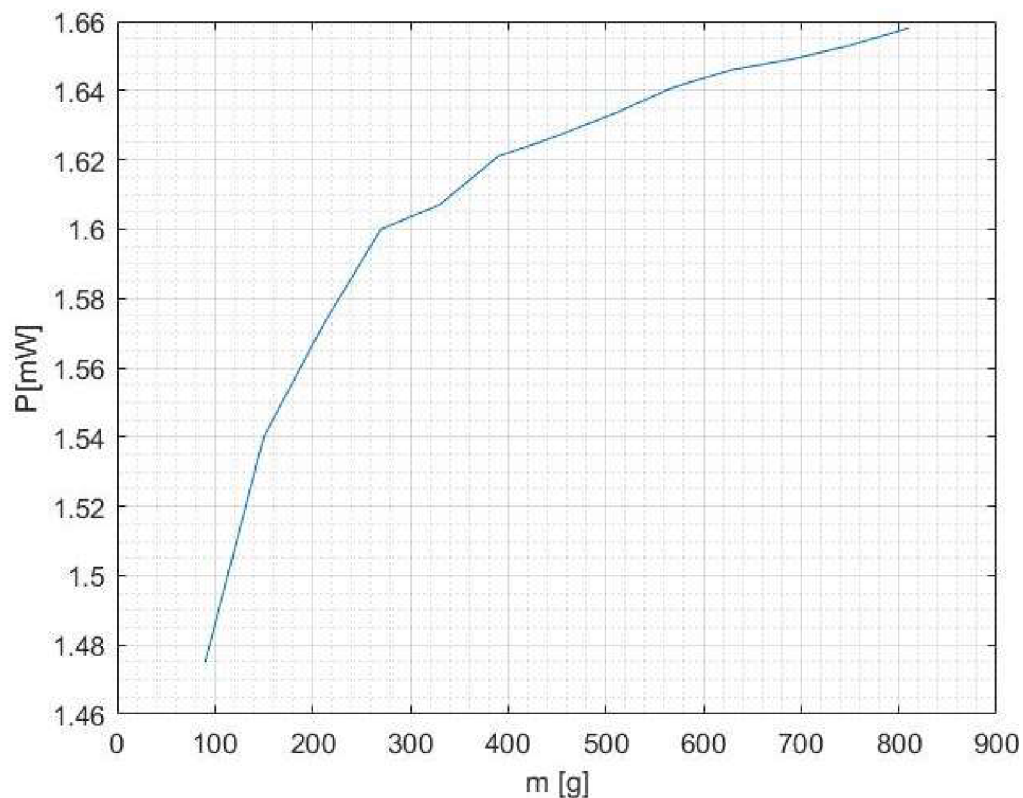


Obrázok 15: závislosť sily medzi magnetmi na polohe

Ladenie sme vykonávali na jednej vzorke neperiodického signálu, ktorý sa bude využívať v ďalšej aplikácii, pre cievku s priemerom 0,1mm pri rôznych záťažach pričom nás zaujímala najväčšia hodnota priemerného výkonu. Simulácie sme spúšťali po šesťdesiatich gramoch s časom šesť sekúnd, kedy už signál doznel pri konštantných parametroch tlmenia - vlastnej frekvencii generátora 5,8Hz a pomernom útlme 0,1, ktoré majú vplyv na silu mechanického tlmenia vo vzťahu 9).

Voľba konštantného tlmenia pre všetky merania však nie je úplne na mieste nakoľko sa tlmenie s rastúcou hmotnosťou mení. Ak sa pozrieme na obrázok 15, vidíme, že sa s rastúcou vzdialenosťou medzi magnetmi tuhosť sústavy znižuje. Zariadenie kmitá okolo rovnovážnej polohy v ktorej platí, že sila medzi magnetmi je veľkosťou rovná gravitačnej sile, ktorá pôsobí na pohyblivú časť generátora. S väčšou hmotnosťou pohyblivej časti sa teda magnet prilepený na spodok pohyblivej časti nachádza v oblasti s vyššou tuhosťou. Je tak komplikované určiť vlastnú frekvenciu zariadenia, ktorá má vplyv na tlmenie. Rozhodli sme sa teda s istou chybou určiť vlastnú frekvenciu zariadenia za konštantnú počas celého merania.

Za odpor cievky sme volili hodnotu, ktorú sme si vypočítali na základe jej geometrických vlastností. Ako môžeme vidieť na obrázku 16, maximálny priemerný výkon pri použitých magnetoch sa asi po hmotnosti 400g veľmi výrazne nemení.



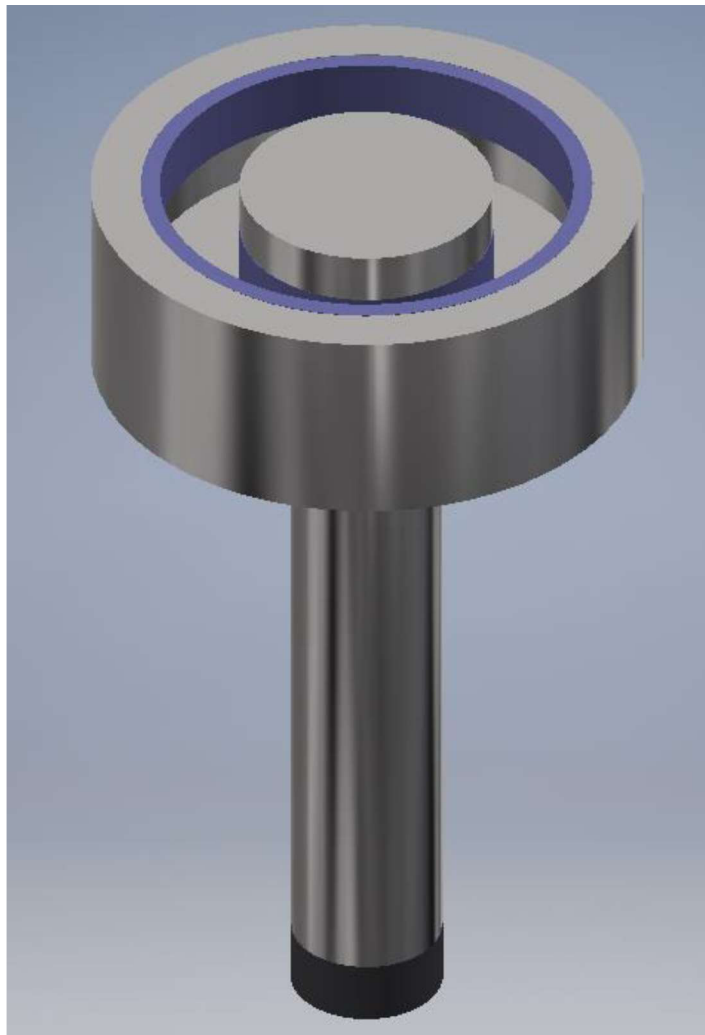
Obrázok 16: graf závislosti výkonu na hmotnosti

8. Konštrukčné riešenie

Navrhnutá konštrukcia sa skladá z pohyblivej časti z a rámu.

8.1 Pohyblivá časť

Pohyblivá časť pozostáva z magnetického obvodu, tyče a z magnetu. Kvôli maximálnemu výkonu sa snažíme pohyblivú časť navrhnuť tak, aby jej celková hmotnosť odpovedala maximálnemu výkonu. Túto hmotnosť vieme sústrediť do ocelového hrnca magnetického obvodu. Ocelový hrniec pripevníme šrúbovým spojom k ocelevej tyči a následne naňho lepidlom pripevníme magnet 20x10 s ocelovým valcom a oblúkové magnety. Na druhý koniec tyče prilepíme magnet veľkosti 12x5.

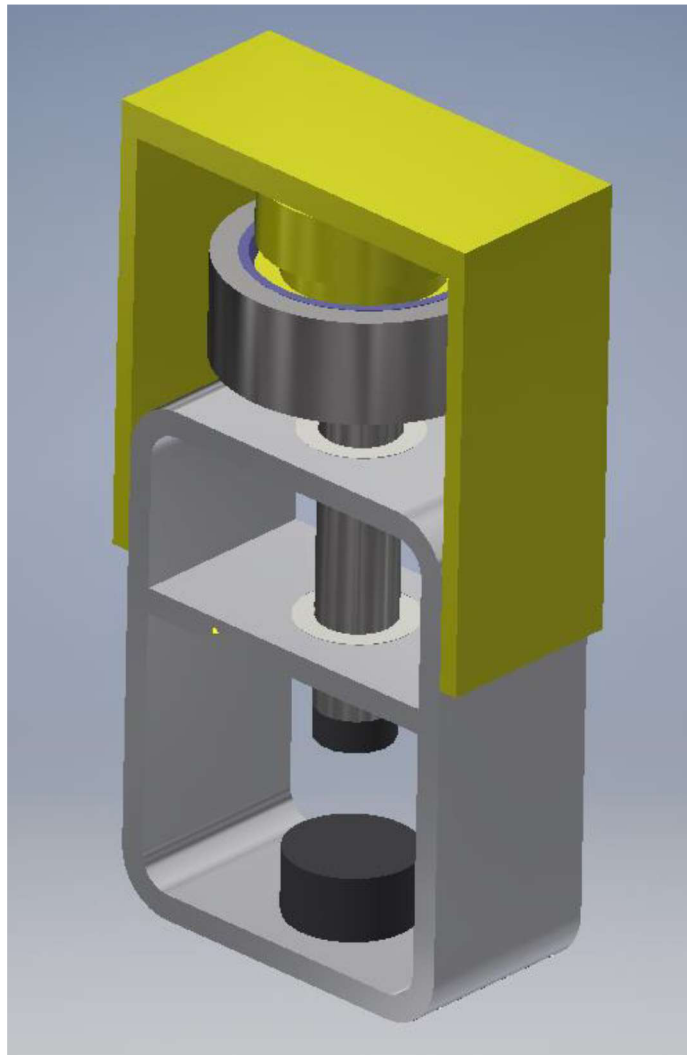


Obrázok 17: návrh pohyblivej časti

8.2 Rám

Úlohou rámu je udržovať lineárny pohyb pohyblivej časti a prenášať budiace vibrácie. Rám pozostáva z hliníkového jäkla o rozmeroch 80x60x4mm a o dĺžke 30mm. Do jäkla je vyvrtaná diera o priemere 18,5mm do ktorej je vložená teflónová vložka, aby bolo dosiahnuté čo najnižšie trenie s oceľovou tyčou. Kvôli zabezpečeniu lineárneho pohybu pohyblivej časti je do jäkla prilepená hliníková priečka so zhodnou vyvrtanou dierou a teflónovou vložkou. Na spodok jäkla je prilepený magnet 20x10mm tak, aby jeho os bola zhodná s osou vyvrtaných dier.

Cievka je namotaná na jadre z ABS plastu. Jadro je nalepené na držiak rovnako z ABS plastu. Všetky časti držiace cievku sú vytlačené na 3D tlačiarňi. Na obrázku 18 ich môžeme vidieť žltou farbou. Takýto návrh je možné prilepiť na rám tak, aby cievka bola umiestnená v rovnovážnej polohe oblúkových magnetov.

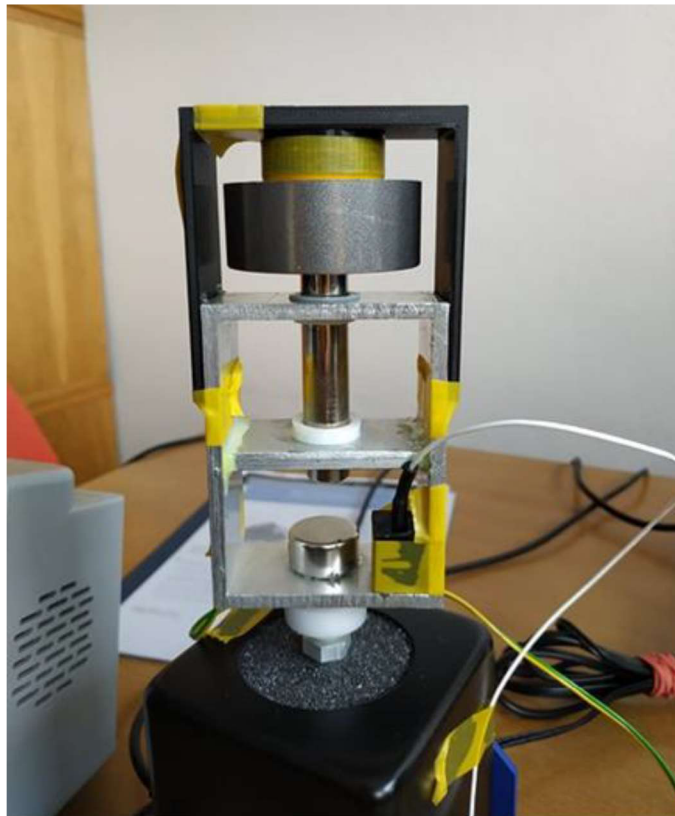


Obrázok 18: celková konštrukcia

9. Merania

Nakoľko náš generátor bol vyrobený ručne, nastala istá zmena v parametroch oproti modelu. Navinulo sa menej závitov cievky, čo má vplyv na jej odpor a na indukované napätie. Pri lepení strednej priečky dvojjložkovým lepidlom bola snaha o dosiahnutie rovnakej osy symetrie diery v priečke a v jähli, ale presnosť treba brať s istou rezervou, čo sa prejaví na pomernom mechanickom útlme. To isté môžeme povedať aj o polohe magnetov. Parametre modelu teda musíme upraviť, aby sme z neho dostávali reálne výsledky.

Na budenie sme pri meraní používali vibračné zariadenie značky The modal shop, ktoré sme napájali zo zdroja striedavého napätia. Do jähla vedľa spodného magnetu sme uložili akcelerometer a vývody z cievky sme napojili na premenlivú záťaž, na ktorej sme merali úbytok napätia.

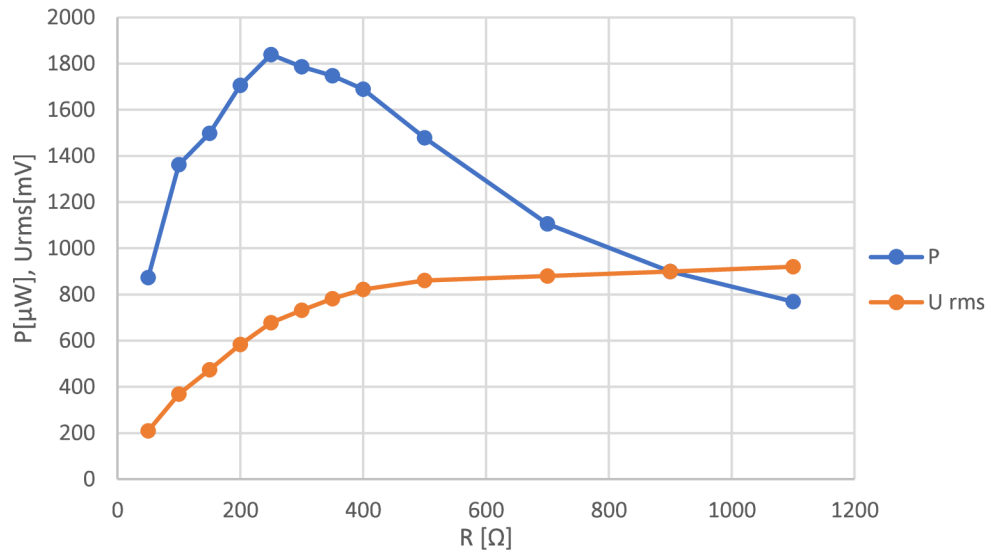


Obrázok 19: Meranie

Signál z akcelerometra bol periodický na nízkych frekvenciách, ale za harmonický sa pokladať nedal. Harmonický signál pripomínal až pri frekvenciách vyšších ako 20Hz. Vzťah medzi amplitúdou signálu zo zdroja striedavého napätia a amplitúdou budiaceho zrýchlenia nebol lineárny a teda sme pri každom zápise hodnôt museli budiace zrýchlenie kontrolovať a nastavovať v nami stanovenom rozmedzí.

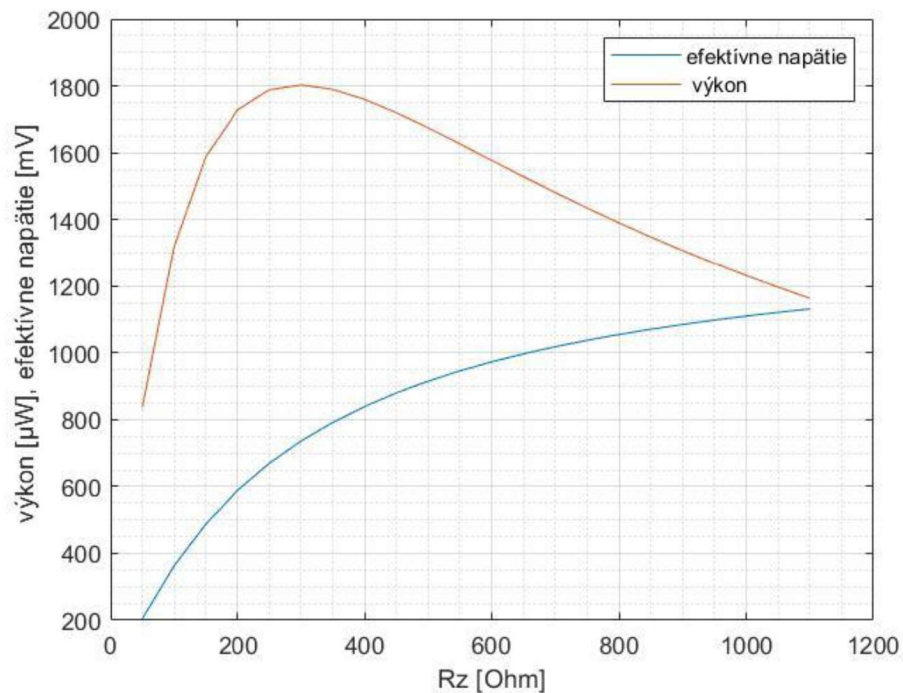
9.1 Ideálny odpor zát'aže

Pri zisťovaní ideálneho odporu zát'aže sme merali závislosť hodnoty výkonu a efektívneho napätia na zát'aži. Meranie prebiehalo pri buzení 5Hz o zrýchlení v rozmedzí 100-110mg.



Obrázok 20: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na zát'aži 5Hz, meranie

Ako je na obrázku 20 vidieť, maximálny výkon sme namerali približne na zát'aži o odpore 200 Ω . Nameraný výkon mal hodnotu 1838 μW .

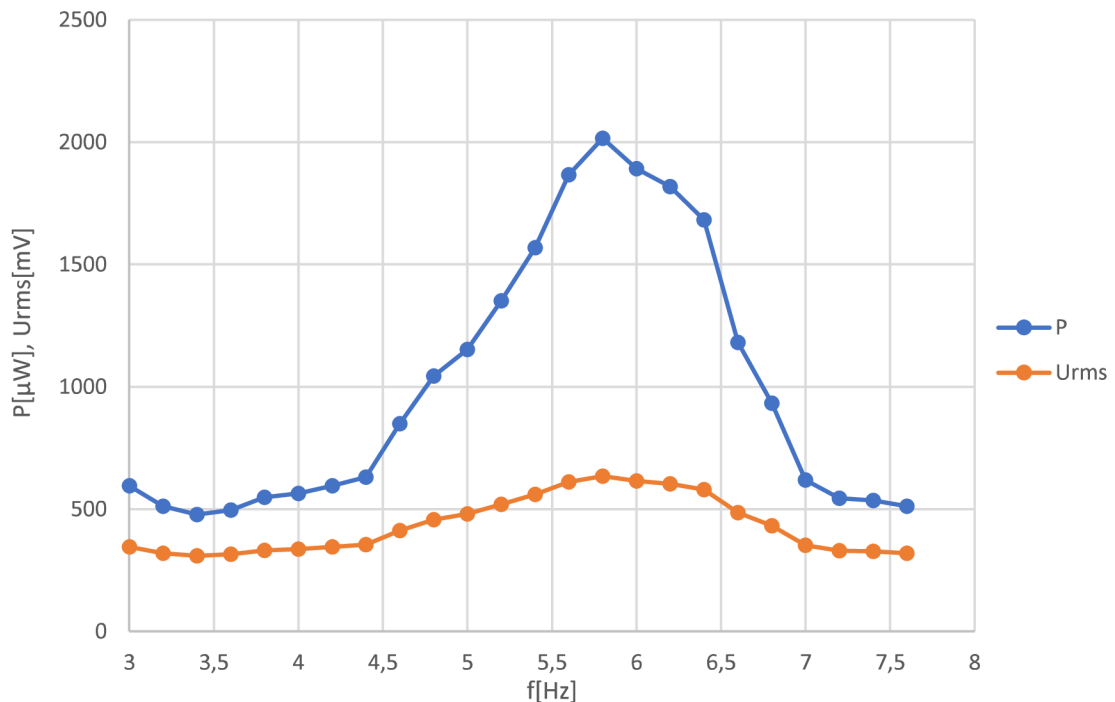


Obrázok 21: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na zát'aži 5Hz, model

Pri porovnaní obrázkov 20 a 21 môžeme povedať, že model pri rezonančnej frekvencii 5,8Hz, ktorú sme namerali na ďalšom meraní, a pri pomernom útlme 0,06 vcelku odpovedá realite.

9.2 Frekvenčná charakteristika pri záťaži 200Ω

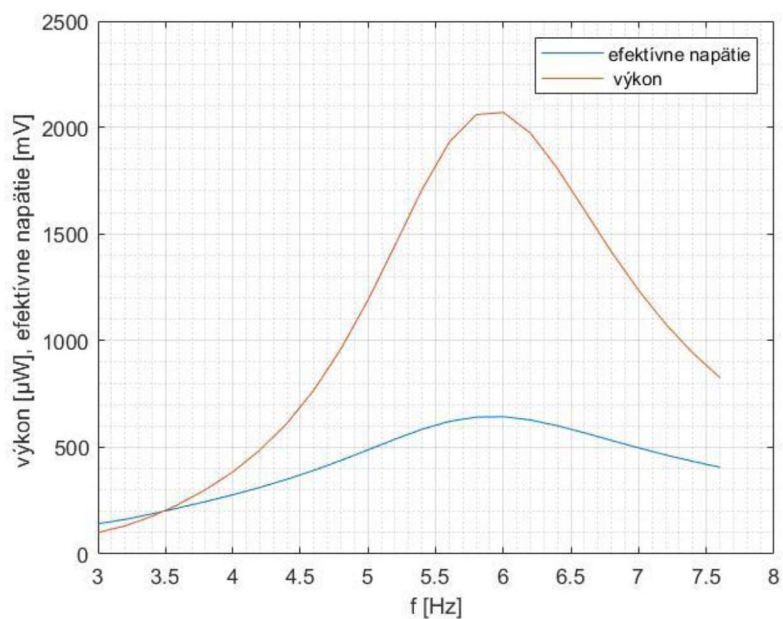
V tomto meraní sme zisťovali závislosť výkonu a efektívneho napätia na frekvencii pri konštantnej záťaži 200Ω . Meranie sme začali na 3Hz a postupne sme frekvenciu zvyšovali s krokom 0,2Hz. Budenie ostalo rovnaké ako v predchádzajúcom meraní.



Obrázok 22: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na frekvencii pri konštantnej záťaži 200Ω , meranie

Meranie bolo komplikované, nakoľko pri zvýšení frekvencie sa nám zvyšovala aj hodnota zrýchlenia, ktorú sme museli upravovať znížením amplitúdy signálu vchádzajúceho do vibračného zariadenia. Pri frekvenciách blízkyh rezonančnej frekvencii sme pozorovali skokovú zmenu v zrýchlení. Pre dosiahnutie požadovaného zrýchlenia sme museli aplikovať ďalšie tlmenie, ktoré nám skreslilo výsledky.

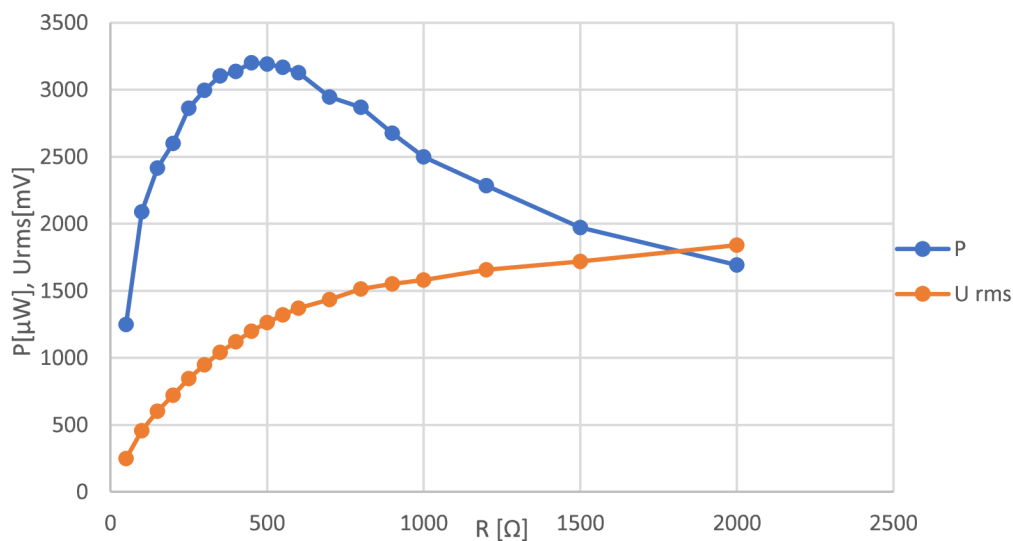
Model hodnotami zhruba odpovedal meraniu v oblasti rezonancie pri hodnote pomerného útlmu 0,12. Hodnota rezonančnej frekvencie však v realite aj v modeli odpovedá, sedí aj pre ďalšie merania a teda ju môžeme považovať za správnu.



Obrázok 23: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na frekvencii pri konštantnej záťaži 200Ω , model

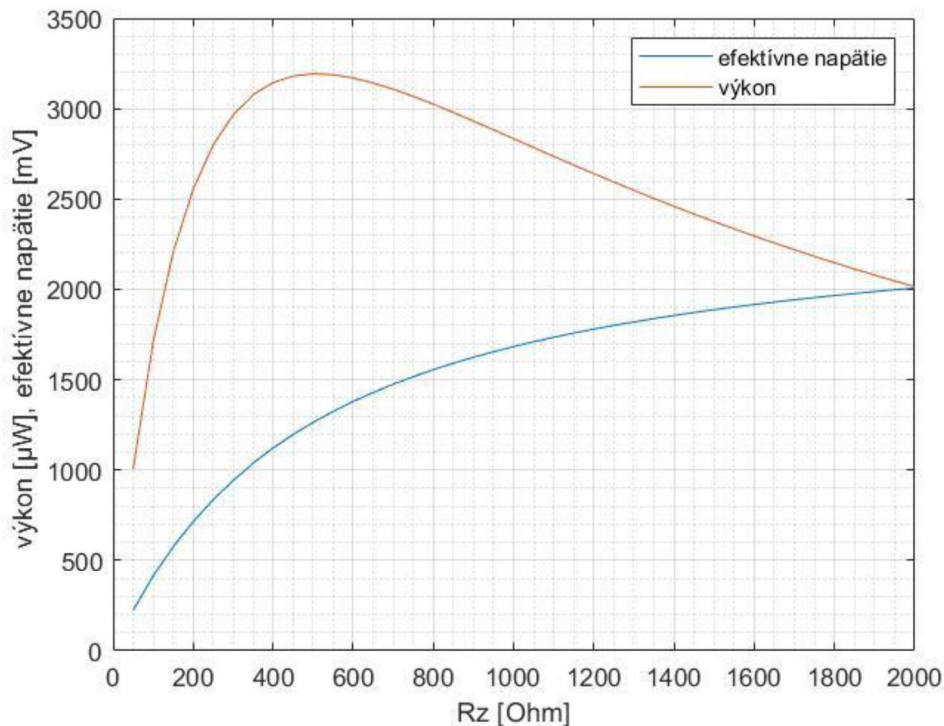
9.3 Ideálny odpor záťaže pri budiacej frekvencii rovnej rezonančnej frekvencii

Ako poslednú sme opäť merali závislosť výkonu a efektívneho napätia na hodnote záťaži pri budiacej frekvencii 5,8 Hz, ktorú sme v minulom meraní označili za rezonančnú frekvenciu.



Obrázok 24: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži pri budení 5,8Hz, meranie

Ako môžeme na obrázku 24 vidieť, maximálny výkon sme namerali na odpore 450Ω . Táto hodnota v našom modeli približne sedí pri pomernom útlme 0,1.



Obrázok 25: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži pri budení 5,8Hz, model

Odôvodnenie prečo sa maximálny výkon nachádza pri budení o frekvencii 5,8Hz na inom odpore na záťaži ako pri 5Hz sa nachádza v 3D grafe, kde je výkon zobrazený v závislosti na odpore na záťaži a na frekvencii pri konštantnej veľkosti zrýchlenia budenia a pri konštantnom pomernom útlme. Podmienku konštantného pomerného útlmu však kvôli nepresnostiam vo výrobe nie sme schopní splniť. Pre splnenie podmienky konštantnej veľkosti zrýchlenia by sme museli použiť budič vibrácií s regulátorom, ktorý by bol schopný udržiavať konštantné zrýchlenie.

Pre spoľahlivejšie výsledky a lepší chod zariadenia je potrebné zvýšiť presnosť pri výrobe a meranie realizovať na vibračnom zariadení, ktoré je schopné s premenlivou frekvenciou vibrácií udržiavať konštantné zrýchlenie.

10. Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť rešerš magnetických generátorov pre nízke budiace frekvencie, analyzovať a navrhnuť koncepciu konštrukcie generátora, vytvoriť jeho matematický model, navrhnuť jeho parametre, dať generátor vyrobiť, otestovať ho, spracovať namerané dáta a porovnať ich s matematickým modelom.

Rešeršou magnetických generátorov pre nízke budiace frekvencie sme zistili, že sa lineárne magnetické generátory používajú v rôznych aplikáciách a v rôznych veľkostiach, napríklad v leteckom priemysle či pre získavanie energie z prílivu alebo z pohybu ľudského tela. Všetky lineárne magnetické generátory fungujú na princípe magnetickej indukcie, kde magnetické pole poskytuje permanentný magnet.

Druhým bodom tejto práce bolo analyzovať a navrhnuť koncepciu konštrukcie generátora. Konštrukcia generátora sa skladala z pohyblivej časti a z rámu. Pohyblivá časť bola tvorená z hrncového magnetického obvodu, v ktorom sme vytvorili oblasť s homogénnym magnetickým poľom do ktorého sme umiestnili cievku, z tyče a zo spodného magnetu, ktorý s magnetom umiestneným na ráme tvoril tuhosť sústavy. Cievka bola omotaná okolo jadra, ktoré bolo fixne prilepené na rám generátora. Pre výrobu sme vytvorili 3D model v programe Inventor. Parametre sme volili na základe výpočtov z modelu.

Matematický model pozostával z mechanickej a z elektrickej časti, ktoré sa navzájom ovplyvňovali. V mechanickej časti sme v programe FEMM modelovali silu medzi spodným magnetom pohyblivej časti generátora a magnetom pripevneným na rám. Vytvorili sme model v programe Simulink, ktorý vychádza z rovnice odvodenéj z druhého Newtonovho zákona. V elektrickej časti sme vo FEMMe vypočítali magnetický tok cievkou. Model v Simulinku sme rozšírili o elektrickú časť, v ktorej sme modelovali elektromagnetickú indukciu v cievke v závislosti na polohe pohyblivej časti a do mechanickej časti sme pridali elektrické tlmenie.

Meraniami sme zistili, že vyrobený generátor dosahoval s modelom po úprave idealizovaných parametrov cievky a pomerného útlmu podobný výkon a napätie. Výkon generátora tohto konceptu by sa do budúcnosti dal zvýšiť použitím silnejších magnetov v magnetickom obvode, tenšej cievky a presnejšou výrobou.

11. Zoznam obrázkov

Obrázok 1: mass-spring-damper systém [3]	12
Obrázok 2: amplitúdovo-frekvenčná charakteristika lineárneho a nelineárneho systému [4].....	12
Obrázok 3: typy elektrostatických generátorov [10]	15
Obrázok 4: rám (vľavo) a rameno (vpravo) torzného generátora [12]	17
Obrázok 5: možná implementácia membránového mikrogenerátora [14]	18
Obrázok 6: porovnanie rezonancie pri meraní so vzduchom a vo vákuu (odchýlka budenia 1mm) [15].....	18
Obrázok 7: maglev generátor [13].....	19
Obrázok 8: rez magnetickým obvodom.....	21
Obrázok 9: iné testované konštrukcie	22
Obrázok 10: mechanická rovnica v Simulinku.....	25
Obrázok 11: Výpočet magnetickej indukcie.....	26
Obrázok 12: elektromagnetická časť v Simulinku.....	27
Obrázok 13: náhradná schéma elektromagnetickej časti	28
Obrázok 14: závislosť magnetickej indukcie na polohe cievky vzhľadom k magnetickému obvodu	29
Obrázok 15: závislosť sily medzi magnetmi na polohe.....	29
Obrázok 16: graf závislosti výkonu na hmotnosti	30
Obrázok 17: návrh pohyblivej časti	31
Obrázok 18: celková konštrukcia	32
Obrázok 19: Meranie	33
Obrázok 20: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži 5Hz, meranie.....	34
Obrázok 21: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži 5Hz, model.....	34
Obrázok 22: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na frekvencii pri konštantnej záťaži 200Ω, meranie.....	35
Obrázok 23: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na frekvencii pri konštantnej záťaži 200Ω, model	36
Obrázok 24: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži pri budení 5,8Hz, meranie.....	36
Obrázok 25: Závislosť výkonu a efektívneho napätia na záťaži pri budení 5,8Hz, model	37

12. Zoznam použitej literatúry

- [1] Narita, F., & Fox, M. (2018, May 1). A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications. *Advanced Engineering Materials*. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adem.201700743>
- [2] Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 17(12). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>
- [3] Roundy S 2003 Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion PhD Thesis University of California, Berkeley
- [4] Wang, X., & Mortazawi, A. (2016). Bandwidth Enhancement of RF Resonators Using Duffing Nonlinear Resonance for Wireless Power Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(11), 3695–3702. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2603984>
- [5] Holler, F. James; Skoog, Douglas A. & Crouch, Stanley R. (2007). *Principles of Instrumental Analysis* (6th ed.). Cengage Learning. p. 9. ISBN 978-0-495-01201-6.
- [6] Gaultschi, G. (2002). *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Springer. doi:10.1007/978-3-662-04732-3. ISBN 978-3-662-04732-3.
- [7] Arnau, A., & Soares, D. (2008). Fundamentals of piezoelectricity. In *Piezoelectric Transducers and Applications* (pp. 1–38). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77508-9_1
- [8] PETRŽÍLKA, Václav; BARTOLOMĚJ, Slavík. *Piezoelktřina a její použití v technické praxi*. [s.l.]: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, Petr DUB, ed. *Fyzika. 2., přeprac.* vyd. Brno: VUTIUM, 2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [10] Roundy S, Wright P and Pister K 2002 Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters Proc. IMECE 2002 pp 1–10

- [11] Jiang, X., Li, Y., & Li, J. (2013). Design of a novel linear permanent magnet vibration energy harvester. In *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013* (pp. 1090–1095). <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584239>
- [12] RUBEŠ, O. *Vibrační generátor pro letecké aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..
- [13] Kecik, K., Mítura, A., Lenci, S., & Warminski, J. (2017). Energy harvesting from a magnetic levitation system. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. <http://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021>
- [14] S. Shearwood, R. B. Yates, “Development of an electromagnetic micro-generator”, *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1883-1884, Oct. 1997
- [15] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. E. Yeatman, and A. S. Holmes, “Architectures for Vibration-driven Micropower Generators”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, Issue 3, pp. 429-440, June 2004.

13. Zoznam použitých skratiek a symbolov

m	hmotnosť
b_{el}	elektrické tlmenie
b_m	mechanické tlmenie
z	relatívna poloha cievky a magnetu
y	aktuálna výchylka pri buzení
ω_0	vlastná frekvencia
k	tuhosť
u_{ind}	indukované napätie
N	počet závitov cievky
φ	magnetický tok
t	čas
B	magnetická indukcia
v	rýchlosť
r	dráha
F_1	sila pôsobiaca na vodič
F_c	sila medzi kondenzátormi
ε	relatívna permeabilita
U	napätie
d	vzdialenosť medzi doskami kondenzátora
S	plocha dosiek kondenzátora
F_{mech}	sila od mechanického tlmenia
b_r	pomerný útlm
Ω_0	vlastná frekvencia nelineárnej sústavy
R_z	odpor záťaže
R_l	odpor cievky
l	dĺžka cievky
$NdFeB$	neodým
ρ	merný elektrický odpor
P	výkon
rms	root mean square (efektívna hodnota)

14. Zoznam príloh

A – hlavný skript v programe Matlab, dáta

B – model v programe Simulink

C – 3D model v programe Inventor