



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

**ÚPRAVA KONSTRUKCE A REALIZACE
ELEKTROMAGNETICKÉHO GENERÁTORU S KYVNÝM
MECHANISMEM**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Pinček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Ladislav Pinček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
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:

Úprava konstrukce a realizace elektromagnetického generátoru s kyvným mechanismem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci projektů a dlouhotrvajícího výzkumu se na pracovišti vyvíjejí piezoelektrické a elektromagnetické generátory, které generují elektrickou energii z okolního mechanického pohybu. Jedním s těchto vyvinutých zařízení je i elektromagnetický generátor s Tusiho mechanismem. Tento generátor při použití v průmyslových aplikacích nevyužívá celý rozsah svého pracovního bodu a je potřeba konstrukci upravit a naladit na požadované parametry.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše energy harvesting zdrojů, které jsou založené na principu kyvadla,
- 2) Model Tusiho generátoru s poloviční konstrukcí,
- 3) Návrh a realizace upravené konstrukce generátoru.

Seznam doporučené literatury:

SMILEK, Jan, Zdenek HADAS, Jan VETISKA a Steve BEEBY, 2018. Rolling mass energy harvester for very low frequency of input vibrations. Mechanical Systems and Signal Processing.

PRIYA, Shashank a Daniel J. INMAN, ed., 2009. Energy Harvesting Technologies [online]. Boston, MA: Springer US.

BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE, 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Measurement Science and Technology [online]. 17(12), R175–R195.

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 práca sa venuje návrhu a realizácii upravenej konštrukcie generátora s valiaticim členom, ktorý vychádza z generátora zostrojeného na VUT. Okrem samotnej konštrukcie je súčasťou práce aj zostavenie komplexného simulačného modelu, ktorý je základom návrhu parametrov komponentov použitých na zostavenie generátora. Tento generátor by mohol nájsť využitie v priemyslových aplikáciách s veľmi nízkymi budiacimi frekvenciami.

Abstract

This work deals with design and construction of generator with undulating particle, which has been based on generator manufactured on VUT. Beside the construction itself, part of the thesis is also a development the complex simulation model, which has been used for setting the parameters of components used for assembly of the generator. This generator might have practical use in industrial applications with very low excitation frequencies.

Kľúčové slová

Energy harvesting, Tusiho mechanismus, Elektromagnetická indukcia, Elektro-mechanické kmitanie, Simulačné modelovanie

Keywords

Energy harvesting, Tusi couple, Electromagnetic induction, Electro-magnetic oscilattion, Simulations

Bibliografická citácia

PINČEK, Ladislav. *Úprava konstrukce a realizace elektromagnetického generátoru s kyvným mechanismem*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116850>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Úprava konštrukcie a realizácia elektromagnetického generátora s kyvným mechanizmom som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za jeho cenné rady a pripomienky, za pomoc pri zostavovaní zariadenia a v neposlednom rade za jeho trpezlivosť.

Obsah

1	Úvod	10
2	Ciele práce	11
3	Vibračné generátory založené na princípe kyvadla.....	12
3.1	Prehľad vibračných generátorov založených na princípe kyvadla	13
3.1.1	Kyvadlový piezoelektrický generátor so zvyšujúcim prevodom budiacich frekvencií	13
3.1.2	Kyvadlový generátor využívajúci magnetostrikčný jav k elektromechanickej premene energie.....	14
3.1.3	Nízkofrekvenčný kyvadlový generátor určený pre podvodné oceánske kotviace plošiny	15
3.1.4	Vibračný kyvadlový generátor s nelineárnou tlmiacou charakteristikou ...	15
4	Vibračný generátor založený na Tusiho mechanizme.....	17
5	Úprava konštrukcie vibračného Tusiho generátora.....	19
6	Simulačný model generátora	20
6.1	Kinematika odvaľovania.....	20
6.2	Dynamické správanie.....	21
6.3	Elektromechanické deje	23
6.3.1	Indukované napätie	23
6.3.1.1	Indukované napätie sériovo zapojených indukčných cievok.....	24
6.3.1.2	Indukované napätie paralelne zapojených indukčných cievok	25
6.3.2	Elektromagnetické tlmenie	26
6.3.2.1	Elektromagnetické tlmenie sériovej realizácie obvodu	26
6.3.2.2	Elektromagnetické tlmenie paralelnej realizácie obvodu	27
6.4	Magnetický obvod	27
7	Model generátora v Simulinku	29
7.1	Rozloženie magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky	30
7.2	Závislosť efektívneho napätia a výkonu na zaťažujúcom odpore	31
7.3	Amplitúdovo – frekvenčná charakteristika.....	32
8	Konštrukčné riešenie	33
8.1	Výroba a zostavenie funkčného prototypu generátora	36
8.2	Určenie faktora kvality mechanického spracovania.....	37
8.3	Súhrn simulačných a nameraných parametrov generátora	38
9	Vyhodnotenie výsledkov nameraných dát z testovania generátora	39

9.1	Sériové zapojenie indukčných cievok.....	40
9.2	Paralelné zapojenie indukčných cievok.....	41
10	Záver	42
11	Zoznam použitej literatúry	43
12	Zoznam obrázkov	45
13	Zoznam príloh	46

1 Úvod

Prepojenie vstavaných zariadení s internetom známe pod skratkou IoT je globálnym trendom a realitou dnešných dní. Prepájanie zariadení by malo priniesť nové možnosti ovládania, interakcie, sledovania a zabezpečovania. Človek sa tak stáva súčasťou globálneho systému informácií a dát. Treba podotknúť, že všeobecne je prezentovaná pozitívna stránka vecí, v každom prípade má takýto systém aj svoje negatíva ktorých sa treba vyvarovať. Verím však, že v určitých oblastiach vývoj jednoznačne smeruje správnym smerom a využitie modernej elektroniky prispieva ku skvalitneniu života. S globálnym využitím elektronických zariadení tak logicky vzniká požiadavka inovatívneho spôsobu ich napájania.

Najbežnejším riešením napájania mobilných elektronických zariadení je momentálne stále použitie batérií. Batérie sú pomerne lacným a stabilným zdrojom energie, problémom je však ich obmedzená životnosť. Autonómne zdroje energie riešia problém s finančne nákladnou servisnou údržbou ťažko dostupných, vzdialených alebo početných zariadení. Odhliadnuc od výrobných procesov sa taktiež jedná o ekologickejšie riešenie v porovnaní s batériami. V každodennej užívateľskej sfére autonómne zdroje energie znamenajú vyšší komfort používania elektronických zariadení.

Autonómny zdroj elektrickej energie teda musí mať formu takého mechanizmu, ktorý by dokázal generovať elektrickú energiu z energie ktorá je voľne dostupná v jeho okolí. Najbežnejšie je energia vo voľnom prostredí dostupná vo forme žiarenia, tepla a mechanickej energie – vibrácii. Táto práca sa zaoberá vibračným generátorom, ktorý je navrhnutý tak, aby efektívne pracoval pri veľmi nízkych budiacich frekvenciách. Pracovať efektívne pri nízkych frekvenciách znamená, že vlastná frekvencia tohto zariadenia musí byť taktiež nízka. Ide teda o správne navrhnutie rezonančného mechanizmu tak, aby bol dosiahnutý rozumný kompromis medzi rozmermi a výkonom zariadenia.

2 Ciele práce

Návrh a realizácia upravenej konštrukcie generátora založeného na Tusiho mechanizme zostrojeného na VUT.

Funkčný prototyp vibračného generátora zostrojeného Ing. Smilkem, Ph.D. [1], je navrhnutý, aby pracoval optimálne pri pôsobení nízkofrekvenčných budiacich vibrácií v pracovnej rovine. Práca sa bude zaoberať úpravou daného generátora tak, aby pri použití v priemyslových aplikáciách, kde sa predpokladá iba jeden smer budiacich vibrácií, lepšie využíval rozsah svojho pracovného bodu. Návrh bude pracovať s čiastočnou konštrukciou Tusiho generátora v záujme využitia jeho celej pracovnej oblasti. Je teda potrebné navrhnuť upravený koncept umiestnenia magnetov a magnetického obvodu.

Napokon je súčasťou práce aj rešerš vibračných generátorov založených na princípe kyvadla a simulačný model upravenej konštrukcie generátora. Rešerš objasňuje podstatu využitia kyvadlového mechanizmu, výhody a nevýhody s tým spojené, uvádza konkrétne realizácie generátorov. Simulačný model slúži k analýze správania a nastaveniu parametrov navrhovanej konštrukcie generátora tak, aby bola splnená požiadavka funkčnosti pri veľmi nízkych pracovných frekvenciách.

3 Vibračné generátory založené na princípe kyvadla

Generátory založené na princípe kyvadla využívajú dynamiku kyvadlového systému s ohľadom na získavanie energie z pohybu kyvadla [2]. Zotrvačná hmota vibračných kyvadlových generátorov sa môže kmitavo alebo kontinuálne pohybovať po kruhovej trajektórii. Kruhová trajektória umožňuje kompaktnjšie rozmery zariadenia, je teda vhodná pre generátory s nízkou vlastnou frekvenciou, kedy je požadovaná veľká maximálna výchylka zotrvačnej hmoty [1]. Konštrukcia takéhoto generátora prináša dve hlavné výzvy:

- Konverzia vibračného pohybu na rotačný pohyb prostredníctvom vhodného mechanického riešenia
- Elektromechanická premena kinetickej energie kyvadla na energiu elektrických

Vibračné kyvadlové generátory sú zostavené z pohyblivej a nepohyblivej časti. Nepohyblivá časť – rám konštrukcie tvorí referenciu pre pohyblivú zotrvačnú časť – kyvadlo. Budenie generátora je potom realizované pôsobením sily do základu, ktoré vybudí oscilačný mechanizmus. Vibračné kyvadlové generátory teda môžeme označiť ako zotrvačné systémy. Využitie zotrvačných oscilačných generátorov je preferované v podmienkach kde nie je možné využiť priame pôsobenie sily ktoré zvyčajne súvisí s deformáciou. Bežné je použitie zotrvačných generátorov v priemysle, kde sa dá predpokladať pomerne úzky interval budiacich amplitúd a frekvencií a nie je príliš kladený dôraz na ich miniaturizáciu [1].

Relatívna zmena polohy kyvadla voči rámu je v čase určená rýchlosťou zmeny tejto polohy. Rýchlosť je typicky spájaná s elektromagnetickým princípom premeny energie, čo značne predurčuje spôsob elektromechanickej premeny energie väčšiny generátorov založených na uvedenom kyvadlovom princípe [3]. Využitie princípu elektromagnetickej indukcie priamo súvisí s problémom miniaturizácie týchto zariadení, nakoľko zmenšenie zariadenia zo svojej fyzikálnej podstaty priamo spôsobí pokles výkonu ktorý generátor dokáže dodávať [1]. Ako však bude ďalej v tejto práci uvedené, je možné využiť aj iné spôsoby elektromechanickej premeny energie, ako napríklad piezoelektrický efekt či magnetostrikčný jav.

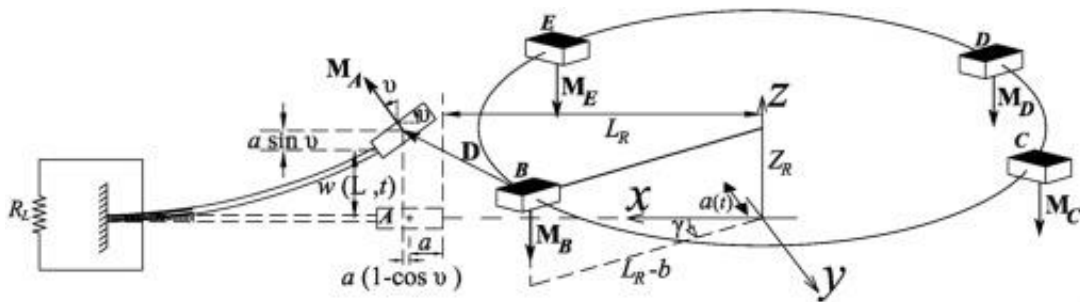
3.1 Prehľad vibračných generátorov založených na princípe kyvadla

V rámci výskumu a vývoja bolo navrhnuté a skonštruované veľké množstvo generátorov fungujúcich na princípe kyvadla. Jednotlivé realizácie sa však líšia a využívajú odlišné princípy, či sa už jedná o spôsob elektromechanickej premeny energie ktorý využíva, alebo o konštrukčné prevedenie, ktorým je tvorená tuhosť mechanizmu. Konštrukčné riešenie tuhosti a maximálna výchylka kyvadla určia či sa bude jednať o lineárne alebo nelineárne kmitanie. Zvláštnym prípadom vibračných kyvadlových generátorov sú generátory zvyšujúce budiacu frekvenciu pri prenose vibrácií na elektromechanický prevodník.

3.1.1 Kyvadlový piezoelektrický generátor so zvyšujúcim prevodom budiacich frekvencií

Frekvenciu zvyšujúce generátory mechanicky zvyšujú frekvenciu veľmi nízkych budiacich frekvencií na vyššie frekvencie v snahe zvýšiť generovaný výkon zariadenia ktoré má pracovať pri nízkych frekvenciách [4].

Návrhom takéhoto generátor sa zaoberá Ramezanpour et al. [5], ktorý vo fáze experimentálneho testovania overuje použitie nelineárnej magnetickej väzby medzi hlavnou rotujúcou hmotou a piezoelektrickým nosníkom. Konštrukcia kombinuje kyvadlový mechanizmus rotačne uchytenej kmitajúcej hmoty s nosníkovou piezoelektrickou konštrukciou elektromechanického prevodníka. V tejto konštrukcii je vytvorená nelineárna magnetická väzba medzi hlavnou rotujúcou hmotou a piezoelektrickým nosníkom. Magnetická väzba je vytvorená neodymovými magnetmi umiestnenými na voľnom konci piezoelektrického nosníka a rovnakými magnetmi umiestnenými na kruhovej platforme pevne spojenej s hlavnou rotujúcou hmotou.



Obr. 1: Mechanizmus zvyšujúci frekvenciu budiacich vibrácií [5]

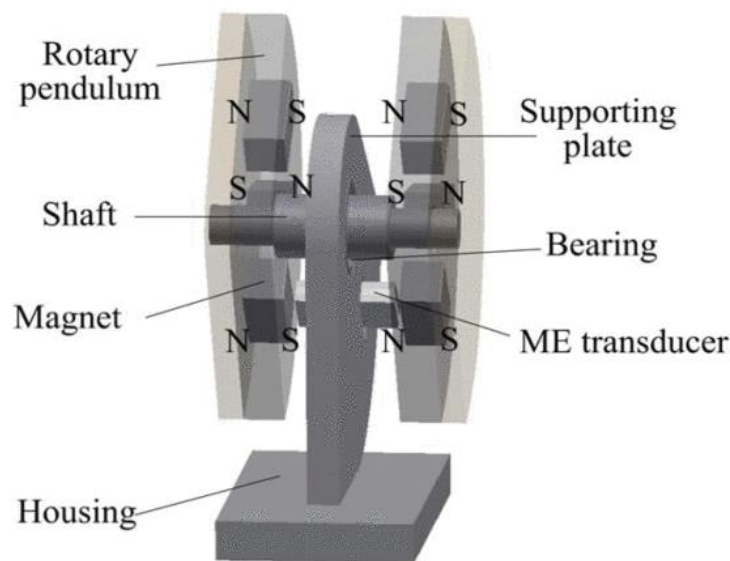
V momente, keď je kruhová platforma vybudená k rotačnému pohybu, rotujúce magnety vytvoria magnetickú väzbu s magnetom umiestneným na nosníku a magnetická sila spôsobí ohnutie nosníka. Až do doby priblíženia ďalšieho magnetu je nosník ponechaný aby kmital vlastnou frekvenciou. Je teda zrejmé že interval kedy dôjde k magnetickej interakcii a novému vybudeniu piezoelektrického nosníka je určený uhlovou vzdialenosťou medzi magnetmi a rýchlosťou rotujúcej hmoty.

Frekvenciu zvyšujúci generátor bol navrhnutý a testovaný pri nízkych frekvenciách 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz tak, aby ho bolo možné aplikovať v nízkofrekvenčných prostrediach s veľkými amplitúdami, ako napríklad pri pohyboch ľudského tela alebo morských vln. Jeho konkrétna pracovná frekvencia však závisí od počtu použitých magnetov vo frekvenciu zvyšujúcom mechanizme.

3.1.2 Kyvadlový generátor využívajúci magnetostrikčný jav k elektromechanickej premene energie

V magnetostrikčných materiáloch dochádza k mechanickému namáhaniu a deformácii po ich vystavení pôsobeniu magnetického poľa. Jav je známy aj ako Joulov efekt. Magnetostrikčný efekt môže byť využitý v generátoroch vytvorením sendvičovej materiálovej štruktúry ktorá sa skladá z magnetostrikčných a piezoelektrických vrstiev. V okolí staticky umiestenej sendvičovej štruktúry je pohybom magnetov vytvorené premenlivé magnetické pole. Vplyvom premenného magnetického poľa sa magnetostrikčná vrstva sendvičovej štruktúry deformuje, v dôsledku čoho sa deformuje aj piezoelektrická vrstva a na elektródach sa tak generuje napätie [1].

Xian-zhi Dai [7] navrhol vibračný kyvadlový generátor, kde na kyvnej časti sú umiestnené magnety ktoré pri prechode okolo statickej časti interagujú s magnetostrikčnou štruktúrou elektromechanického prevodníka.

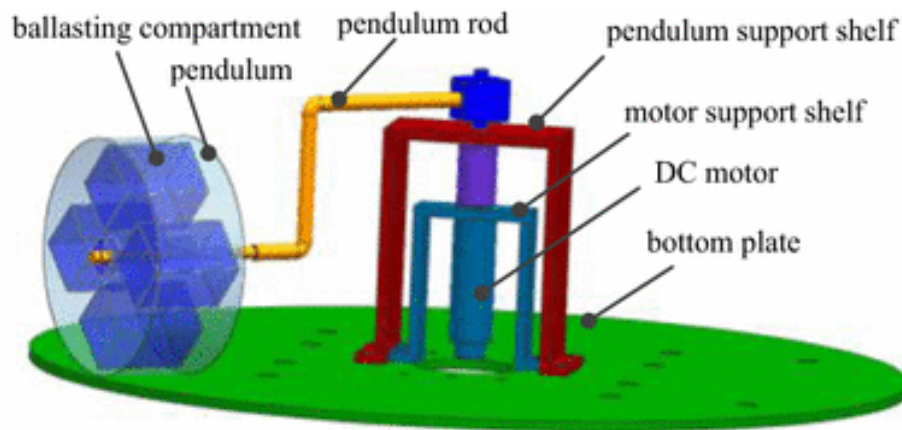


Obr. 2: Kyvadlový generátor využívajúci magnetostrikčný efekt [7]

Sendvičová materiálová štruktúra sa v tomto konkrétnom prípade skladá z dvoch magnetostrikčných Terfenol-D vrstiev, ktoré sendvičujú jednu PMN-PT piezoelektrickú vrstvu. Rezonančný mechanizmus je naladený na rezonančnú frekvenciu 14.1 Hz. Prototyp generoval výkon 980 μ W pri budení rezonančnou frekvenciou o amplitúde 0,4g.

3.1.3 Nízko frekvenčný kyvadlový generátor určený pre podvodné oceánske kotviace plošiny

Experimentálnym testovaním nízko frekvenčného horizontálneho kyvadlového generátora pre podmorské kotviace platformy sa zaoberá výskum Wenjun Dinga et.al [8]. Generátor je navrhnutý pre veľmi nízke budiace frekvencie v rozmedzí iba 0,1 až 0,4 Hz. Zmenou uhlu sklonu kyvadla je však možné zmeniť vlastnú frekvenciu v záujme maximalizovania výkonu generátora. Vo výsledku boli pri testovaní dosiahnuté najlepšie výkony pri rezonančných frekvenciách 0,2, 0,25 a 0,3 Hz, s natočením sklonu kyvadla o 3° , 4° a 5° .



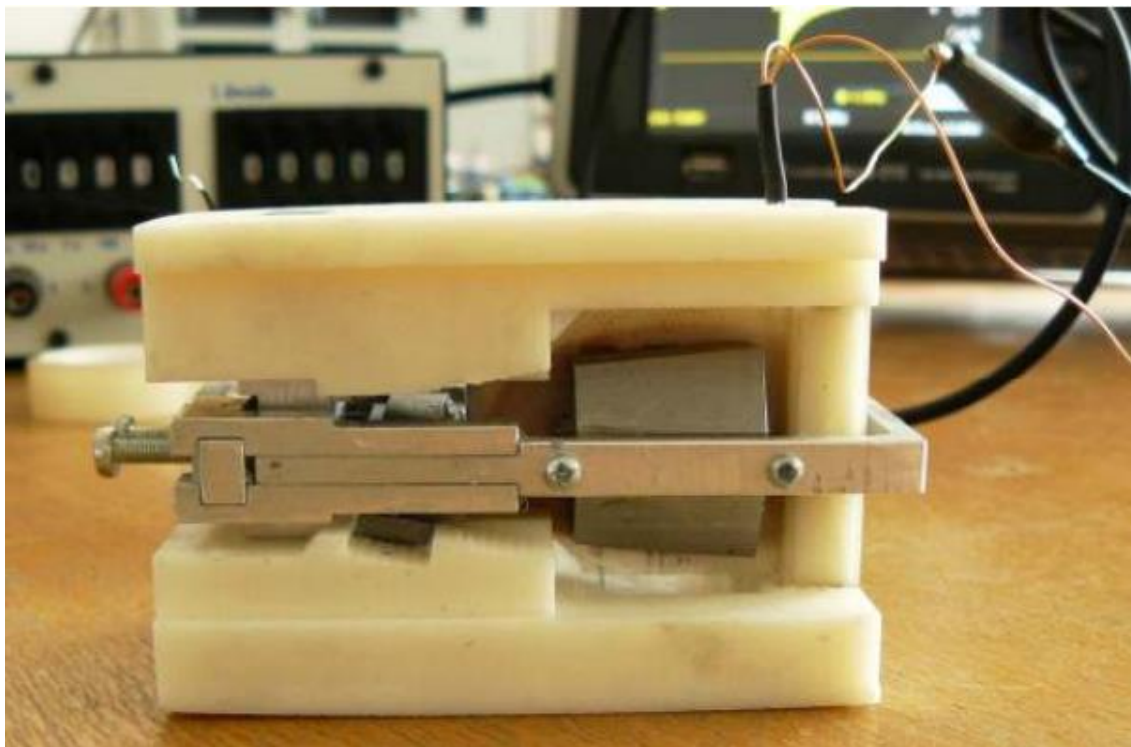
Obr. 3: Architektúra nízko frekvenčného horizontálneho kyvadlového generátora pre podmorské kotviace platformy [8]

3.1.4 Vibračný kyvadlový generátor s nelineárnou tlmiacou charakteristikou

Vibračné kyvadlové generátory sú rezonančné mechanizmy a pre ich účinné vybudenie je potrebná stála pracovná frekvencia, pre ktorú bol daný generátor zostrojený. Malá šírka rezonancie je teda najlimitujúcejším faktorom týchto zariadení, šírka pásma využiteľných frekvencií z budiacich vibrácií môže byť rozšírená vhodným návrhom nelineárnej tuhosti [9].

Generátor zostrojený Ing. Stejskalom podľa návrhu Ing. Jurosza a doc. Ing. Hadaša Ph.D. [10] má tuhosť mechanizmu tvorenú dvojicami magnetov, ktorých póly sú orientované zhodne proti sebe. Jedná sa o pomerne jednoduché ale veľmi kvalitné riešenie nelineárnej tuhosti rezonančného mechanizmu.

Základným kameňom riešenia elektromechanickej konverzie daného generátora je statická cievka upevnená na rám generátora a magnetický obvod tvorený pólovými nastavcami s magnetmi upevnenými na pohyblivú páku. Pri rozkmitaní páky vzniká relatívny pohyb magnetov okolo cievky, vytvorí sa časovo premenlivé magnetické pole a v cievke sa generuje elektromotorické napätie podľa Faradayovho zákona.

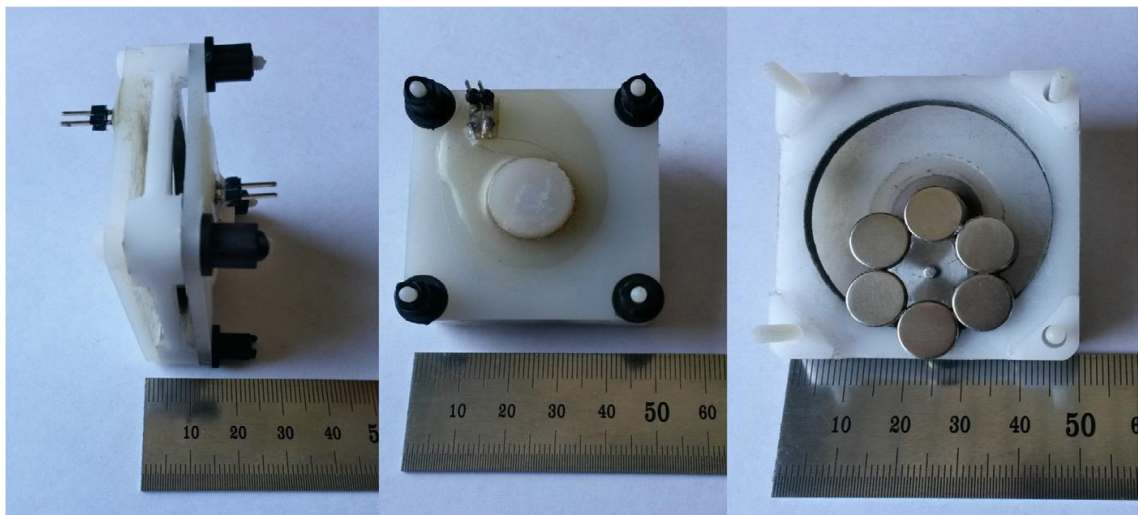


Obr. 4: Vibračný generátor s nelineárnou tlmiacou charakteristikou zostrojený na VUT [10]

Generátor bol uvažovaný pre využitie v leteckom priemysle. Vhodnou oblasťou pre jeho aplikáciu sa javila oblasť rotoru vrtuľníka, kde vznikajú vibrácie s konštantnou frekvenciou asi 17,2 Hz. Výsledný funkčný prototyp je možné efektívne prevádzkovať pri budení vibráciami o frekvencii v rozmedzí 16–16,7 Hz.

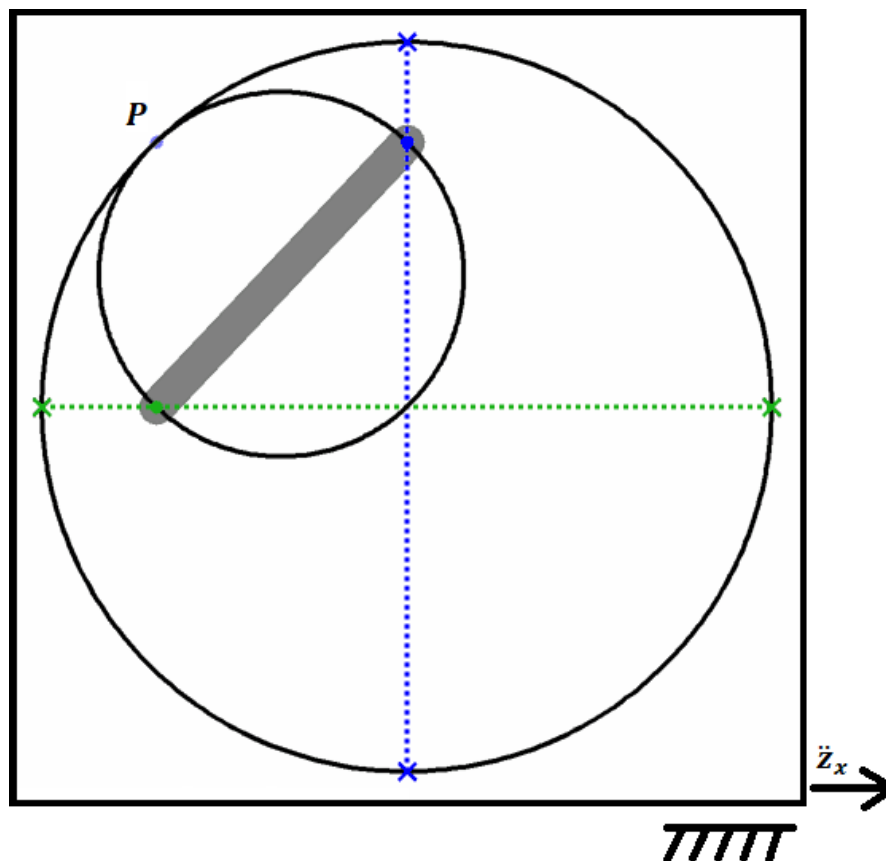
4 Vibračný generátor založený na Tusiho mechanizme

Daný generátor bol zostrojený v rámci dizertačnej práce Ing. Smilka Ph.D. [1]. Konštrukcia generátora inovatívne využíva Tusiho mechanizmus, ktorý umožňuje neobmedzenú výchylku kmitajúcej hmoty, čo je veľmi výhodné pre nízkofrekvenčné generátory. Generátor je určený do prostredia ľudského tela, predpokladajú sa teda veľmi nízke budiace frekvencie a zároveň pomerne široké pásmo budiacich frekvencií, čo ešte značne dvíha nároky na funkcionality generátora, ktorý dokáže v takomto prostredí efektívne pracovať. Jednoduchá konštrukcia generátora má jeden stupeň voľnosti, no zároveň je schopná využívať budiace vibrácie v dvoch smeroch, teda v jednej pracovnej rovine. Vo výsledku dokáže generátor vďaka nelineárnej podstate kyvadlového pohybu pracovať v rozmedzí budiacich frekvencií 2 – 10 Hz.



Obr. 5: Tusiho generátor zostrojený na VUT [1]

Tusiho mechanizmus na ktorom bol návrh založený, je matematické zariadenie navrhnuté v 13. storočí perzským matematikom Nasir al-Din al-Tusim. Podstata zariadenia spočíva v rotácii menšieho kruhu, ktorý sa odvaľuje vnútrajškom väčšieho kruhu. Polomery menšieho a väčšieho kruhu sú v pomere 2:1. Každý bod menšieho priemeru prejde stredom väčšieho kruhu dvakrát behom jedného obehu. Pri rotácii menšieho kruhu sú hypocykloidy zhodné s priamkami, ktoré odpovedajú priemeru väčšieho kruhu. Tusiho mechanizmus tak umožňuje prevod rotačného pohybu na priamočiary oscilačný pohyb.



Obr. 6: Tusiho mechanizmus [12]

Generátor využíva danú geometriu a princíp elektromagnetickej indukcie na realizáciu elektromechanickej premeny energie. Staticky uložená kruhová cievka je uložená sústredne so stredom väčšieho kruhu, ktorý tvorí kruhovú dutinu. Valiace sa teleso vnútri kruhovej dutiny na svojom obvode nesie permanentné magnety. Výhodou je, že bod obvodu menšieho kruhu, ktorý je aktuálne zarovnaný so stredom kruhovej dutiny má maximálnu rýchlosť.

5 Úprava konštrukcie vibračného Tusiho generátora.

Motiváciou pre úpravu konštrukcie generátora spomínaného v predošlej kapitole je jeho využitie v priemyselných aplikáciách. Cieľom úpravy je dosiahnuť stav, kedy bude generátor využívať celý rozsah svojho pracovného bodu. Ako bolo spomenuté, pôvodný generátor [1] predpokladá budenie vibráciami, ktorých zdrojom je ľudská chôdza. Z podstaty pohybu ľudskej chôdze vyplýva, že budiace vibrácie pôsobia v rovine. Preto na rám generátora pôsobia zrýchlenia \ddot{z}_x a \ddot{z}_y a tie vytvárajú moment na valiacu sa hmotu. V prípade budenia Q_{xy} môže byť valiacu sa hmota vybudená tak, že bude rotovať po celom obvode kruhovej dutiny.

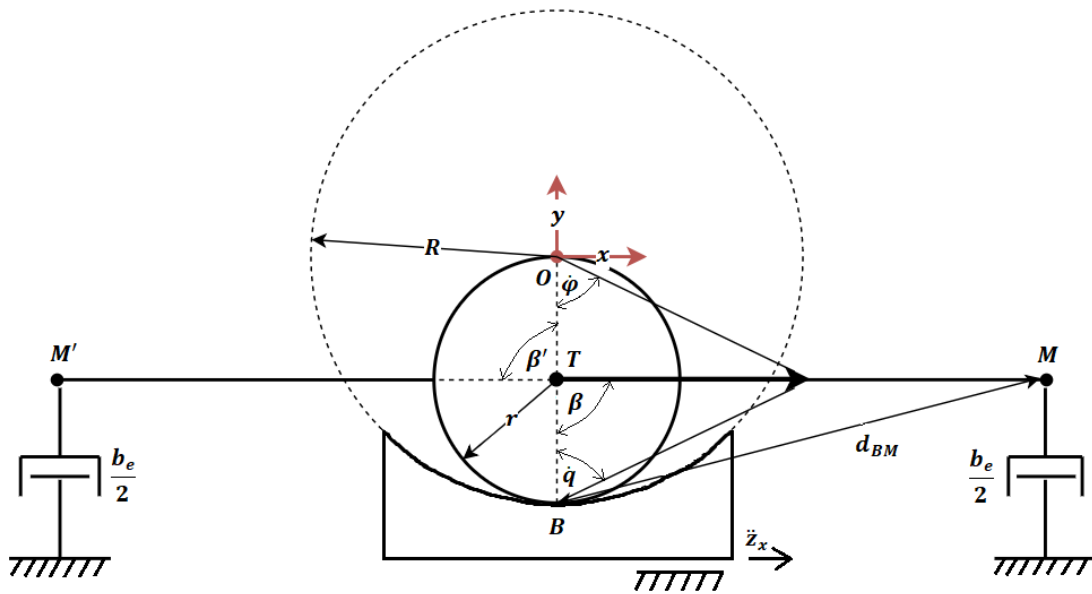
Ak však bude generátor použitý v prostredí, kde pôsobia budiace vibrácie iba v smere osy x , budenie Q_x bude mať tvar:

$$Q_x = -mr\ddot{z}_x \cos(\varphi) \quad (1)$$

Absentujúce zrýchlenie v smere y spôsobí, že valiacu sa hmota by rotovala po celom obvode kruhovej dutiny iba ak by samotná amplitúda budiaceho zrýchlenia \ddot{z}_x bola veľmi vysoká. Stále sa však jedná o generátor pre veľmi nízke frekvencie, čomu v praxi prislúchajú aj nižšie hodnoty amplitúd zrýchlenia. Keď teda valiacu sa hmota nerotuje po celom obvode, veľká časť kruhovej dutiny je nevyužitá a teda nepotrebná. Vhodná konštrukčná úprava generátora tak môže viesť k optimalizácii rozmerov generátora.

6 Simulačný model generátora

Simulačný model generátora bol zostavený v prostredí Matlab/Simulink, ktoré je efektívnym nástrojom pre numerické riešenie diferenciálnych rovníc. V našom prípade diferenciálna rovnica popisuje dynamiku kmitania sústavy. Model vychádza z modelového návrhu upravenej konštrukcie (Obr.7). Z pôvodnej konštrukcie bola použitá iba určitá časť kruhovej dutiny, magnety boli umiestnené na ramená do väčšej vzdialenosti od okamžitej osi rotácie. Tvorba modelu generátora bola založená na simulačnom modeli [1], z ktorého tento upravený dizajn vychádza.



Obr. 7: Modelový návrh upravenej konštrukcie generátora

6.1 Kinematika odvaľovania

Daná súčasť rezonančného mechanizmu (Obr. 7), sa pohybuje po kruhovom výseku pričom je predpokladaný iba valivý pohyb a počiatočná poloha je daná naspodku kruhovej dutiny. Trajektórie význačných bodov sa dajú popísať v Karteziánskom súradnicovom systéme ktorého počiatok leží v strede kruhového výseku.

Ťažisko T je totožné s geometrickým stredom súčasti, jeho poloha je definovaná ako funkcia uhla φ medzi počiatkom súradnicového systému a ťažiskom súčasti. Jeho polohu je teda možné definovať pomocou sústavy rovníc:

$$x_T = (R - r) \sin(\varphi) \quad (2)$$

$$y_T = -(R - r) \cos(\varphi) \quad (3)$$

Kde R je polomer kruhového výseku a r je polomer menšieho odvaľujúceho sa kruhu. Bod B v danom momente tak ako je zakreslený, značí polohu okamžitej osi rotácie valivého pohybu. Poloha okamžitého bodu osi rotácie je určená:

$$x_B = R \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$y_B = -R \cos(\varphi) \quad (5)$$

Body M , M' predstavujú polohy, v ktorých budú umiestnené magnety magnetického obvodu. Ich poloha je daná zostavou rovníc:

$$x_M = (R - r) \sin(\varphi) + d_{TM} \sin(\varphi + \beta) \quad (6)$$

$$y_M = -(R - r) \cos(\varphi) + d_{TM} \cos(\varphi + \beta) \quad (7)$$

$$x_{M'} = (R - r) \sin(\varphi) + d_{TM'} \sin(\varphi + \beta') \quad (8)$$

$$y_{M'} = -(R - r) \cos(\varphi) + d_{TM'} \cos(\varphi + \beta') \quad (9)$$

Kde β , β' sú uhly ktoré udávajú počiatočnú uhlovú polohu voči stredu kruhovej dutiny. Uhol β je zvieraný medzi spojnicou bodov \overline{TM} a \overline{TO} , zatiaľ čo uhol β' je zvieraný medzi spojnicami bodov $\overline{TM'}$ a \overline{TO} .

6.2 Dynamické správanie

Efektívnou metódou modelovania dynamiky kmitajúceho systému je použitie Lagrangeových rovníc druhého druhu.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial E_p}{\partial q} = - \frac{\partial W}{\partial \dot{q}} = - Q \quad (10)$$

Popisovaný systém disponuje jedným stupňom voľnosti, je teda potrebné zaviesť jednu zovšeobecnenú súradnicu q . Tá v tomto prípade predstavuje natočenie menšieho odvaľujúceho sa kruhu, pre všeobecný pomer polomerov R a r by platilo že:

$$q = \frac{R - r}{r} \varphi \quad (11)$$

Avšak pri použití Tusiho konštrukcie, z ktorej platí že pomer polomerov $r:R$ je 2:1 môžeme zjednodušiť použiť:

$$q = \varphi \quad (12)$$

Natočenie q je natočenie okolo okamžitej osi rotácie, ktorá prechádza bodom okamžitého dotyku medzi kruhovou dutinou a odvaľujúcim sa telesom. Premenné \dot{q} a \ddot{q} budú časové derivácie natočenia q .

Kinetická energia valivého pohybu sa s použitím Steinerovej vety dá vyjadriť ako:

$$E_k = \frac{1}{2} I_B \dot{q}^2 = \frac{1}{2} (I_T + m \cdot d_{TB}^2) \dot{q}^2 \quad (13)$$

kde I_B je celkový moment zotrvačnosti vzťahnutý ku okamžitej ose rotácie prechádzajúcej bodom B, I_T je moment zotrvačnosti ku ose rotácie prechádzajúcej ťažiskom a d_{TB} je vzdialenosť medzi bodmi B a T. V našom prípade je ťažisko totožné s geometrickým stredom, vďaka čomu platí že vzdialenosť d_{TB} je konštantná a počas pohybu sa nemení:

$$d_{TB} = r \quad (14)$$

Pohyblivý mechanizmus neobsahuje pružinové elementy a jeho potenciálna energia závisí iba od globálnej polohy ťažiska v súradnicovom systéme, ktorého počiatok leží v centre kruhovej dutiny. Hladina nulovej potenciálnej energie leží v bode kde súradnica ťažiska:

$$y_T = -r \quad (15)$$

Potenciálna polohová energia je daná vzťahom:

$$E_p = mgh_T \quad (16)$$

Okamžitá výška ťažiska s prihliadnutím na polohu nulovej potenciálnej energie ťažiska tak bude daná ako:

$$h_T = (r - (R - r) \cos(q)) \quad (17)$$

Disipatívna funkcia E_D vyjadruje disipovanú energiu. Množstvo disipovanej energie závisí od tlmenia sústavy. Tlmenie sústavy je zapríčinené dvoma faktormi:

- Mechanickým tlmením b_m
- Elektromagnetickým tlmením b_e

Mechanické tlmenie je zapríčinené predovšetkým valivým odporom, elektromagnetické tlmenie je dôsledkom odoberania energie z mechanizmu vo forme elektrickej energie. Elektrická energia je s časti disipovaná na indukčnej cievke z dôvodu jej odporu, zvyšok elektrickej energie je disipovaný v záťaži. Disipatívna funkcia je teda závislá na b_m a b_e :

$$E_D = \frac{1}{2} (b_m + b_e) \dot{q}^2 \quad (18)$$

Veľkosť mechanického tlmenia závisí predovšetkým od použitých materiálov, povrchovej úpravy a kvality spracovania celého mechanizmu, b_m je možné určiť ako:

$$b_m = \frac{I_B \cdot \Omega}{Q_m} \quad (19)$$

kde Q_m je veličina ktorá charakterizuje kvalitu mechanického spracovania a Ω je vlastná frekvencia mechanizmu. Za predpokladu malých výchylek môže byť vlastná frekvencia určená rovnakým spôsobom ako pri kyvadle, opäť využijeme (14):

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{mgd_{TB}}{I_B}} \quad (20)$$

Podľa [11] má generátor maximálny výstupný elektrický výkon, keď platí že mechanické tlmenie b_m je rovnako veľké ako elektromagnetické tlmenie b_e .

$$b_e = b_m \quad (21)$$

Budenie systému Q je realizované pôsobením zrýchlenia na rám generátora, ktoré vytvára krútiaci moment na valiaci sa mechanizmus.

$$Q = mr\ddot{z}_x \cos(q) \quad (22)$$

Kde \ddot{z}_x je zrýchlenie ktoré pôsobí na rám v smere osy x, vo výsledku má pohybová rovnica (23) daného mechanizmu s uvážením rovníc (10) – (22) tvar:

$$I_B\ddot{q} + (b_m + b_q)\dot{q} + mg(R - r) \sin(q) = -mr\ddot{z}_x \cos(q) \quad (23)$$

6.3 Elektromechanické deje

Elektromechanické deje sa v danom generátore odohrávajú medzi magnetickým obvodom a indukčnou cievkou. Konkrétne ide o elektromagnetickú indukciu napätia na cievke, a po uzavretí obvodu s tým spojené elektromagnetické tlmenie generátora.

6.3.1 Indukované napätie

Podľa Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie je vo všeobecnosti napätie idukované na cievke U_i určené vzťahom:

$$U_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (24)$$

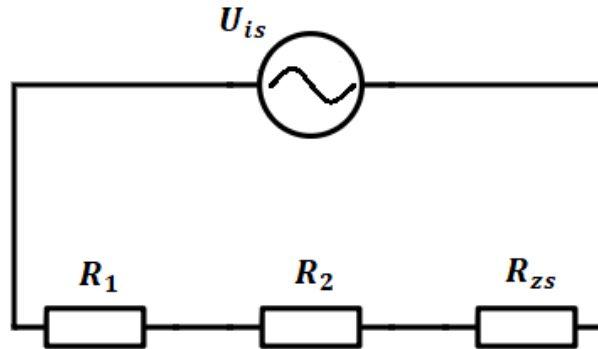
Z daného vzťahu (24) sa dá úpravou prísť ku vzťahu indukovaného napätia, ktorý je pre naše potreby praktickejší:

$$U_i = B \cdot 2 \cdot \dot{q} \cdot l_c \cdot N \quad (25)$$

Kde N je počet závitov cievky, l_c je aktívna dĺžka jedného závitu, B hodnota magnetickej indukcie. V dôsledku použitej geometrie cievky sa pri jednom kmite magnetov okolo cievky v magnetickom poli nachádzajú horná aj dolná časť cievky, výpočtová aktívna dĺžka je teda dvojnásobná, preto vo vzťahu (25) násobíme aktívnu dĺžku cievky l_c dvoma. Indukované napätie sa však bude líšiť podľa použitého obvodového zapojenia cievok.

6.3.1.1 Indukované napätie sériovo zapojených indukčných cievok

Realizácia obvodu so záťažovým odporom R_{zs} a so sériovým zapojením cievok je zobrazená v schéme (obr.8), kde odpory R_1 a R_2 sú odpory reprezentujúce odpory vinutí cievok.



Obr. 8: Sériové zapojenie indukčných cievok

Podľa druhého Kirchhoffovho zákona sa napätia U_{i1} a U_{i2} indukované na jednotlivých cievkach sčítajú a výsledné indukované napätie U_{is} sa rovná úbytkom napätí na odporoch, platí teda:

$$U_{is} = U_{i1} + U_{i2} \quad (26)$$

$$U_{is} = U_{R1} + U_{R2} + U_{Rzs} \quad (27)$$

Odpory jednotlivých vinutí cievok sa sčítajú do celkového odporu pre sériové zapojenie:

$$R_{cs} = R_1 + R_2 \quad (28)$$

Pre potreby modelovania tejto situácie je tak model možné zjednodušiť na použitie jednej indukčnej cievky, vďaka symetrií oboch cievok bude mať modelová cievka dvojnásobné parametre, čomu odpovedá dvojnásobný počet závitov. Výsledný vzťah pre určenie celkového indukovaného napätia pri sériovom zapojení U_{is} vychádza zo vzťahu (25), kde počet závitov N je prenášobný dvoma:

$$U_{is} = B \cdot 2 \cdot \dot{q} \cdot l_c \cdot 2 \cdot N \quad (29)$$

Užitočné napätie na záťaži je možné vyjadriť pomocou prepočtu cez odporový delič:

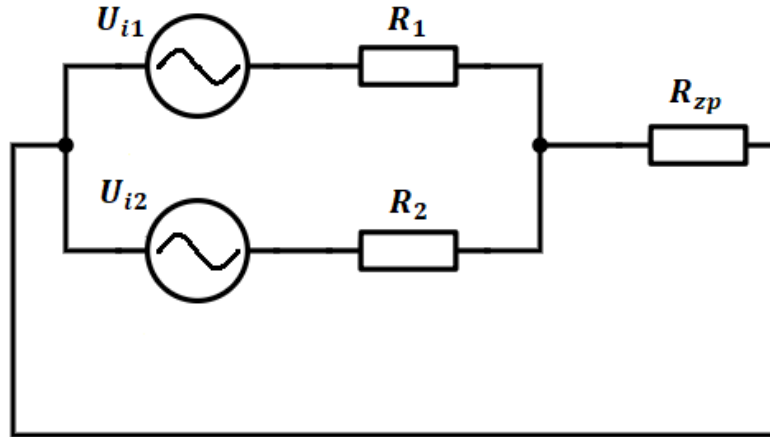
$$U_{zs} = U_{is} \frac{R_{zs}}{R_{zs} + R_{cs}} \quad (30)$$

Výkon na záťaži:

$$P_{zs} = \frac{U_{zs}^2}{R_{zs}} \quad (31)$$

6.3.1.2 Indukované napätie paralelne zapojených indukčných cievok

Realizácia obvodu so záťažovým odporom R_{zp} a paralelným zapojením cievok je zobrazená v schéme (Obr.9).



Obr. 9: Paralelné zapojenie indukčných cievok

V tomto prípade podľa druhého Kirchoffového zákona platí, že napätie na odpore R_{zp} je rovnako veľké ako jednotlivé napätia U_{i1} a U_{i2} indukované na jednotlivých cievkach zmenšené o úbytky napätí na vlastných odporoch vinutia U_{R1} a U_{R2} . Odporov jednotlivých vinutí cievok sa sčítajú do celkového odporu R_{cp} ktorý sa zaraďí do série so záťažovým odporom:

$$R_{cp} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (32)$$

V paralelnom zapojení je indukované napätie paralelne zapojených cievok U_{ip} určené vzťahom (25). Rovnako ako v predošlom prípade, užitočné napätie na záťaži určíme pomocou odporového deliča:

$$U_{zp} = U_{ip} \frac{R_{zp}}{R_{zp} + R_{cp}} \quad (33)$$

Výkon na záťaži:

$$P_{zp} = \frac{U_{zp}^2}{R_{zp}} \quad (34)$$

6.3.2 Elektromagnetické tlmenie

Elektromagnetické tlmenie b_e je závislé na parametroch cievky, parametroch magnetov, geometrii mechanizmu a odporovej záťaži pripojenej na cievku.

$$P = \frac{U_i^2}{R_c + R_z} \quad (35)$$

$$P = F \cdot \dot{q} \quad (36)$$

$$F = b_e \cdot \dot{q} \quad (37)$$

P je celkový elektrický výkon generátora, F tlmiaca sila, R_c je odpor vinutia cievky, R_z je odpor záťaže pripojenej na cievku. Položením rovníc (35) a (36) do rovnosti a dosadením (37) za F v (36) dostaneme:

$$\frac{U_i^2}{R_c + R_z} = b_e \cdot \dot{q}^2 \quad (38)$$

Po dosadení za indukované napätie je možné vyjadriť elektromagnetické tlmenie b_e . Do úvahy však treba brať geometriu mechanizmu. Elektromagnetické tlmenie prebieha na cievke mechanizmu, čo je myslený tlmič vo vzdialenosti d_{BM} od okamžitej osi rotácie, preto do vzťahu (39) pribudne člen d_{BM} . To, že je os rotácie okamžitá a nie pevná je zanedbané, nakoľko zmena polohy osi rotácie je malá, model uvažuje pevnú os rotácie. Rovnako ako pri indukovanom napätí tak aj pri modelovaní elektromagnetického tlmenia treba zohľadniť obvodomé zapojenie cievok.

6.3.2.1 Elektromagnetické tlmenie sériovej realizácie obvodu

Tlmenie b_{es} dostaneme dosadením (29) do vzťahu (38), za odpory R_c a R_z dosadíme záťažový odpor a celkový odpor vinutí cievok, ktoré odpovedajú danému zapojeniu. Po vyjadrení b_{es} do vzťahu pribudne spomínaný člen d_{BM} ktorý zohľadňuje umiestnenie tlmiaceho prvku v rámci mechanizmu.

$$b_{es} = \frac{(B \cdot 2 \cdot l_c \cdot 2 \cdot N)^2 \cdot d_{BM}^2}{R_{cs} + R_{zs}} \quad (39)$$

Po zachovaní podmienky pre maximálny generovaný výkon (21) je možné zo vzťahu (39) vyjadriť hodnotu ideálneho záťažového odporu R_{zs} .

6.3.2.2 Elektromagnetické tlmenie paralelnej realizácie obvodu

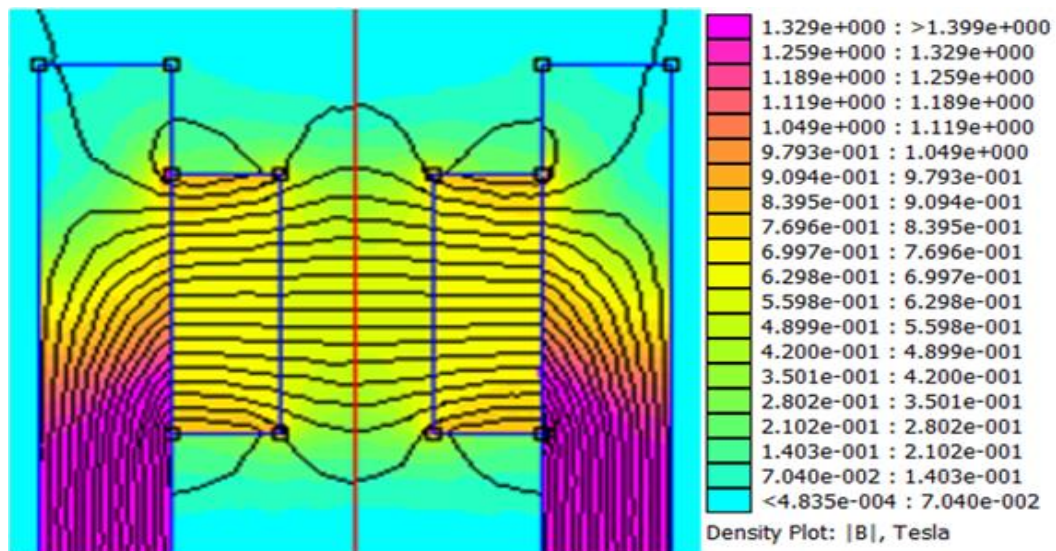
Na rozdiel od predošlého prípadu, kedy boli obe použité indukčné cievky v modeli zjednodušené na jednu indukčnú cievku s dvojnásobným počtom závitov, pri paralelnej realizácii zapojenia indukčných cievok treba pri modelovaní tlmenia brať do úvahy použitie dvoch cievok. Celkové tlmenie od týchto dvoch „elektromagnetických tlmičov“ sa musí rovnať výslednému tlmeniu b_e . Preto je výsledný vzťah pre b_{ep} ktorý dostaneme dosadením vzťahu pre indukované napätie pri paralelnom zapojení (25) do (38) a po zohľadnení člena d_{BM} celý prenášobný dvoma:

$$b_{ep} = 2 \frac{(B \cdot 2 \cdot l_c \cdot N)^2 \cdot d_{BM}^2}{R_{cp} + R_{zp}} \quad (40)$$

Rovnako ako v predošlom prípade je po aplikovaní podmienky (21) vo vzťahu (40) možné určiť hodnotu ideálneho záťažového odporu R_{zp} .

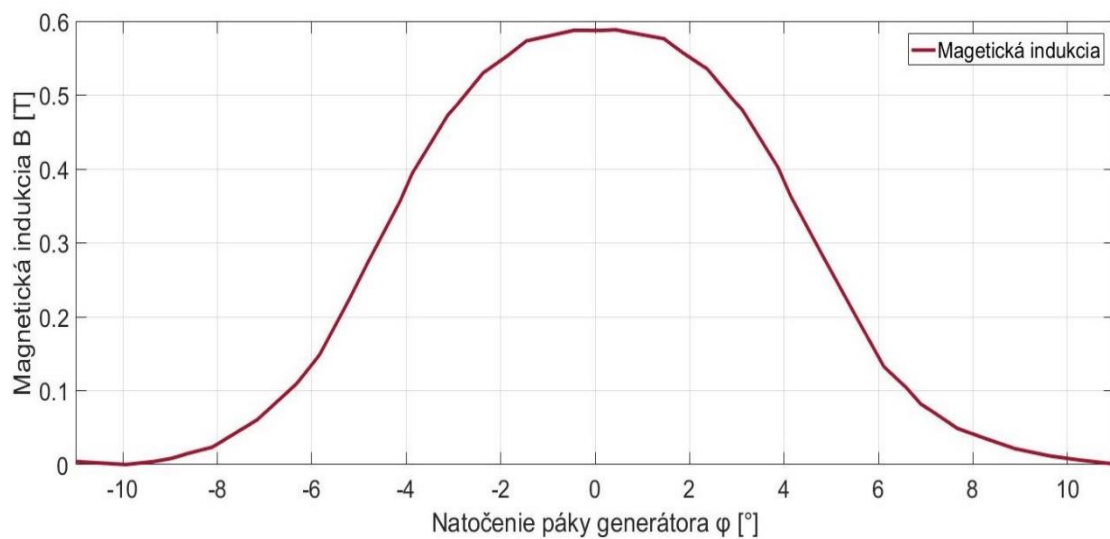
6.4 Magnetický obvod

Model magnetického obvodu bol vytvorený v programe pre analýzu metódou konečných prvkov FEMM. Magnetický obvod vychádzal zo známych parametrov geometrie, použitých materiálov a magnetov.



Obr. 10: Magnetická indukcia magnetického obvodu

Obr.10 zobrazuje polovicu magnetického obvodu, ktorá obsahuje jeden pár magnetov. Pre potreby určenia magnetickej indukcie B v okolí cievky, ktorá bude umiestnená vo vzduchovej medzere bola vykreslená závislosť hodnoty magnetickej indukcie na polohe pozdĺž červenej priamky. V generátore bude hodnota magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky závislá na natočení páky, ktorá nesie magnetický obvod. Preto bola získaná závislosť hodnoty magnetickej indukcie na vzdialenosti prepočítaná na závislosť magnetickej indukcie na natočení páky generátora.



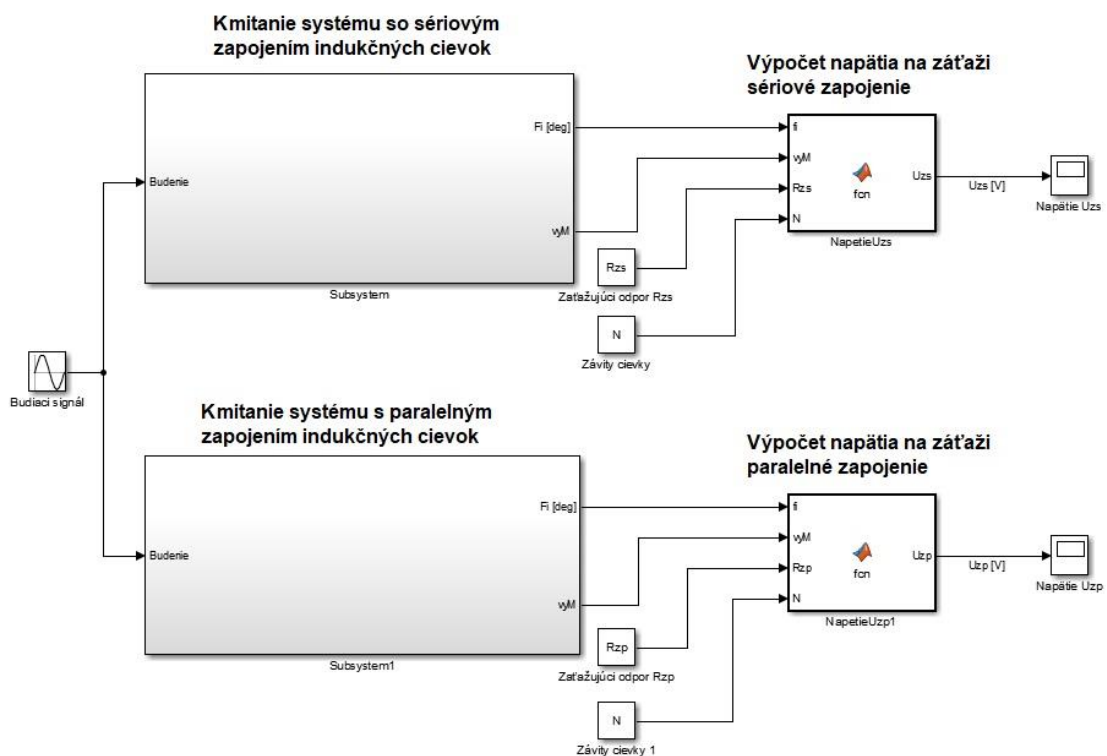
Obr. 11: Závislosť magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky na natočení páky generátora

Zo závislosti vidno, že pri natočení páky o uhol väčší ako 11° je hodnota magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky nulová, závislosť neuvažuje natočenie magnetov ani pôsobenie druhého páru magnetov ktoré nastane pri väčších výchylkách. Na základe danej závislosti bol vytvorený polynóm siedmeho stupňa popisujúci hodnotu magnetickej indukcie v okolí cievky pri natočení páky.

$$B = -2,0312 \cdot 10^{-9} \varphi^7 - 6,0835 \cdot 10^{-7} \varphi^6 + 3,1759 \cdot 10^{-7} \varphi^5 + 1,8425 \cdot 10^{-4} \varphi^4 - 2,1071 \cdot 10^{-5} \varphi^3 - 0,0184 \varphi^2 + 0,0013 \varphi + 0,6135$$

7 Model generátora v Simulinku

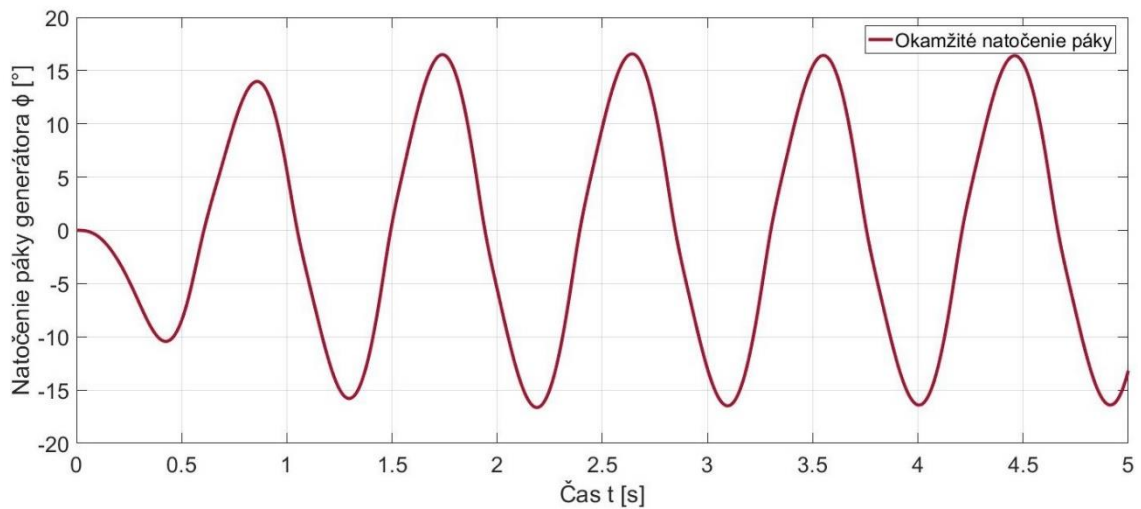
V počiatočnej fáze uskutočnených simulácií boli sledované predovšetkým maximálne výchylky páky pre široké spektrum budiacich frekvencií a amplitúd. Taktiež bola nasimulovaná závislosť magnetickej indukcie v okolí cievky v závislosti na natočení páky. Na základe týchto výsledkov boli navrhované konkrétne parametre reálneho zariadenia. Po navrhnutí konkrétnych parametrov už bolo možné nasimulovať zaujímavejšie a názornejšie charakteristiky, na základe ktorých je možné odhadnúť výkonové parametre reálneho generátora a taktiež rozsah pracovných frekvencií. Simulácie boli uskutočnené pre oba možné prípady obvodového zapojenia indukčnej cievky. Simulované testy sú v pokračovaní tejto práce uskutočnené aj na reálnom zariadení.



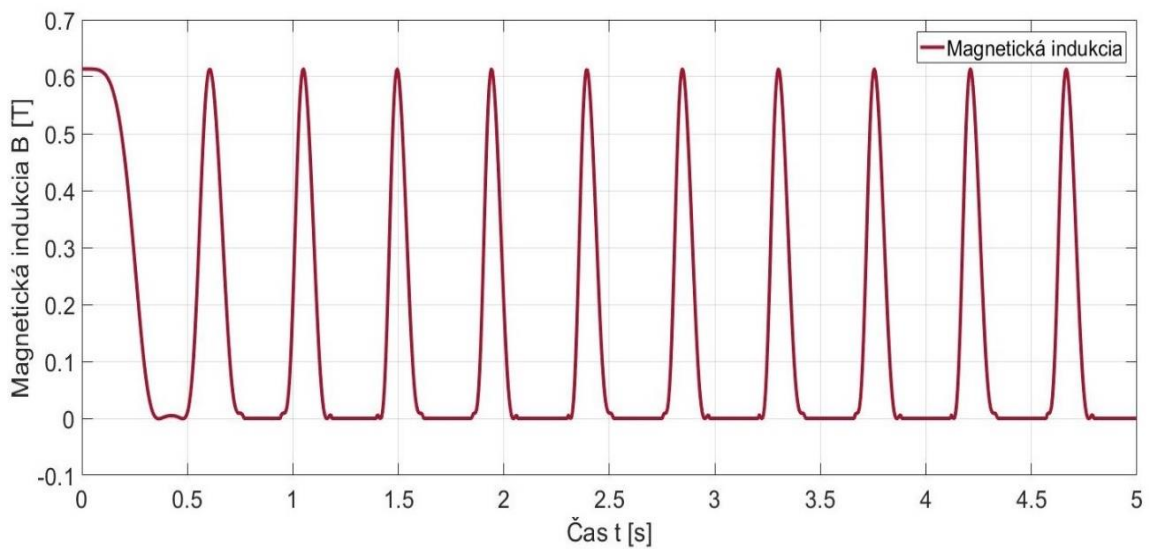
Obr. 12: Model generátora v simulinku

7.1 Rozloženie magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky

Vyššie spomínaný polynóm magnetickej indukcie bol aplikovaný vo výpočtoch simulačného modelu generátora. V simulovanom priebehu magnetickej indukcie získanej z modelu možno pozorovať nulové hodnoty magnetickej indukcie v dôsledku natočenia páky o viac ako 11° . Táto skutočnosť sa odrazila na priebehu indukovaného napätia ako bude ukázané v kapitole zaoberajúcej sa vyhodnocovaním reálne nameraných hodnôt zostaveného generátora.



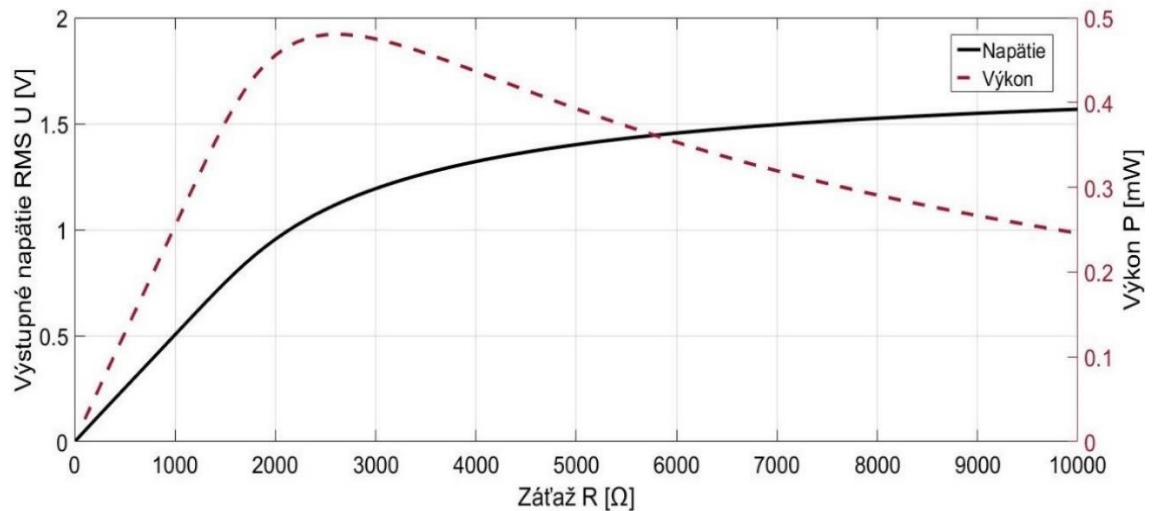
Obr. 13: Natočenie páky generátora



Obr. 14: Simulovaný priebeh magnetickej indukcie v okolí cievky

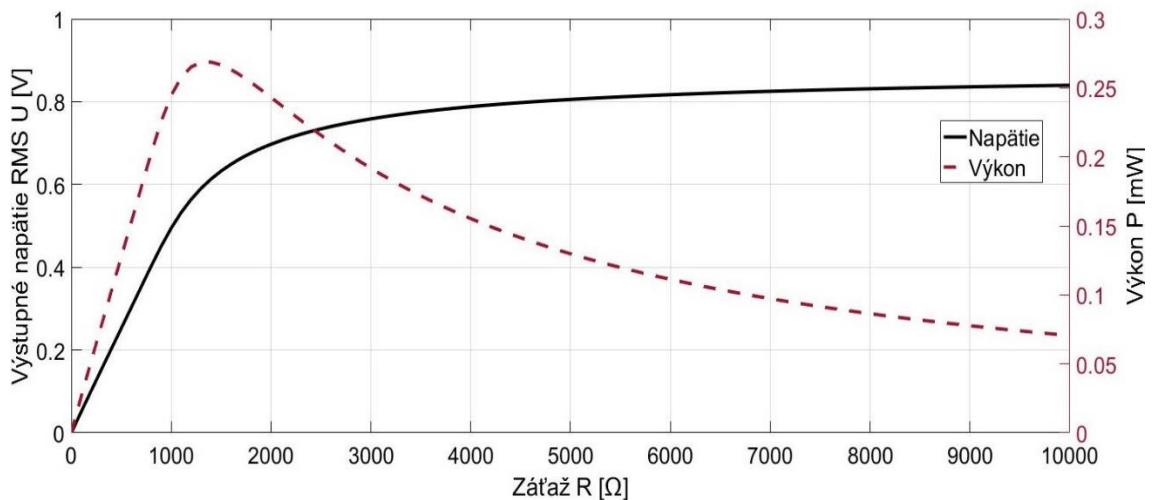
7.2 Závislosť efektívneho napätia a výkonu na zaťažujúcom odpore

V simulačnom modeli bolo budenie systému realizované sínusovým signálom, ktorý predstavuje zrýchlenie rámu generátora. Amplitúda zrýchlenia bola nastavená na hodnotu odpovedajúcu 0,1g, frekvencia budenia bola nastavená na rezonanciu čomu odpovedá zhruba 1,2Hz. Parametre budenia boli nastavené tak aby čo možno najlepšie odpovedali podmienkam neskôr uskutočneného fyzického testovania.



Obr. 15: Simulovaný priebeh napätia a výkonu v závislosti na zaťažujúcom odpore pri sériovom zapojení cievok

Z výsledkov simulácie je vidno, že modelovaný generátor v sériovom zapojení cievok podáva maximálny výkon pri zaťažení odporom v rozmedzí 2-4 kΩ. Výhodou väčšieho zaťažovacieho odporu je vyššia hodnota efektívneho napätia.

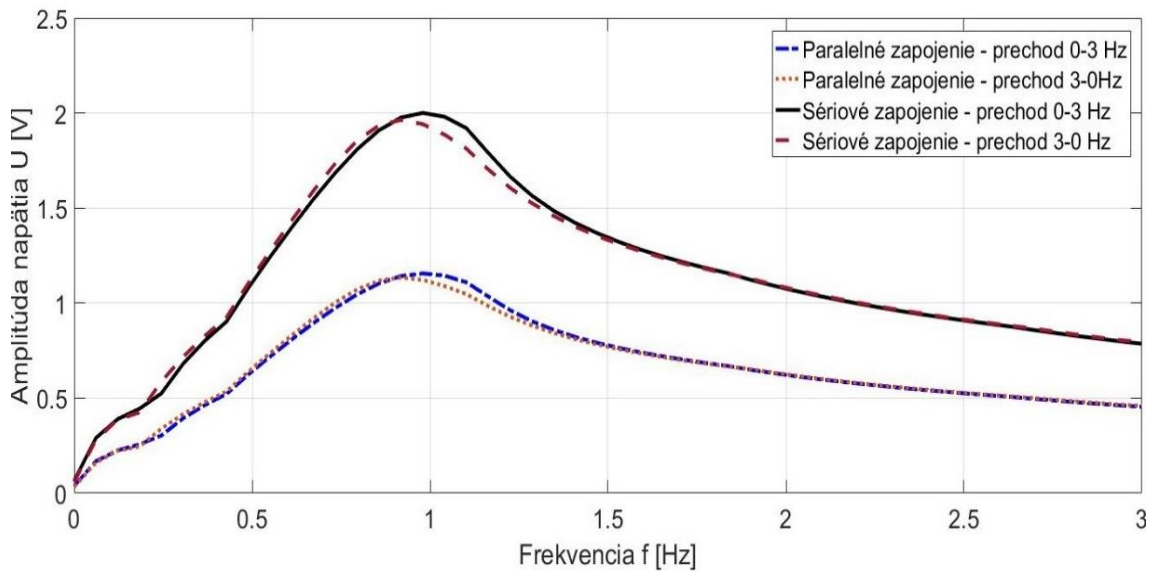


Obr. 16: Simulovaný priebeh napätia a výkonu v závislosti na zaťažujúcom odpore pri paralelnom zapojení cievok

V paralelnom zapojení modelovaný generátor dosahuje nižšie hodnoty výkonu aj napätia ako v sériovej variante, pásmo maximálneho výkonu je taktiež užšie. Z výsledkov simulácie sa teda lepšie javí varianta generátora so sériovou realizáciou obvodu cievok.

7.3 Amplitúdovo – frekvenčná charakteristika

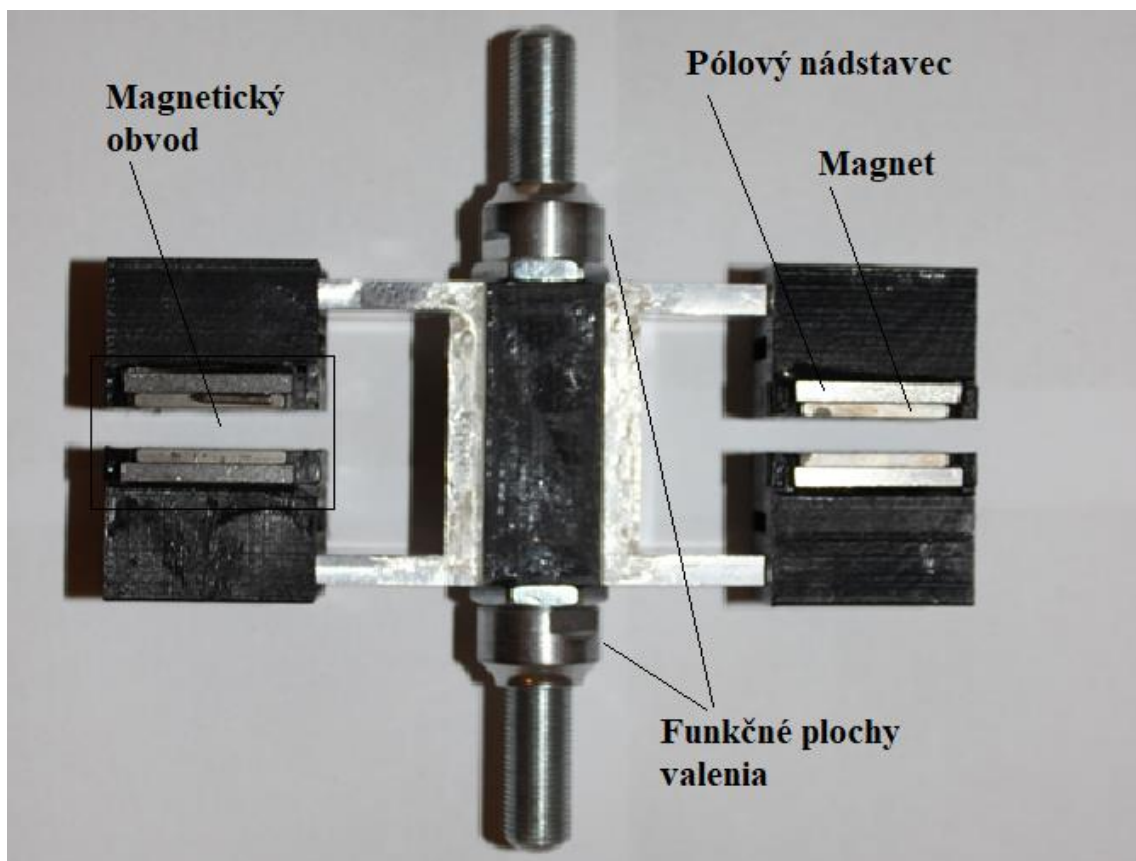
Amplitúdovo – frekvenčná charakteristika popisuje odozvu konkrétneho systému na určité pásmo budiacich frekvencií. Podstatou je harmonické budenie systému s konštantnou amplitúdou a premenlivou frekvenciou. Na osi x je vynesená frekvencia, na osi y odozva systému, v našom prípade bola sledovanou odozvou systému amplitúda indukovaného napätia. Charakteristika určuje pásmo najefektívnejších budiacich frekvencií, prejazdy cez rezonančnú frekvenciu boli uskutočnené z oboch strán pre paralelné ako aj sériové zapojenie cievok.



Obr. 17: Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika modelového generátora

8 Konštrukčné riešenie

Konštrukčné riešenie zachováva základný prvok – Tusiho mechanizmus. Z kruhovej dutiny Tusiho generátora je použitá iba určitý kruhový výsek určený maximálnou výchylkou, ktorá bola vopred predpokladaná na základe simulačného modelu generátora. V prípade, že by bola výchylka väčšia ako predpokladaných 20° , pohyb bude obmedzený mechanickým dorazom vytvoreným na ráme generátora. Za nevýhodu tohto riešenia sa dá považovať zavedenie skokovej nelinearity, ktorá nie je zohľadnená v simulačnom modeli a taktiež disipácia energie pri náraze. Valiaci člen generátora pre svoju funkčnosť nevyžaduje žiadne pevné, nerozoberateľné spojenie s rámom generátora, a je na neho iba jednoducho položený. Takéto jednoduché uloženie funkčne postačuje na prenos budiacich vibrácií z rámu na valiaci člen a je ho možné využiť vo funkčnom prototypu generátora, ktorý overí funkčnosť a použiteľnosť daného konštrukčného riešenia. Konštrukčne však treba zaistiť, aby sa pohyblivý mechanizmus nemohol voľne posúvať v smere osi rotácie, nakoľko tento posun by spôsobil narážanie magnetov do cievky, jej prípadné poškodenie a nefunkčnosť mechanizmu. Celý pohyblivý mechanizmus je skonštruovaný vo forme akejsi jednoduchej „nápravy“ s osadením, ktorú je možné z hľadiska funkcionality prirovnať ku železničnému dvojkolesiu.



Obr. 18: Valiaci člen generátora nesúci magnetické obvody na pákach

Magnetické obvody sú umiestnené na pákach. Magnety uložené na pákach vo väčšej vzdialenosti od osi rotácie tak majú väčšiu rýchlosť, čo je pre využitie princípu elektromagnetickej indukcie podstatné. Pri návrhu ramien treba zvoliť určitý kompromis medzi ich dĺžkou, čomu priamo odpovedá obvodozá rýchlosť, a celkovými rozmermi generátora. Magnetický obvod pozostáva s magnetov a pólových nástavcov. Magnety sú vyrobené z práškovej a následne zlisovanej zličeniny NdFeB. Pólové nástavce sú vyrobené z konštrukčnej ocele, podstatou je, aby bol materiál magneticky mäkký a mohli sa v ňom uzatvárať magnetické siločiarly medzi magnetmi. Pri návrhu veľkosti a geometrie pólových nástavcov však treba dávať pozor, aby neprišlo k ich magnetickému presýteniu.

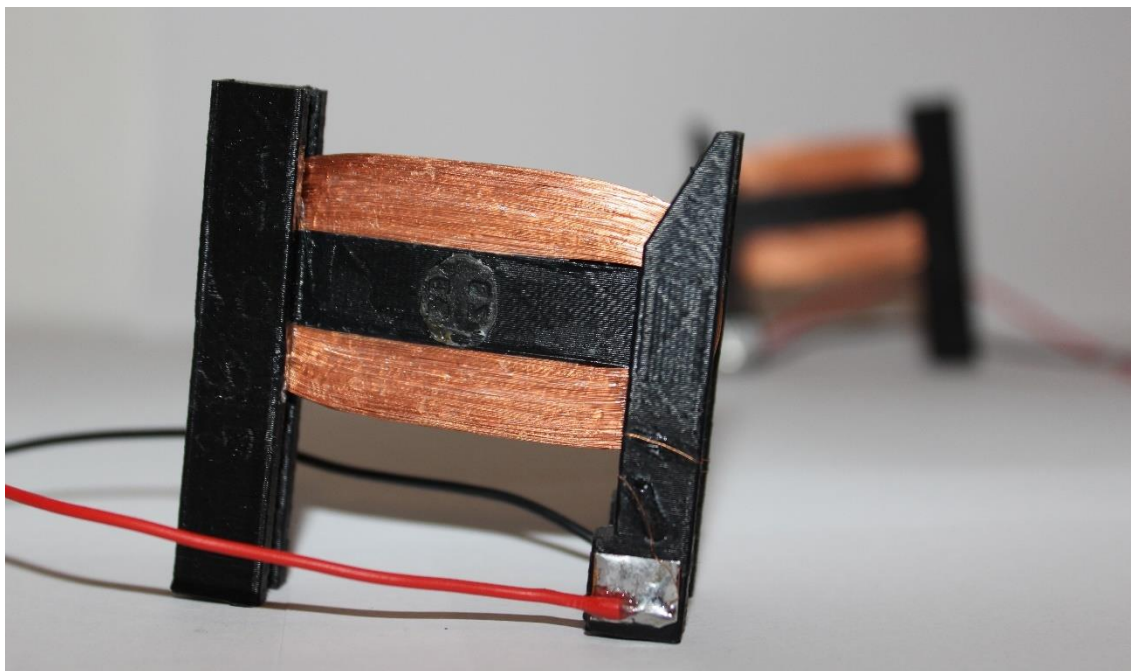
Potenciálna energia mechanizmu je realizovaná zmenou výšky ťažiska počas odvaľovania sa po kruhovom výseku. Generátor nepotrebuje žiadne pridané prvky tvoriace tuhosť. Konštrukcia generátora je vďaka tomu jednoduchšia a neobsahuje mechanické prvky v ktorých by dochádzalo k disipácii energie.

Z konštrukčného hľadiska nás zaujíma mechanické tlmenie, ktoré vzniká pri valivom pohybe. V snahe dosiahnuť čo najmenšie mechanické tlmenie je potrebné dosiahnuť vysokú kvalitu povrchových plôch, na ktorých dochádza ku valeniu. Prílišná hladkosť však spôsobí šmýkanie miesto valenia, čo je pre princíp funkcie daného generátora nevhodné.

Výroba indukčnej cievky prebehla bez toho aby boli dopredu teoreticky určované jej parametre, podstatou bolo navinúť najväčší možný počet závitov vzhľadom ku maximálnym možným rozmerom cievky. Geometria cievky sa odvíjala predovšetkým od rozmerov magnetov a maximálnej možnej výchylky ramien. Cievka má jednoduchý obdĺžnikový tvar. Potreba veľkého počtu závitov vychádza zo záujmu dosiahnuť čo možno najväčšie indukované napätie. Pre potreby navinutia cievky bol navrhnutý prípravok, ktorý umožnil navinúť cievku s potrebnou geometriou a zároveň slúži aj ako držiak cievky pri upevnení na rám generátora. Vinutie cievky je z medeného lakovaného vodiča o priemere 0.1mm. Vo výsledku sa podarilo navinúť cievku s 1200 závitmi. Čo zhruba odpovedá hodnote určenej pomocou výpočtu:

$$N = \frac{f \cdot S_c}{S_d} \quad (41)$$

Kde f je činiteľ plnenia, S_c je priemerná hodnota pričného prierezu vinutia cievky a S_d je prierez použitého drôtu. Vinutie cievky bolo navíjané ručne, čo značne zhoršilo činiteľ plnenia, ktorý udáva do akej miery je plocha cievky vyplnená drôtom. Hodnota činiteľa plnenia sa pri ručne vinutých cievkach pohybuje v rozmedzí 0,5-0,6. Počas navíjania bolo vinutie postupne pretierané lakom, po zatuhnutí laku sa vytvorila pevná štruktúra vinutia a nehrozí jeho odmotávanie alebo deformácia. Vývody s cievok boli vyvedené na vhodné plôšky, kde k nim boli pripájané silnejšie vodiče, nakoľko vlastný vodič cievky je veľmi náchylný na poškodenie.



Obr. 19: Indukčná cievka generátora

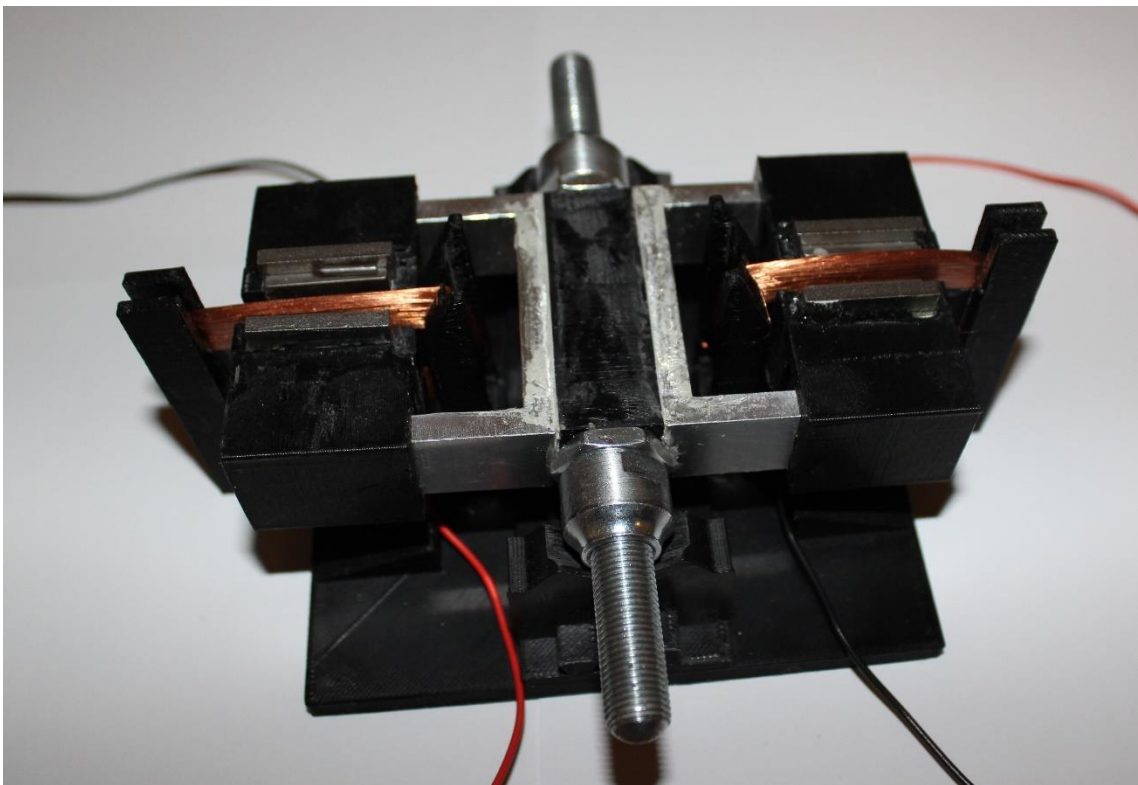
Pre ďalšie výpočty či modelovanie potrebujeme poznať impedanciu cievky, tá je tvorená predovšetkým činným odporom, indukčnosť cievky je dostatočne malá na zanedbanie. Činný odpor cievky R_{Cu} môže byť určený výpočtom podľa vzorca (41) alebo jednoduchým zmeraním pomocou ohmmetra.

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{l_d}{S_d} \quad (42)$$

Kde ρ_{Cu} je hodnota merného odporu medi, l_d celková dĺžka vodiča, S_d plošný prierez vodiča.

8.1 Výroba a zostavenie funkčného prototypu generátora

Návrh jednotlivých súčastí generátora, ako aj virtuálne zostavenie generátora bolo realizované v návrhárskom CAD programe Autodesk Inventor Professional 2019. Virtuálne zostavenie generátora a zadefinovanie jednotlivých väzieb a pohybov umožnilo overiť, že pri pohybe daných súčastí mechanizmu nebudú nastávať žiadne mechanické kolízie. Celý návrh prebiehal algoritmicky, dizajn súčastí bol simultánne upravovaný a testovaný až dokiaľ nebola vytvorená správna geometria všetkých súčastí. Pri návrhu geometrie jednotlivých súčastí a výbere materiálov bolo myslené na to, aby bolo možné generátor vyrobiť v zmysle „Rapid prototyping“ v krátkej dobe s nízkymi nákladmi a nebolo potrebné iné vybavenie ako poskytovalo laboratórium. Veľká časť súčastí, ktorých konštrukčným materiálom mohol byť plast, bola vytlačená na 3D tlačiarňi. Táto metóda umožňuje jednoduchú a rýchlu výrobu aj pomerne zložitých tvarov a pri použití ABS plastu ako materiálu aj dobrú opracovateľnosť. Nevýhodou je pomerne menšia presnosť a precíznosť. Ostatné súčasti boli vyrábané čo možno najjednoduchšie tak, aby spĺňali potrebné funkčné požiadavky. Pri výrobe nebol kladený dôraz na miniaturizáciu zariadenia, čo by vyžadovalo komplikovanejší a zdĺhavejší výrobný proces. Prototyp zostrojeného generátora má primárne overiť funkčnosť mechanizmu a prípadný potenciál pre ďalšie vylepšenie a použitie. Jednotlivé súčasti generátora sú poskladané modulárne, a je ich možné jednoducho vymeniť za iné tak, aby sa dali otestovať rôzne mechanické riešenia a úpravy za pomoci použitia rovnakej platformy.



Obr. 20: Kompletne zostavený generátor

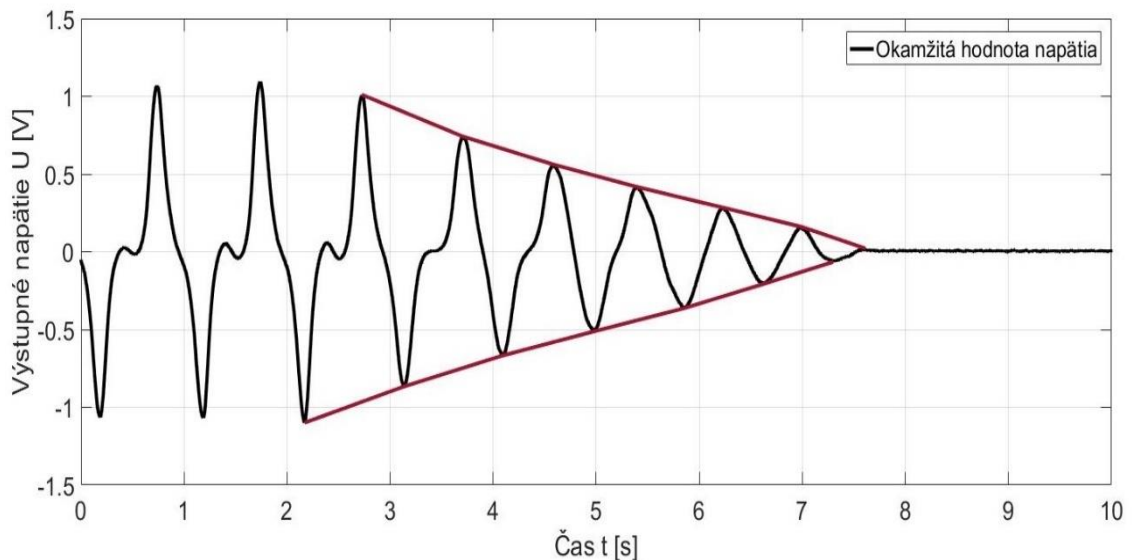
8.2 Určenie faktoru kvality mechanického spracovania

Faktor kvality Q_m charakterizuje kvalitu mechanického spracovania. V simulačnom modeli je tento parameter použitý pri výpočte mechanického tlmenia b_m . Kvalitu mechanizmu je možné určiť experimentálne pomocou logaritmického dekrementu δ , ktorého hodnotu je možné získať z priebehov napätí získaných osciloskopom. Pri mechanickom tlmení platí, že logaritmický dekrement má lineárny priebeh (Obr.20). Logaritmický dekrement je definovaný ako prirodzený logaritmus dvoch amplitúd, ktoré sú od seba vzdialené o n -krát dobu kmitu T :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{in + nT}} \quad (25)$$

Výsledná kvalita sa určí vzorcom:

$$Q_m = \frac{\pi}{\delta} \quad (26)$$



Obr. 21: Voľný dokmit elektricky nezat'áženého generátora po odstavení budenia

8.3 Súhrn simulačných a nameraných parametrov generátora

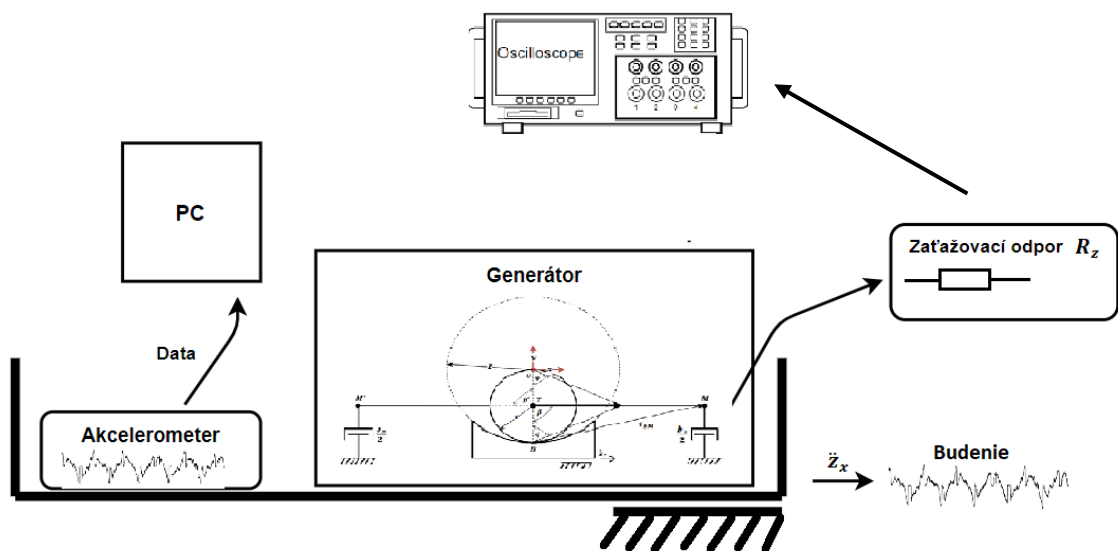
V dôsledku určitých výpočtových nepresností, zavedených predpokladov a odhadovaných parametrov, akým je napríklad faktor kvality mechanického spracovania ktorý sa nedá určiť inak ako experimentálne, sa niektoré parametre simulačného a reálneho modelu odlišujú. Nasledujúca tabuľka obsahuje prehľad základných parametrov.

Tab. 1: Prehľad parametrov generátora

Parameter	Teoreticky určená hodnota	Zmeraná hodnota	Jednotka
Hmotnosť valiaceho člena	251	277	<i>g</i>
I_T - Moment zotrvačnosti valiaceho člena k ťažisku	250,182	-	<i>kg.mm²</i>
R - Polomer kruhového výseku	16	16	<i>mm</i>
r - Polomer funkčnej plochy valenia	8	8	<i>mm</i>
Q_m - Faktor kvality mechanického spracovania	5	8,5	-
d_{BM} - Dĺžka ramena po stred magnetu	44	44	<i>mm</i>
Počet závitov cievky 1	1375	1200	-
Počet závitov cievky 2	1375	1264	-
R_{c1} - Odpor vinutia cievky 1	347	300	Ω
R_{c2} - Odpor vinutia cievky 2	347	316	Ω
R_{zp} - Ideálny záťažový odpor paralelného zapojenia	1107	600	Ω
R_{zs} - Ideálny záťažový odpor sériového zapojenia	1915	2500	Ω

9 Vyhodnotenie výsledkov nameraných dát z testovania generátora

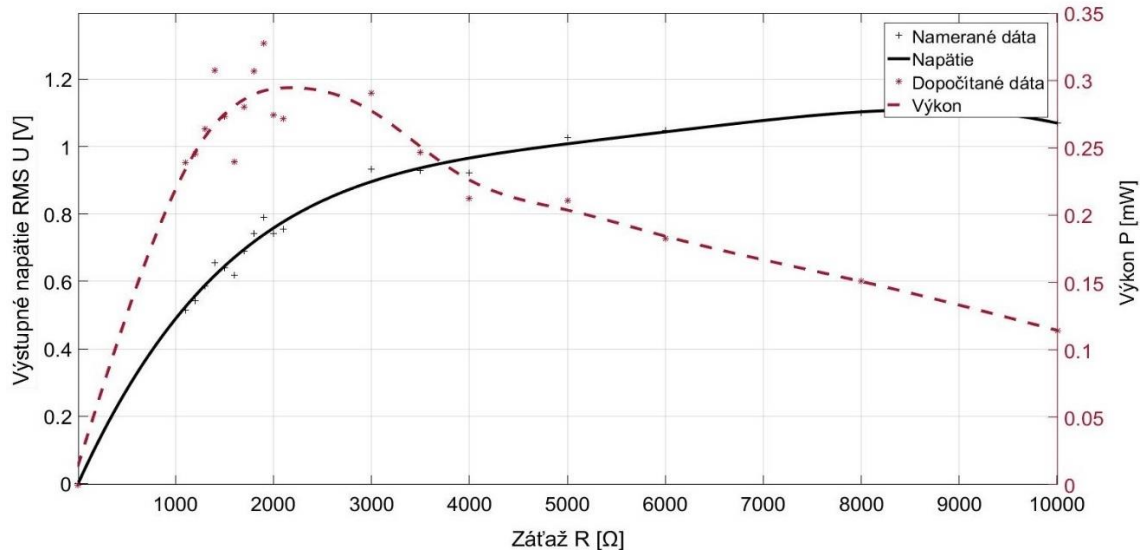
Funkčné zariadenie bolo premerané na osciloskope pre rôzne hodnoty zaťažujúceho odporu a boli vytvorené závislosti rovnaké ako pri simulačnom vyhodnocovaní parametrov. Budenie bolo realizované manuálne, posúvaním podstavy v ktorej bol umiestnený generátor spolu s akcelerometrom. Približné dodržanie parametrov budenia, teda amplitúdy zrýchlenia $0.1g$ a frekvencie $1,2Hz$ bolo zabezpečené iba pomocou optických značiek ktoré značili maximálnu výchylku podstavy. Z toho teda vyplýva nestálosť amplitúdy a frekvencie budiacich vibrácií. Budenie neodpovedá dokonale symetrickému budeniu ako v simulačnom modeli generátora, avšak takéto nedokonalé budenie lepšie odpovedá realite a získané výsledky tak nie sú zbytočne idealizované a pri reálnej aplikácii nedosiahnuteľné.



Obr. 22: Testovacia zostava

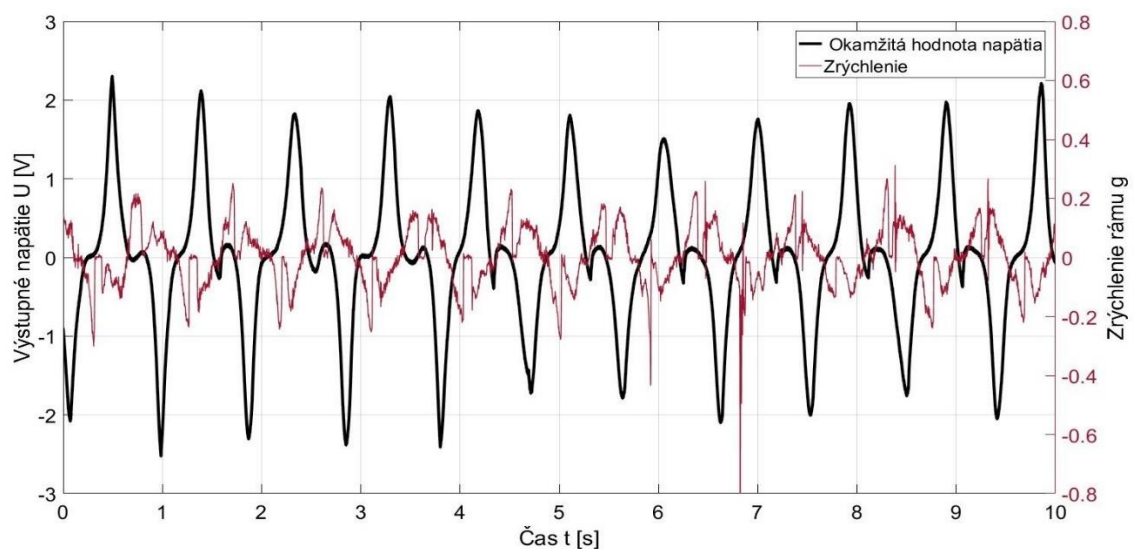
9.1 Sériové zapojenie indukčných cievok

Prvé meranie určuje závislosť výkonu a efektívnej hodnoty napätia na zaťažujúcom odpore pre sériovo zapojené cievky.



Obr. 23: Výkonovo - napät'ová charakteristika z testovania generátora so sériovým zapojením cievok

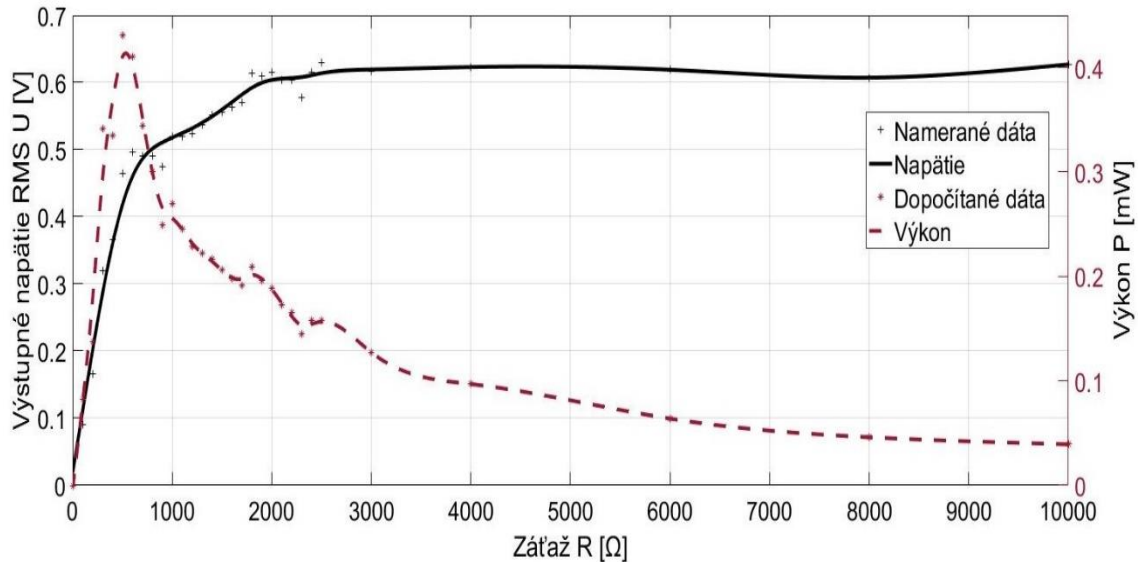
Priebeh indukovaného napätia (Obr.24) bol nameraný na záťažovom odpore o hodnote 2500Ω . Táto hodnota bola určená z grafu (Obr.23), kde generátor s týmto zaťažením dosahoval maximálny výkon. Na zmeranom priebehu okamžitého napätia je možné pozorovať rozsah natočenia páky, v ktorom sa cievka nenachádza v magnetickom poli, čomu odpovedajú úseky priebehu indukovaného napätia okolo nulovej hladiny. Rovnako je v tejto oblasti možné pozorovať náhle skokové zmeny, ktoré sú zapríčinené šmykaním pri maximálnej výchylke páky, čo negatívne ovplyvňuje výkon generátora.



Obr. 24: Okamžitá hodnota napätia na zaťažujúcom odpore pri sériovom zapojení cievok

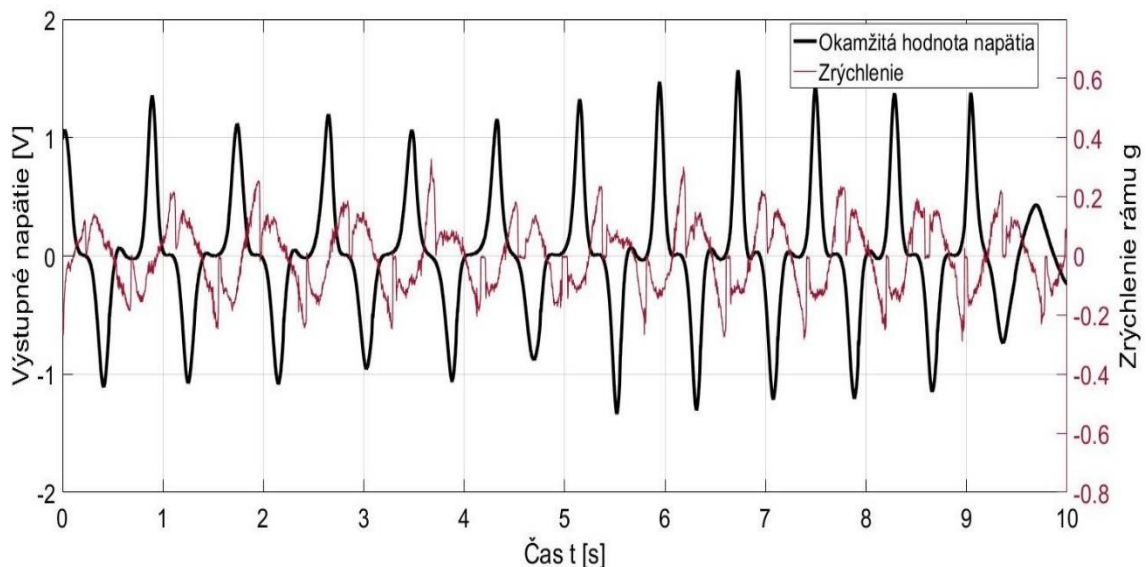
9.2 Paralelné zapojenie indukčných cievok

Charakteristika (Obr.25) odpovedá simulovanej charakteristike (Obr.16). Z reálneho testovania plynie veľmi úzke pásmo zaťažovacích odporov pri ktorých generátor produkuje maximálny výkon.



Obr. 25: Výkonovo - napät'ová charakteristika z testovania generátora s paralelným zapojením cievok

Priebeh indukovaného napätia pre paralelné zapojenie cievok (Obr.21) bol nameraný na zaťažujúcom odpore o hodnote 600 Ω . Znova je možné pozorovať, kedy sa už kvôli priveľkému natočeniu páky cievka nenachádzala v magnetickom poli. Zaujímavé však je, že pri paralelnom zapojení cievok neprichádzalo ku tak veľkým preklzom ako pri sériovom zapojení cievok.



Obr. 26: Okamžitá hodnota napätia na zaťažujúcom odpore pri paralelnom zapojení cievok

10 Záver

V tejto práci bol uskutočnený návrh a realizácia generátora s odvaľujúcim sa členom, vhodným pre aplikáciu v prostredí disponujúcom veľmi nízkymi frekvenciami budiacich vibrácií. Aplikácia navrhnutého riešenia ako autonómneho zdroja energie by sa v budúcnosti dala očakávať v oblasti sledovania transportu tovarov alebo pasívnej lokalizácie polohy poľnohospodárskych a iných zariadení, ktoré sú často rozľahlo umiestnené po krajine.

Zariadenie bolo zostavené a otestované. Zostavené zariadenie je prototyp, ktorý nie je vhodný pre reálnu aplikáciu, avšak overuje možnosti a potenciál navrhnutého mechanického riešenia. Zo získaných výsledkov možno usúdiť že predstavený návrh má potenciál pre ďalší vývoj.

Navrhovanými úpravami, ktorými by sa mal ďalší prípadný vývoj zaoberať sú úprava geometrie cievky a magnetického obvodu tak, aby bolo zaistené lepšie rozloženie magnetickej indukcie. Úpravou taktiež musia prejsť aj funkčné plochy na ktorých dochádza ku valeniu tak, aby bolo odstránené šmýkanie. Možno uviesť poznatok, že zachovanie Tusiho geometrie sa v danom zariadení nejaví ako nevyhnutná konštrukčná čiara. Toto zistenie otvára priestor pre úpravu geometrie, s ktorou súvisí tuhosť rezonančného mechanizmu. S tuhosťou mechanizmu súvisí aj nahradenie dorazových plôch daného generátora magnetmi, ktoré by tvorili pridanú nelineárnu tuhosť.

Viacere zo spomenutých navrhovaných úprav je možné realizovať a experimentálne vyhodnocovať na zostavenom prototypu. Vďaka jeho modularite stačí vymeniť danú upravenú súčasť a netreba zakaždým prejsť náročným a zdĺhavým procesom komplexného návrhu. Takýto prístup jednoznačne uľahčí a urýchli možný pokračujúci vývoj.

11 Zoznam použitej literatúry

- [1] J. Smilek et al., Rolling mass energy harvester for very low frequency of input vibrations, *Mech. Syst. Signal Process.* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.062>
- [2] WIERCIGROCH, M, A NAJDECKA a V VAZIRI. *Nonlinear Dynamics of Pendulums System for Energy Harvesting* [online]. : The 10th International Conference on Vibration Problems: © Springer ScienceCBusiness Media, 2011 [cit. 2019-04-20]. ISBN 978-94-007-2069-5. ISSN 0930-8989. 10.1007/978-94-007-2069-5 4. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2069-5_4?null
- [3] BEEBY, S p, M j TUDOR a N m WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, **17**(12), R175-R195 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1088/0957-0233/17/12/R01. ISSN 0957-0233. Dostupné z: https://primo.lib.vutbr.cz/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_iop10.1088/0957-0233/17/12/R01&context=PC&vid=420BUT&search_scope=Everything&tab=default_tab&lang=cs_CZ
- [4] ZORLU, Özge, Emre tan TOPAL a Haluk KÜLAH. A Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvester Using Mechanical Frequency Up-Conversion Method. *IEEE Sensors Journal* [online]. IEEE, 2011, **11**(2), 481-488 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2059007. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5582151>
- [5] RAMEZANPOUR, Reza, Hassan NAHVI a Saeed ZIAEI-RAD. Electromechanical behavior of a pendulum-based piezoelectric frequency up-converting energy harvester. *Journal of Sound and Vibration* [online]. Elsevier, 2016, 370, 280-305 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.052. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.052>
- [6] SMILEK, J. Nezávislý elektrický zdroj pro MEMS aplikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 156 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

- [7] DAI, Xian-zhi. A pendulum-type magnetoelectric vibration energy harvester with frequency-doubling characteristics. In: 2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAOWDA) [online]. Jinan, China: IEEE, 2015, s. 174-178 [cit. 2019-04-22]. DOI: 10.1109/SPAOWDA.2015.7364466. ISBN 978-1-4799-8807-5. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/7364466>
- [8] DING, Wenjun, Baowei SONG, Zhaoyong MAO a Keyan WANG. Experimental investigations on a low frequency horizontal pendulum ocean kinetic energy harvester for underwater mooring platforms. *Journal of Marine Science and Technology* [online]. Springer, 2016, 21(2), 359 [cit. 2019-04-22]. DOI: 10.1007/s00773-015-0357-7. ISSN 0948-4280. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00773-015-0357-7>
- [9] RUBEŠ, O. Návrh vibračního generátoru s využitím nelineárních charakteristik. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..
- [10] STEJSKAL, J. Testování vibračního generátoru s podélnou cívkou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [11] HADAS, Zdenek, Vojtech VETISKA, Jan VETISKA a Jiri KREJSA. Analysis and efficiency measurement of electromagnetic vibration energy harvesting system. *Microsystem Technologies* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, 22(7), 1767-1779 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1007/s00542-016-2832-4. ISSN 0946-7076. Dostupné z: https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_springer_jour10.1007/s00542-016-2832-4
- [12] Tusi-couple. *Wikimwdia.org* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Tusi-couple>

12 Zoznam obrázkov

Obr. 1: Mechanizmus zvyšujúci frekvenciu budiacich vibrácií [5].....	13
Obr. 2: Kyvadlový generátor využívajúci magnetostrikčný efekt [7]	14
Obr. 3: Architektúra nízkofrekvenčného horizontálneho kyvadlového generátora pre podmorské kotviace platformy [8].....	15
Obr. 4: Vibračný generátor s nelineárnou tlmiacou charakteristikou zostrojený na VUT [10].....	16
Obr. 5: Tusiho generátor zostrojený na VUT [1].....	17
Obr. 6: Tusiho mechanizmus [12]	18
Obr. 7: Modelový návrh upravenej konštrukcie generátora	20
Obr. 8: Sériové zapojenie indukčných cievok	24
Obr. 9: Paralelné zapojenie indukčných cievok.....	25
Obr. 10: Magnetická indukcia magnetického obvodu	27
Obr. 11: Závislosť magnetickej indukcie v okolí indukčnej cievky na natočení páky generátora.....	28
Obr. 12: Model generátora v simulinku	29
Obr. 13: Natočenie páky generátora	30
Obr. 14: Simulovaný priebeh magnetickej indukcie v okolí cievky.....	30
Obr. 15: Simulovaný priebeh napätia a výkonu v závislosti na zaťažujúcom odpore pri sériovom zapojení cievok	31
Obr. 16: Simulovaný priebeh napätia a výkonu v závislosti na zaťažujúcom odpore pri paralelnom zapojení cievok	31
Obr. 17: Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika modelového generátora	32
Obr. 18: Valiaci člen generátora nesúci magnetické obvody na pákach	33
Obr. 19: Indukčná cievka generátora	35
Obr. 20: Kompletne zostavený generátor	36
Obr. 21: Voľný dokmit elektricky nezaťaženého generátora po odstavení budenia	37
Obr. 22: Testovacia zostava.....	39
Obr. 23: Výkonovo - napäťová charakteristika z testovania generátora so sériovým zapojením cievok	40
Obr. 24: Okamžitá hodnota napätia na zaťažujúcom odpore pri sériovom zapojení cievok.....	40
Obr. 25: Výkonovo - napäťová charakteristika z testovania generátora s paralelným zapojením cievok	41
Obr. 26: Okamžitá hodnota napätia na zaťažujúcom odpore pri paralelnom zapojení cievok.....	41

13 Zoznam príloh

Príloha 1: Model zostaveného generátora v programe Simulink s príslušným skriptom

Príloha 2: Závislosti z reálneho a experimentálneho vyhodnocovania generátora