



# 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

## VIBRAČNÍ MIKRO SBĚRAČ PRO ŽELEČNIČNÍ TRATĚ

TRACKSIDE VIBRATION ENERGY HARVESTER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Beňo

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Bc. Martin Beňo</b>
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ondřej Rubeš</b>
Akademický rok:	2021/22

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

### Vibrační mikro sběrač pro železniční trať

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Železniční tratě vyžadují vysokou míru zabezpečení a je tedy potřebné velké množství senzorů. S výhodou by bylo možné využít bezdrátových senzorů napájených vibračními mikro sběrači. Pro danou trať je vždy potřeba provést analýzu vibrací a pro tyto vibrace navrhnout vhodný vibrační mikro sběrač.

#### Cíle diplomové práce:

1. Rešerše vibračních mikro sběračů s důrazem pro použití na železniční trati
2. Tvorba modelu vibračního mikro sběrače a analýza vhodných parametrů pro naměřená data z tratě
3. Návrh konstrukce vibračního mikro sběrače dle určených parametrů
4. Výroba vibračního mikro sběrače a ověření jeho parametrů

#### Seznam doporučené literatury:

KAŽMIERSKI, Tom J. a Steve BEEBY, ed. Energy Harvesting Systems [online]. New York, NY: Springer New York, 2011. ISBN 978-1-4419-7565-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-7566-9

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom vibračného mikro zberaču pre železničnú trať. Železničné trate sa neustále inovujú a pre vytvorenie vysokej miery zabezpečenia a prediktívnej údržby si vyžadujú veľké množstvo snímačov. Takéto snímače je potrebné napájať určitým zdrojom energie. Konvenčný zdroj energie by mohol byť nahradený práve vibračným mikro zberačom. V práci je diskutovaná nielen analýza vhodných parametrov, ale aj samotná realizácia mikro zberaču. V závere práce je predstavený funkčný koncept a taktiež sú zreteľne ukázané dosiahnuté výsledky.

## Summary

This diploma thesis is about the design of a vibrating energy harvester for a railway track. The railways are constantly being innovated and require a large number of sensors to achieve a high level of security and predictive maintenance. Such sensors need to be powered by a certain power source. A conventional energy source could be replaced by a vibrating energy harvester. The work discusses not only the analysis of suitable parameters, but also the realization of the energy harvester. At the end of the work, a functional concept is presented and the proven results are also taken into account.

## Kľúčové slová

železničná trať, vibračný mikro zberač, elektromagnetická indukcia, magnetická tuhosť, mechanická tuhosť, magnetický obvod, FEMM, Matlab, Simulink

## Keywords

railway, vibration energy harvester, electromagnetic induction, magnetic stiffness, mechanical stiffness, magnetic circuit, FEMM, Matlab, Simulink

## Bibliografická Citácia

BEŇO, Martin. Vibrační mikro sběrač pro železniční trať [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139842>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ondřej Rubeš.

Ja, Bc. Martin Beňo, týmto prehlasujem, že som diplomovú prácu s názvom *Vibračný mikro zberač pre železničnú trať*, vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce Ing. Ondreja Rubeša, Ph.D. s použitím odbornej literatúry, ktorú som patrične uviedol do zoznamu použitej literatúry.

**Bc. Martin Beňo**

Brno . . . . .

. . . . .

Na tomto mieste by som sa veľmi rád poďakoval Ing. Ondrejovi Rubešovi, Ph.D., za jeho ochotu a vždy správne nasmerovanie pri tvorení a písaní diplomovej práce. Obzvlášť by som mu chcel vyjadriť vďaku za všetok jeho čas, ktorý mi venoval v nespočetnom množstve osobných ale aj online konzultácií, počas ktorých mi poskytol neoceniteľné rady. V závere by som sa chcel poďakovať celej svojej rodine a priateľom, ktorí ma podporovali nielen pri písaní diplomovej práce, ale aj v mojom inžinierskom štúdiu.

**Bc. Martin Beňo**

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Motivácia a ciele práce</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Prehľad energy harvesting technológií</b>	<b>11</b>
3.1	Energia z okolia . . . . .	11
3.2	Premena vibrácií na elektrickú energiu . . . . .	13
3.2.1	Vibračné mikro zberače . . . . .	13
3.2.2	Elektromagnetická indukcia . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Súčasne dostupné mikro zberače pre železničnú dopravu</b>	<b>17</b>
4.1	Mikro zberač s aplikáciou na traťové vozidlá . . . . .	17
4.2	Mikro zberače s aplikáciou na železničnú trať . . . . .	18
4.2.1	Elektromagnetický zberač energie z okolia s využitím ozubených kolies	19
4.2.2	Kinetický elektromagnetický mikro zberač pre železničné aplikácie .	21
4.3	Zhodnotenie publikovaných mikro zberačov pre železničné trate . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Matematický model a východiskové riešenie mikro zberaču</b>	<b>25</b>
5.1	Vzťahy pre vytvorenie matematického modelu . . . . .	25
5.2	Vibračný mikro zberač s planžetovým uložením . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Analýza vplyvu parametrov na chovanie mikro zberaču</b>	<b>31</b>
6.1	Analýza výstupných hodnôt . . . . .	32
6.2	Široké pásmo parametrov a ich ladenie . . . . .	34
6.3	Zhodnotenie analyzovania parametrov . . . . .	36

<b>7</b>	<b>Návrh tuhosti a konštrukčný model elektromagnetického vibračného mikro zberaču</b>	<b>37</b>
7.1	Realizácia tuhosti systému za účelom dosiahnutia optimálnej vlastnej frekvencie . . . . .	37
7.1.1	Realizácia tuhosti systému pomocou magnetickej pružiny . . . . .	37
7.1.2	Topológia troch a štyroch magnetov pre magnetickú pružinu . . . . .	39
7.1.3	Využitie mechanickej tuhosti systému . . . . .	43
7.2	Konštrukčné riešenie mikro zberaču . . . . .	46
7.2.1	Magnetický obvod s cievkou . . . . .	46
7.2.2	Uloženie nosníku . . . . .	50
7.2.3	Modularita konštrukčného riešenia a finálny 3D návrh . . . . .	50
7.2.4	Ekonomické hľadisko . . . . .	52
7.2.5	Finálny vyrobený kus . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Testovanie vyhotoveného mikro zberaču pre železničnú trať</b>	<b>53</b>
8.1	Charakterizácia parametrov z voľnej odozvy . . . . .	53
8.1.1	Meranie nosníku a kmitajúceho rámu . . . . .	53
8.1.2	Testovanie finálnej verzie mikro zberaču . . . . .	57
8.2	Harmonické budenie zdrojom vibrácií . . . . .	64
8.2.1	Meranie pri vstupnom zrýchlení 10 mg . . . . .	64
8.2.2	Meranie pri vstupnom zrýchlení 20 mg . . . . .	66
8.2.3	Meranie s odporovou záťažou . . . . .	68
<b>9</b>	<b>Záver</b>	<b>70</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>72</b>
	<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>74</b>

# 1 Úvod

Počiatky modernej železničnej dopravy siahajú až do 16. storočia, kedy ako vlaky, tak aj železnice, respektíve dráhy, po ktorých sa jazdilo boli úplne jednoduché. Bezohľadu na náš osobný súhlas, alebo nesúhlas, k vývoju a skvalitneniu výrobného procesu a samotných produktov v technologickom odvetví dochádza každý deň mílovými krokmi. Výnimkou nie sú ani železnice. Množstvo železníc je neustále vo výstavbe a pridávajú sa neustále nové spojenia nielen medzi veľkými mestami, ale železničné trate spájajú čoraz častejšie aj veľmi odľahlé lokality. Vlaky premávajú často zložitým terénom a veľakrát aj v náročných poveternostných podmienkach.

Samozrejme, ako akýkoľvek produkt tak aj železnice si vyžadujú svoju údržbu. V dnešnej dobe je kladený veľký dôraz na aplikovanie prediktívnej údržby, ktorá môže upozorniť na technický problém ešte skôr než dôjde k vizuálnemu poškodeniu. Na druhej strane je tu otázka bezpečnosti, ktorá je stále viac a viac diskutovaná. V oblastiach, kde môže dochádzať k zosuvom pôdy alebo zemetraseniam, je viac ako potrebné včas varovať pred akýmkoľvek nebezpečenstvom.

S takýmito požiadavkami prichádza značný dopyt na implementáciu inteligentných senzorov pre snímanie potrebných veličín. Je úplne samozrejmé, že takéto senzory treba z niečoho napájať elektrickou energiou. Čoraz častejšie je kladený dôraz na iné, než konvenčné zdroje elektrickej energie, akými sú napríklad elektrická sieť alebo batérie. Riešením danej problematiky môže byť práve energy harvesting, ktorý využíva ako zdroj rôzne druhy ambientnej energie a na základe vhodného fyzikálneho princípu ju premieňa na elektrickú energiu.

Faktom ostáva, že čím sa technológie energy harvestingu stávajú schopnejšími, tým sa elektronické zariadenia stávajú menej náročnými na elektrickú energiu. Ambientných zdrojov je množstvo a patria k nim napríklad pasívna ľudská energia, slnečné žiarenie, zmena teploty alebo vibrácie. Práve vibrácie na železničnej trati sú zvyčajne nežiadúce a mnohokrát bývajú disipované do inej nevyužiteľnej formy.

Práve preto je vhodné využiť vibrácie ako zdroj energie a následne premeniť na elektrickú energiu, ktorá môže byť veľmi patrične využitá. Ako bude ďalej v diplomovej práci ukázané, riešením môže byť jednoduchý mikro zberač, ktorý je finančne nenáročný a zároveň nezávislý na akýchkoľvek poveternostných alebo svetelných podmienkach.

## 2 Motivácia a ciele práce

Motiváciou k napísaniu a realizovaniu diplomovej práce bolo pretransformovať nadobudnuté teoretické znalosti počas štúdia do reálneho produktu, a zároveň sa naučiť pristupovať ku problematike inžinierskym spôsobom. Ďalšou motiváciou bolo osobné presvedčenie, že vibrácie sú často vnímané ako prebytočná energia, ktorá je prakticky zadarmo a skrýva v sebe obrovský potenciál, aby ostala nevyužitá.

V priebehu posledných rokov sa na Fakulte strojného inžinierstva, VUT v Brne predstavilo viacero variant mikro zberačov. Avšak častokrát sa jedná o formu oscilátora s jedným stupňom volnosti, ktorý je určitým spôsobom naladený na rezonančnú frekvenciu zhodnú s frekvenciou konštantných budiacich vibrácií. Takýto prístup ale nie je úplne možný pri návrhu na železničnú trať, nakoľko kinematické budenie, ktoré je spôsobené pri prejazde, sa mení vzhľadom ku typu prechádzajúceho vlaku. Tým pádom je možné povedať, že frekvencia budenia nie je konštantná, ale naopak meniaci sa, čo môže predstavovať značnú výzvu.

Vzhľadom k vyššie uvedeným okolnostiam, je potrebné vhodne analyzovať vstupné vibrácie. Na základe týchto analýz následne nájsť kompromis medzi výkonom mikro zberaču a množstvom rozličných vlakov pre správne naladenie vlastnej frekvencie mikro zberaču. Preto je jedným z hlavných cieľov vyrobiť taký mikro zberač, ktorý bude podávať čo najväčší výstupný výkon pri čo najväčšom počte prejazdu rôznych vlakov.

Zároveň je kladený dôraz na samotnú konštrukciu celého mikro zberaču. Cieľom je dosiahnuť jednoduchú vyrobiteľnosť, kedy mikro zberač nebude obsahovať žiadne zložité komponenty. Taktiež si kladiem za cieľ stanoviť parametre tak, aby pri použití toho istého mikro zberača na odlišnej koľaji, mohla byť naladená vlastná frekvencia podľa potreby bez nutnosti výmeny komponentov.

V neposlednom rade zostáva dôležitou súčasťou pri koncepcii mikro zberača zohľadnenie pomeru cena / výkon a následne poskytnutie funkčného finálneho produktu, ktorý nebude ekonomicky náročný na výrobu. A práve to by z neho urobilo zaujímavú možnosť pre napájanie rozličných druhov senzorov na železničnej trati na akomkoľvek mieste.

Samozrejme netreba zabudnúť na štyri stanovené ciele v zadaní diplomovej práce.

# 3 Prehľad energy harvesting technológií

## 3.1 Energia z okolia

Pokroky posledných dvoch dekád v oblasti mikroelektromechanických systémov umožnili vývoj snímačov miniatúrnych rozmerov ( $\mu m - mm$ ) s funkciami snímania hodnôt akými sú napr. teplota, tlak, zrýchlenie a pod. Takéto snímače v kombinácii s bezdrôtovými technológiami sú čoraz viac atraktívnejšie nie len v oblasti priemyslu, ale aj monitoringu, prediktívnej údržby, dokonca aj v zdravotníctve, čím sa vytvoril značný priestor na dopyt pre dodávanie energie. Energia potrebná na chod takýchto systémov môže byť dodaná dvomi základnými spôsobmi:

- pomocou elektrochemických batérií alebo palivových článkov
- pomocou získania a premeny energie z okolia (*Energy Harvesting / Energy Scavenging*) ako napríklad teplo, svetlo, rádiové vlny alebo vibrácie.

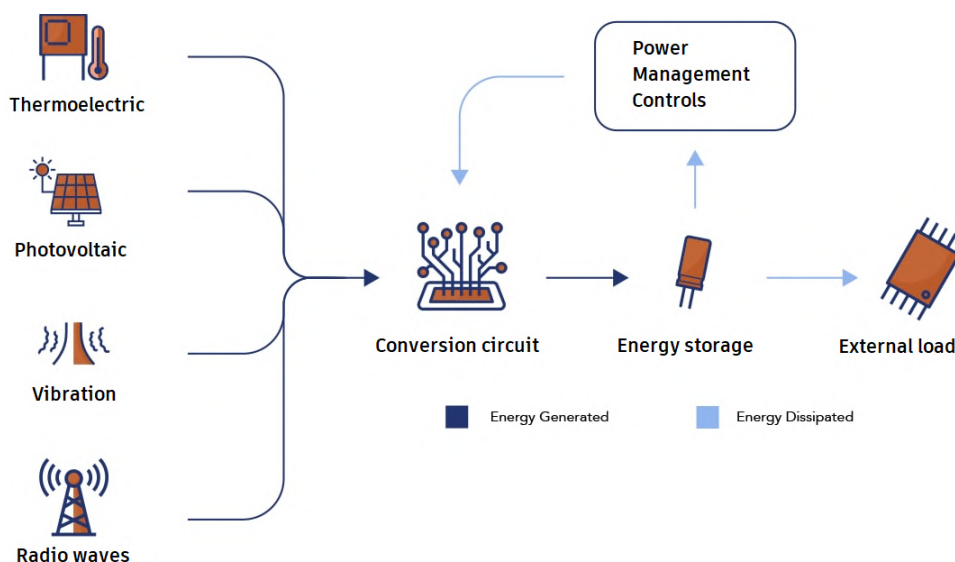
Pravdou je, že zdroje energie ako batérie alebo spaľovanie palív, môžu poskytnúť viac energie bez toho aby boli závislé na okolitých podmienkach. Veľkou nevýhodou takýchto zdrojov energie ostáva degradácia výkonu počas životnosti daných jednotiek a taktiež potreba výmeny komponentov alebo dodávanie paliva. To sú faktory, ktoré neovplyvňujú energy harvesting [1]. Porovnanie je možné vidieť v tabuľke 3.1.

### 3 PREHLAD ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIÍ

Rozličné zdroje energie			
Zdroj energie	Hustota výkonu ( $\mu W/cm^3$ ). Po 1 roku	Hustota výkonu ( $\mu W/cm^3$ ). Po 10 rokoch	Referencia
Solárna (exteriér)	15000 (priame slnko)	15000 (priame slnko)	[2]
Solárna (interiér)	6 (na pracovnom stole)	6 (na pracovnom stole)	[2]
Vibrácie	100-500	100-500	[3]
Teplotný gradient	15 ( $\Delta T = 10^\circ C$ )	15 ( $\Delta T = 10^\circ C$ )	[2]
Pasívna ľudská energia	330	330	[3]
Nenabíjateľné batérie	45	3.5	[4]
Uhľovodíkové palivo (mikromotor)	333	33	[4]
Palivové články (metanol)	280	28	[4]

Tabuľka 3.1: Porovnanie hustoty výkonu rôznych zdrojov energie [2]

Najčastejšími zdrojmi okolitej energie môžu byť teplo, svetlo, vibrácie alebo rádiové signály. Nevýhodou týchto zdrojov je závislosť na okolitých podmienkach viď tabuľka 3.1, prvé dva riadky. Solárna energia je značne ovplyvnená tým, či je zberač umiestnený na priamom slnku alebo niekde mimo priameho slnečného žiarenia. Preto kľúčovým faktorom ostáva určiť vhodný zdroj ambientnej energie pre požadovanú aplikáciu.



Obr. 3.1: Okolité zdroje energie [5]

### 3.2 Premena vibrácii na elektrickú energiu

Jedným z najslubnejších zdrojov okolitej energie, s využitím v železničnej doprave, sú práve vibrácie. Zberný výkon z vibračného mikro zberaču je závislý na množstve vibrácií. V prípade vibrácii nezáleží na tom, či je svetlo alebo tma ako pri solárnom zdroji energie. Vibrácie sú zväčša brané ako vedľajšie a nechcené účinky iných procesov, ale sú taktiež veľmi atraktívnym zdrojom energie. Vibrácie je možné premeniť na elektrickú energiu viacerými metódami. Medzi najpoužívanejšie patrí premena pomocou piezoelektrického javu, elektrostatickej premeny alebo elektromagnetickej indukcie [1].

#### 3.2.1 Vibračné mikro zberače

Samotná časť názvu tejto záverečnej práce je mikro zberač alebo tzv. mikrogenerátor a to sa týka ako výkonu, tak aj samotnej veľkosti generátoru. Po konštrukčnej stránke sú takéto generátory tvorené zväčša dvomi kľúčovými elementmi, a to konkrétne:

- rezonančným mechanizmom
- mechanickým prevodníkom na elektrickú energiu.

Dôležitou úlohou pri návrhu mikro zberaču je naladiť rezonančný mechanizmus na vhodnú vlastnú frekvenciu. Vďaka takémuto naladeniu je vytvorený relatívny pohyb v mechanickom prevodníku. Realizácia mikro zberaču môže mať dve podoby. Jednou z možností je, že časť mikro zberaču, ktorá vykonáva relatívny pohyb voči okoliu je pevne spojená s prevodníkom vibračnej energie na elektrickú energiu, alebo je tomu presne naopak. Veľmi dôležitým faktom je, že účinnosť vibračného generátoru je najvyššia v okolí rezonančnej frekvencie a to len v prípade že amplitúda výchylky, ktorá je spôsobená vibráciou, vybudí v mikro zberači dostatočný relatívny pohyb [6].

#### Elektrostatické generátory

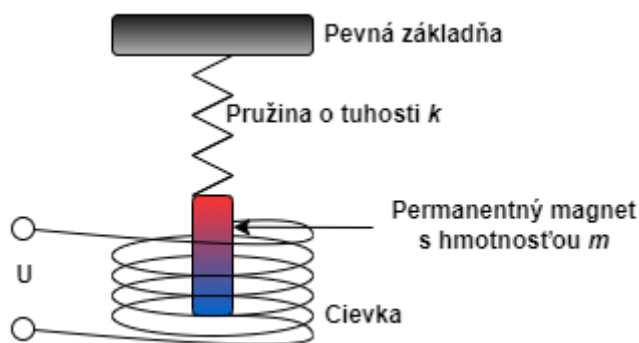
Elektrostatické mikro zberače sa líšia od tých piezoelektrických a elektromagnetických najmä tým, že sú kapacitné a nie induktívne. Princípom je elektrostatická premena, ktorá funguje na základe pohybu dvoch dosiek voči sebe s dielektrikom medzi nimi, čím sa vytvorí premenlivý kondenzátor. Elektrostatické mikro zberače sú zväčša vhodnejšie pri vytváraní menších energy harvestrov. Údajne môžu takéto energy harvestre poskytnúť výkon okolo  $50 \mu\text{W}$  [7].

#### Piezoelektrické generátory

Piezoelektrický materiál je využívaný v mnohých vibračných aplikáciach. Vibráciou je vytvorená sila, ktorá pôsobí na piezoelektrický materiál, čím ho začne ohýbať a tým sa vytvára elektrický náboj. Najrozšírenejšími piezoelektrickými materiálmi s využitím pre energy harvesting je PVDF a najmä PZT vďaka vysokej piezoelektrickej konštante. Podľa dostupných informácií sa uvádza, že piezoelektrické generátory môžu poskytovať výkon okolo  $15 \text{ mW}$  [7]

### Elektromagnetické generátory

Elektromagnetické generátory boli implementované už v 19. storočí M. Faradayom. Teória, ktorá stojí za touto technológiou je elektromagnetická indukcia a jej princíp je ďalej popisovaný v kapitole 3.2.2. Samotný princíp je vo svojej podstate jednoduchý. Vďaka tomu sa v posledných dekádach dostáva veľkej pozornosti práve elektromagnetickým generátorom s využitím vibrácií ako zdrojom vstupnej energie [7]. Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.2.1, tak realizácia mikro zberaču môže mať dve topológie konštrukcie. A to konkrétne je buď vytvorené pohyblivé magnetické pole o určitej hmotnosti, ktorá kmitá a cievka, na ktorej sa indukuje napätie je uložená staticky. Druhá zmienaná topológia funguje presne naopak, kedy samotná cievka kmitá a magnetické pole je statické. Bohužiaľ má takáto konštrukciu značnú nevýhodu a tou je pripojenie kmitajúcej cievky k elektrickému obvodu [6]. U elektromagnetický generátorov sa hovorí, že môžu údajne ponúknuť výkon až 140 mW [7].



Obr. 3.2: Schematický náčrt elektromagnetického generátoru

### Zhodnotenie uvádzaných metód

Z nižšie uvedenej tabuľky 3.2 a predchádzajúcich odsekov je možné zhodnotiť vhodnosť jednotlivých metód pre predkladanú záverečnú prácu. Hlavnou myšlienkou je, že navrhovaný generátor má byť aplikovaný na železničnú trať kde je jedným z cieľov dosiahnuť generovanie výkonu na odľahlých miestach. Z tohto dôvodu má veľkú nevýhodu elektrostatický princíp ktorý potrebuje na rozbehnutie externý zdroj. Druhým faktorom je, že predkladaný generátor by mal byť aplikovateľný na nižšie frekvencie vibrácií zhruba do 100Hz. Po takomto krátkom zhodnotení princípov sa elektromagnetický princíp javy ako najvhodnejší pre predmet tejto záverečnej práce.

Rozličné metódy premeny kinetickej na elektrickú energiu		
Princíp	Výhody	Nevýhody
Elektrostatický	+ Veľký potenciál pre integráciu do MEMS štruktúr	- Vyžaduje samostatný zdroj napätia pre inicializáciu - Nízky výkon - Použitie mechanického dorazu
Piezoelektrický	+ Vhodný ako zdroj energie pre frekvencie vibrácií väčšie než 100Hz až kHz + Vysoké generované napätie	- Vysoký vnútorný odpor - Malý prúd
Elektromagnetický	+ Vhodný ako zdroj energie pre frekvencie vibrácií do 50 až 100Hz + Dostatočné generované napätie a výkon pri rozmerovo neobmedzenom generátore	- Obecne nízke napätie

Tabuľka 3.2: Porovnanie princípov vibračných generátorov [6]

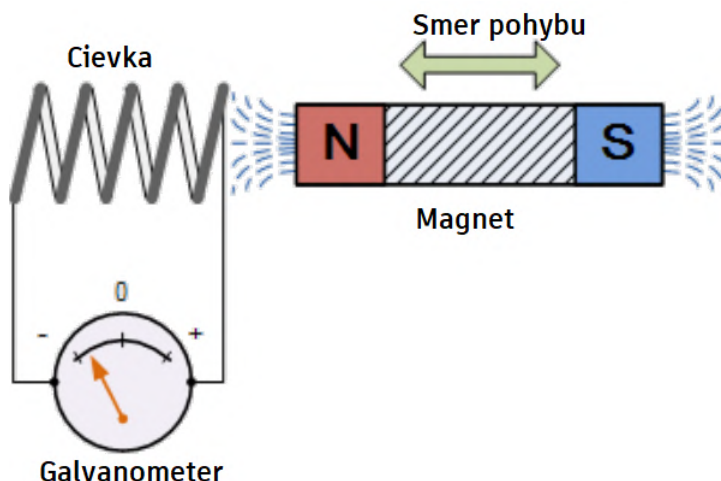
### 3.2.2 Elektromagnetická indukcia

Jav, ktorý je známy ako *Elektromagnetická Indukcia* bol objavený vďaka anglickému vedcovi Michaelovi Faradayovi už v roku 1831. Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie hovorí, že napätie sa indukuje v obvode vtedy, keď existuje relatívny pohyb medzi vodičom a magnetickým pólom. Časová miera zmeny magnetického toku udáva hodnotu tohto indukovaného napätia [8]. Tento zákon možno vyjadriť nasledovným matematickým zápisom:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

kde  $\varepsilon$  je elektromotorické napätie a  $\Phi$  predstavuje magnetický tok, ktorý preteká obvodom. Zmena magnetického prostredia môže byť vytvorená napríklad zmenou intenzity magnetického poľa, pohybom magnetu smerom k cievke alebo od nej, pohybom cievky do magnetického poľa alebo von z neho, relatívnym otáčaním cievky vzhľadom na magnet atď [9].

### 3 PREHLAD ENERGY HARVESTING TECHNOLOGII



Obr. 3.3: Elektromagnetická indukcia na princípe pohybujúceho sa magnetu [8]

Podľa Maxwell-Faradayovej rovnice, kde pre vinutú cievku zloženú z  $N$  rovnakých závitov s rovnakým magnetickým tokom prechádzajúcim skrz tieto závitky platí, že výsledné elektromotorické napätie je vyjadrené matematickým zápisom [10]:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.2)$$

Keď sa vezme do úvahy fakt, že sa vodič začne pohybovať v tomto magnetickom poli, ktoré je homogénne, čiže v každom bode cievky je magnetický tok rovnaký a plocha je rovinná, tak môžeme magnetický tok vyjadriť ako [10]:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

$B$  reprezentuje magnitúdu magnetickej indukcie,  $S$  je rovinná plocha a  $\alpha$  je uhol medzi siločiarami magnetického poľa a normálou plochy. V prípade kedy je dosiahnuté to, že sa vodič pohybuje v takom zmysle aby normála plochy zvierala so siločiarami magnetického poľa uhol  $\alpha = 0$  tak sa rovnica 3.3 zredukuje na:

$$\Phi = B \cdot S \quad (3.4)$$

Následne dosadením 3.4 do 3.2 je možné získať matematický zápis indukovaného napätia pre cievku ktorá sa pohybuje v magnetickom poli:

$$U_i = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N \cdot B \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.5)$$

S obecným vyjadrením plochy vodiča sa získava finálny vzťah pre indukované napätie na cievke ktorá sa pohybuje v magnetickom poli následovne:

$$U_i = N \cdot B \cdot l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = N \cdot B \cdot l \cdot v \quad (3.6)$$

Kde  $l$  popisuje aktívnu dĺžku vodiča a rýchlosť pohybu vodiča je daná premennou  $v$ .

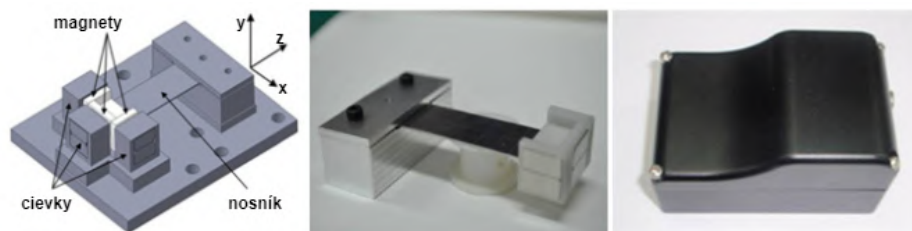
## 4 Súčasne dostupné mikro zberače pre železničnú dopravu

V súčasnosti sa dostáva čoraz viac pozornosti vibračným energy harvesting technológiám. V značnej miere je tomu tak najmä počas posledných dvoch dekád. Množstvo vývoja sa stále odohráva na univerzitných pôdach, ale postupne sa vývoj začína rozširovať aj mimo univerzity, do súkromných sektorov s podnikateľskými zámermi. Jednou z možných lokácií aplikovania takejto technológie je železničná doprava. Ako už bolo ukázané v kapitole 3.2, existuje niekoľko základných metód pre premenu vibrácií na elektrickú energiu. A práve elektromagnetická indukcia je jedna z najčastejšie využívaných pre železničnú dopravu. Podľa miesta aplikovania v železničnej doprave sa dajú mikro zberače rozdeliť na dve väčšie skupiny:

- Mikro zberač umiestnený na traťové vozidlo
- Mikro zberač umiestnený na železničnú trať

### 4.1 Mikro zberač s aplikáciou na traťové vozidlá

Jedným z doposiaľ predstavených návrhov je diskutovaný v publikácii od H. Park a J. Kim. Prišli s kompaktným riešením uchytenia mikro zberaču vedľa vlakového kolesa, kde počas reálneho testu získali priemerný výkon 13 mW [11].

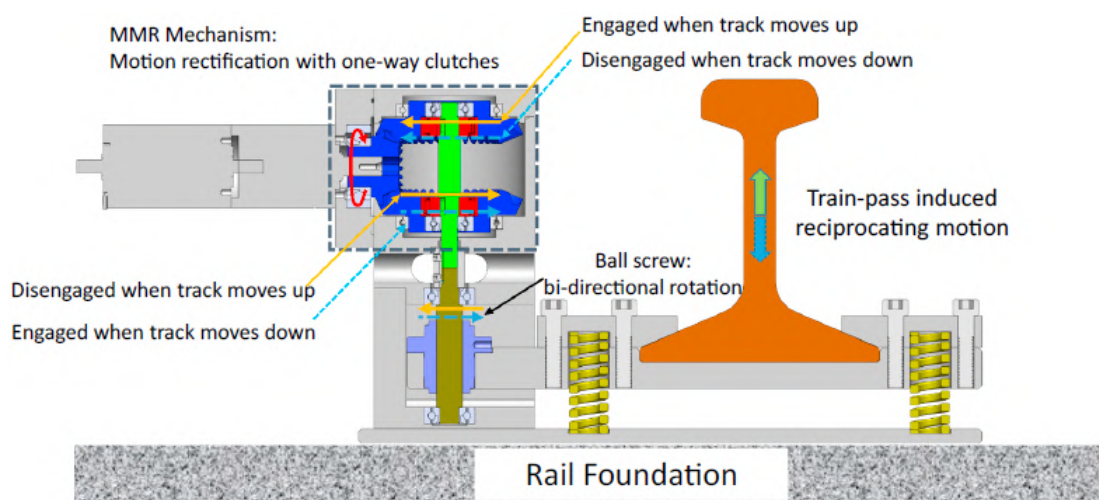


Obr. 4.1: Predstavený EH pre vysoko-rýchlostné vlaky. (Prebrané z [11])

Y. Pan a spol sa rozhodli aplikovať mikro zberač do vlakového odpruženia, kde počas testovania v reálnych podmienkach pri vlakovej jazde v rýchlosti 30 km/h boli schopný v priemere generovať výkon 1.3 W [12]. Podobne aj S. Bradai s kolektívom prišli s návrhom mikro zberaču tubovitého tvaru s upevnením na železničný vozeň s maximálnym výkonom 10 mW [13]. Takéto zberače sú samozrejme prínosné, ale ich využiteľnosť z hľadiska zvyšovania bezpečnosti na trati nemá veľký potenciál.

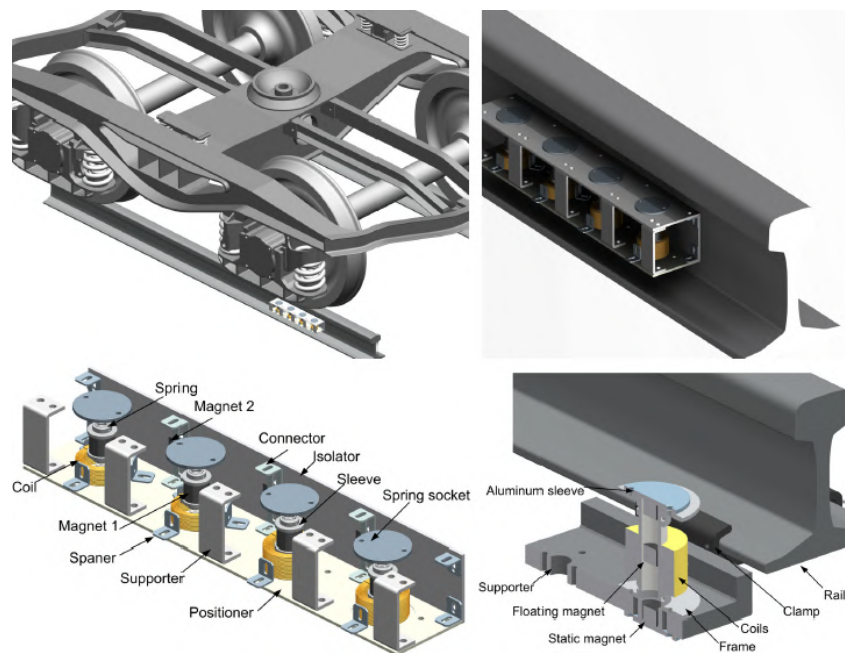
## 4.2 Mikro zberače s aplikáciou na železničnú trať

Omnoho prínosnejšími sú z hľadiska využiteľnosti pre napájanie senzorov a monitoringu železničnej trate zariadenia, ktoré je možné osadiť priamo na trať. Doposiaľ bolo predstavených niekoľko konceptov s upevnením na trať, ako napríklad od Yu Pan a kolektívu. Predstavili kompaktný návrh elektromagnetického mikro zberaču s využitím na trati a upevnením na päť kolaje. Využili systém vertikálnych pohybov ktoré sú transformované na rotačný pohyb pomocou matice a závitovej tyče. Tento pohyb je následne skrz prevodovku prenášaný na elektromagnetický generátor. Ich návrh podrobili simuláciám, laboratórnym testom ale aj testovaniu v teréne. Svojim konceptom dokázali pri testovaní získať v priemere výkon až 2.24 W pri prejazde vlaku v rýchlosti 30 km/h [14].



Obr. 4.2: Elektromagnetický EH s umiestnením na koľaj. (Prebrané z [14])

S odlišným návrhom prišiel Gao s kolektívom v roku 2016. Využili plochu stojny kolajnice a kolmo na ňu upevnili predstavovaný zberač energie. Ich návrh je možné vidieť na obrázku 4.3, ktorý sa skláda z magnetov, cievky, pružiny a pevnej základnej upevnenej na koľaj. Cievka je vinutá na kruhovitý bubon s dierou uprostred. Táto diera je využitá na pohyb magnetu, ktorý vytvára premenlivé magnetické pole, a ten je uchytený na mäkkej pružinke pre chod v rezonancii pri nízkych frekvenciách. Okolo magnetu sú uložené medené axiálne ložiská pre zníženie trenia magnetu. Taktiež využili na mieru vyrobené hliníkové izolátory, ktoré majú pomerne nízku permeabilitu, aby nedošlo ku magnetickej interakcii magnetov s ocelovou kolajnicou. Počas práce zdokumentovali niekoľko variácií vylepšení ich návrhu, a v závere sa im podarilo získať pri testovaní v teréne špičkové hodnoty výkonu 119 mW pre nízku frekvenciu 6 Hz. Ako sami popisujú, veria, že v budúcnosti by podobný mikro zberač mohol byť súčasťou kolajnice, čím by napájal potrebné senzory a prispel tak ku bezdrôtovému monitorovaniu železníc [15].

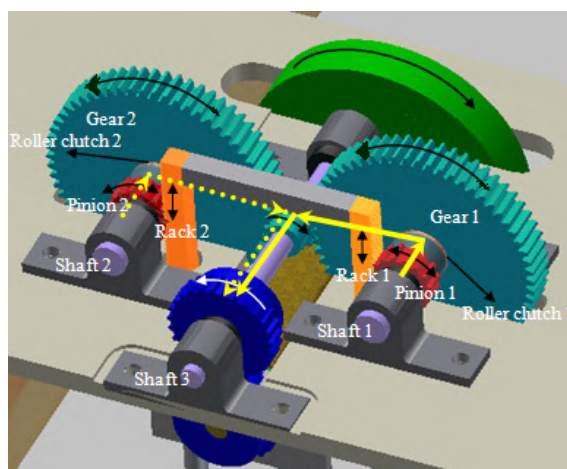


Obr. 4.3: Kolažnicový mikro zberač s magnetom na pružine. (Prebrané z [15])

Množstvo doposiaľ predstavených elektromagnetických EH využíva v určitej konfigurácii spojenie zotrvačníku, ozubených kolies, prevodovky a generátoru. Preto je v nasledujúcej podkapitole 4.2.1 vybraný jeden reprezentatívny návrh a bližšie popísaný. Posledná podkapitola 4.2.2 poukazuje na úplne odlišný, ale najmä jednoduchý, koncept elektromagnetického mikro zberaču.

#### 4.2.1 Elektromagnetický zberač energie z okolia s využitím ozubených kolies

John J. Wang a kolektív predstavili svoj dizajn v roku 2012. Nimi navrhnutý koncept pozostáva z mechanického prevodníku, samotného elektromagnetického generátora a zotrvačníku. Dvojsmerný pohyb sa prevádza na jednosmerný pomocou troch hriadelov, troch čelných ozubených kolies, ozubnice s pastorkom a dvoch hriadelových spojok.

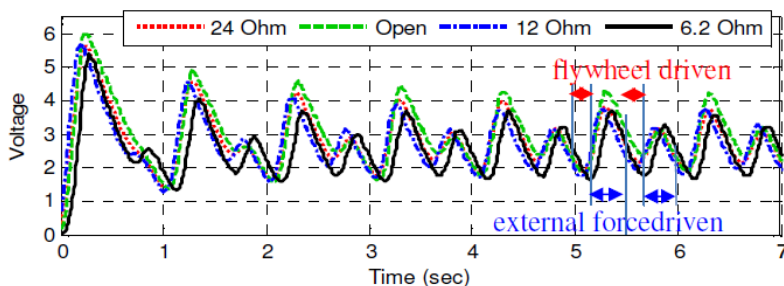


Obr. 4.4: Ilustrácia predstaveného konceptu Wang s kolektívom. (Prebrané z [16])

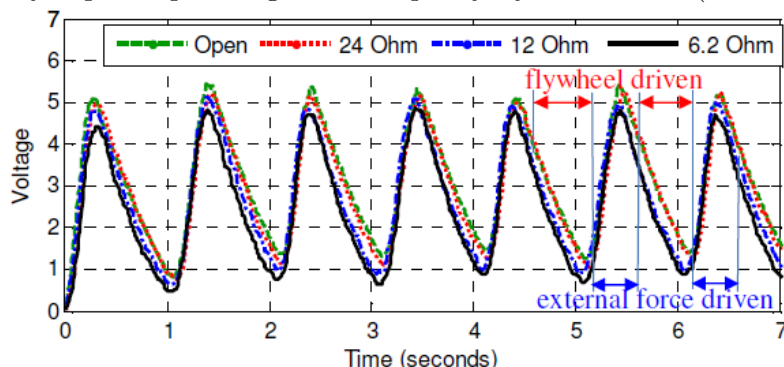
Dve ozubnice označené ako *Rack 1* a *Rack 2* sa pohybujú vo vertikálnom smere. Tieto otáčajú dva pastorky a pomocou hriadelových spojok je prenesený pohyb na dve veľké ozubené kolesá označené ako *Gear 1* a *Gear 2*. Oboje ozubené kolesá sa môžu otáčať iba proti smeru hodinových ručičiek, čoho výsledkom je otáčanie hriadeľa označeného ako *Shaft 3* po smeru hodinových ručičiek. Práve otáčanie tejto hriadele zaberá zotrvačnikom a samotným generátorom ktorý je na spodnej strane základne. Na obrázku 4.4 sú ešte vyobrazené dve žlté čiary. Plná čiara znázorňuje prenos pohybu v momente kedy sa ozubnice pohybujú smerom dole. Žltá prerušovaná ukazuje prenos pohybu v opačnom prípade, a to keď sa ozubnice pohybujú smerom hore. Úlohou implementovania zotrvačníka je vytvorenie úložiska kinetickej energie, ktorá je disipovaná do elektrického generátora v momente kedy pražce nie sú vystavené vibráciám od koľajnice [16].

Pri inštalácii predstaveného generátora na železničnej trati bola doska upevnená medzi dva vlakové pražce. Táto doska slúži ako základňa, na ktorú sú pripevnené všetky, už zmienené, komponenty mikro zberaču. Ku správne fungovaniu sú dve ozubnice ukotvené pevne v určitej hĺbke podložia a v momente keď vlak prechádza po koľajnici tak sa celá platňa dá do pohybu [16].

Wang s kolektívom rozdelili experimentálne testovanie na dve časti, kde využili výchylku železničnej trate  $x_1 = 0.25\text{in}$  (6.35mm) a  $x_2 = 0.5\text{in}$  (12.7mm). Výstupné napätie zaznamenávali pri odporoch  $R = 6.2\Omega$ ,  $12\Omega$  a  $24\Omega$  a pri otvorenom obvode [16].



Obr. 4.5: Výstupné napätie z generátora pri výchylke 6.35 mm (Prebrané z [16])



Obr. 4.6: Výstupné napätie z generátora pri výchylke 12.7 mm (Prebrané z [16])

Pri experimente s výchylkou 6.35 mm udáva Wang s kolektívom, že boli schopný vygenerovať výkon 1 W s účinnosťou 22.2%. V druhom prípade, kedy využili výchylku 12.7 mm dokázali priemerne vygenerovať výkon 1.4 W s účinnosťou 16.9% [16]. Na obrázkoch 4.5 a 4.6 je možné vidieť, že v oboch prípadoch sa drží napätie nad 1 V. Napriek tomu, že sú výsledky generovaného výkonu a napätia postačujúce na napájanie menších snímačov má predkladaný koncept niekoľko nevýhod. Prvou je, že na rozbeh a spustenie predkladaného

## 4 SÚČASNE DOSTUPNÉ MIKRO ZBERAČE PRE ŽELEZNIČNÚ DOPRAVU

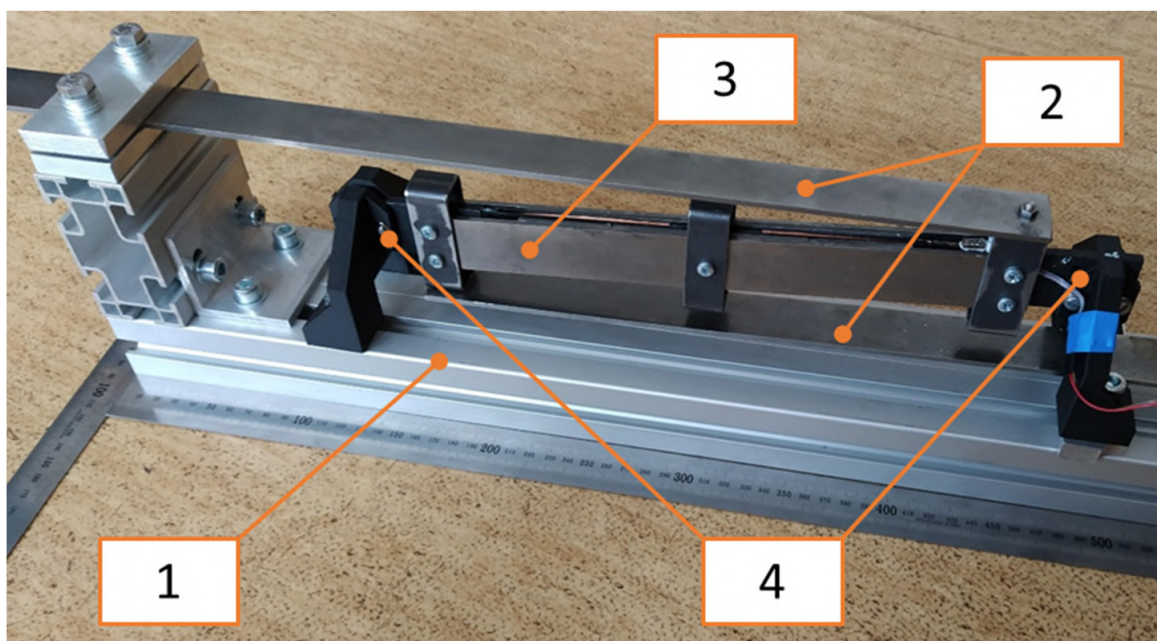
generátoru je potrebné vyvinúť pomerne vysokú silu a to z dôvodu použitia zotrvačníku. Druhou nevýhodou je značne náročné konštrukčné riešenie, ktoré vyžaduje niekoľko rozličných komponentov ktoré môžu pridávať nechcené trenie do systému. Taktiež sami autori tohto konceptu popisujú, že je veľká pravdepodobnosť nesúosovosti ozubnic a ozubených kolies pri montáži tohto generátoru.

### 4.2.2 Kinetický elektromagnetický mikro zberač pre železničné aplikácie

Z. Hadaš s kolektívom predstavili začiatkom roku 2022 zaujímavý návrh elektromagnetického zberaču pre železničné aplikácie. Prišli s návrhom, kde využívajú vibrácie prenesené z koľajnice na pražce. Navrhujú, že predložený mikro zberač by mohol byť montovaný na už existujúce pražce, alebo v budúcnosti implementovaný dovnútra novej generácie pražcov pri ich výrobe. Konštrukcia sa skladá zo:

1. základne s možnosťou upevnenia na pražec
2. zavesenia rezonátoru tvoreného dvojicou ocelových nosníkov
3. hmoty rezonátora ktorého súčasťou je aj magnetický obvod
4. cievky uloženej do plastových držiakov,

kde jednotlivé body sú patrične vyznačené na nasledujúcom obrázku 4.7 [17] .



Obr. 4.7: Predstavený návrh KEH s uložením na vlakové pražce (Prebrané z [17])

Pre určenie predpokladu výstupného výkonu vytvorili matematický model, s jedným stupňom voľnosti pre budené kmitanie, ktorý popisali známou diferenciálnou rovnicou druhého rádu. Pri návrhu počítali s dôležitým faktom a to, že v realite je nemožné pri každom prejazde vlaku prevádzkovať mikro zberač v rezonančnej frekvencii v dôsledku charakteristiky

#### 4 SÚČASNE DOSTUPNÉ MIKRO ZBERAČE PRE ŽELEZNIČNÚ DOPRAVU

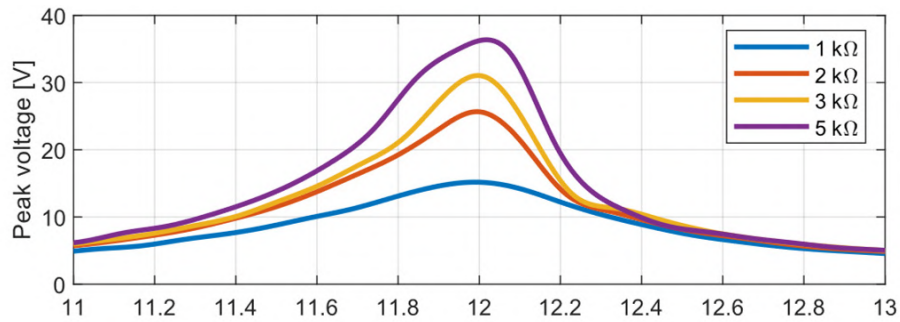
budenia. Impulzy prechádzajúcich vlakov sú za každým rôzne a záležia na hmotnosti samotného vlaku, rýchlosti prejazdu a taktiež aj na kvalite podložia. Aj napriek tomu však poskytuje voľná odozva vibrácií uspokojujúce úrovne užitočnej elektrickej energie. Vyrobený koncept od Z. Hadaša a kolektívu má následovne parametre [17]:

Parameter	Označenie	Hodnota
Celková hmotnosť	-	3.9kg
Celkové rozmery	-	600x160x90 $mm^3$
Kmitajúca hmota	m	0.8 kg
Rezonančná frekvencia	$\Omega$	12 Hz
Faktor kvality	$Q_M$	150
Rozmery cievky	-	210x25x3 $mm^3$
Počet otáčok cievky	N	300
Odpor cievky	$R_C$	150 $\Omega$
FeNdB, rozmery magnetického obvodu	-	Dva páry, 3x10x1800 $mm^3$
Vzduchová medzera	-	6 mm
Priemerná hustota magnetického toku	B	0.3 T

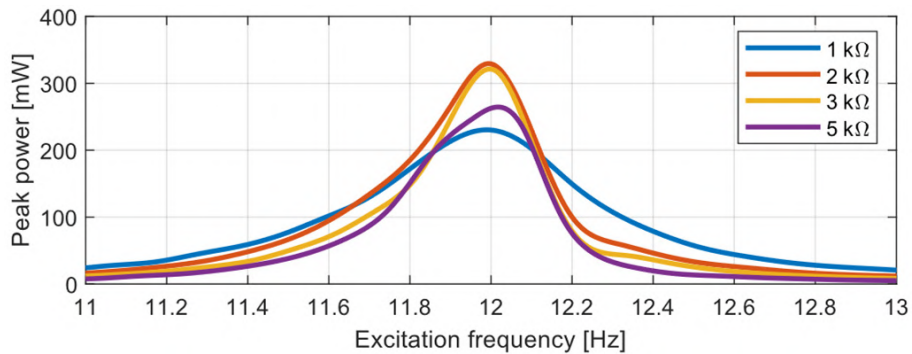
Tabuľka 4.1: Dostupné parametre prekladaného prototypu od Z. Hadaša o kolektívu [17]

Pre demonštrovanie možného generovaného výkonu otestovali vyrobený koncept v laboratórnych podmienkach. V prvom rade išlo o porovnanie výsledkov medzi matematickým modelom a experimentálnymi dátami pri budení v rezonančnej frekvencii s amplitúdou akcelerácie  $1 \text{ ms}^{-2}$ . Týmto zistili, že rozdiel hodnôt špičkového napätia a výkonu medzi modelom a experimentom je značne malý, a prekladaný mikro zberač vykazuje najlepšie hodnoty maximálneho výkonu pri odporovej záťaži  $3 \text{ k}\Omega$ . Ako popisuje Hadaš s kolektívom, je pre charakterizáciu takéhoto generátoru veľmi podstatná frekvenčná odozva. Preto sa rozhodli vykonať vibračný test s amplitúdou akcelerácie  $1 \text{ ms}^{-2}$  a mierou zmeny frekvencie  $0.1 \text{ Hz/s}$  [17].

#### 4 SÚČASNE DOSTUPNÉ MIKRO ZBERAČE PRE ŽELEZNIČNÚ DOPRAVU

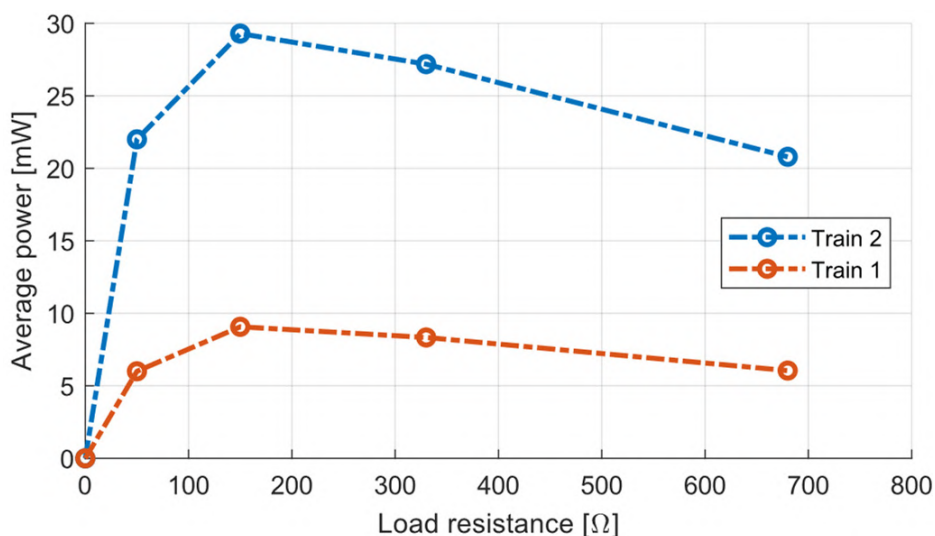


Obr. 4.8: Graf závislosti špičkového napätia na frekvencii (Prebrané z [17])



Obr. 4.9: Graf závislosti špičkového výkonu na frekvencii (Prebrané z [17])

V poslednom rade demonštrujú výkonnosť tohto mikro zberaču na reálnych nameraných dátach zo železničnej trate. Vibrácie, ktoré sa vyskytujú na trati nemajú sínusový charakter, ale sú to skôr jednotlivé mechanické impulzy. Ich cieľom bolo nájsť optimálnu odporovú záťaž pre namerané dáta z trate v Českej Republike tak, aby dosiahli maximálny možný výkon pre danú lokalizáciu. Získali dáta z dvoch rozdielnych vlakov a to pre Train 1 ktorý reprezentuje vlak pohybujúci sa rýchlosťou 80 km/h a Train 2 ktorý predstavuje rýchlik jazdiaci rýchlosťou 130 km/h. Pre namerané dáta boli schopný získať výstupný výkon, a výsledky vykreslili do grafu na nasledujúcom obrázku [17].



Obr. 4.10: Výstupný výkon pre reálne namerané dáta (Prebrané z [17])

Z uvedeného grafu na obrázku 4.10 je možné vidieť, že pri optimálnej záťaži  $150 \Omega$ , ktorá je zhodná aj s odporom cievky, dosahujú pre Train 1 priemerný výkon 9.1 mW, a pre Train 2 až 29.3 mW. Uvádzajú, že počas testu bolo možné pozorovať špičkové hodnoty výkonu okolo 300 mW pre Train 1 a niekoľko špičiek nad 600 mW pre Train 2 [17]. Sú to hodnoty, ktoré by boli postačujúce pre napájanie menších senzorov alebo dokonca aj bluetooth vysielачu [3]. Týmto návrhom sa snažili eliminovať využitie zložitejších komponentov, čo by bolo naozaj kontraproduktívne so zadanými cieľmi. Vyvinuli mikro zberač, ktorý má predpoklad na bezúdržbovosť a udržateľnosť v prostredí železníc. Tento koncept má veľký potenciál na implementovanie do už existujúcich vlakových tratí.

### 4.3 Zhodnotenie publikovaných mikro zberačov pre železničné trate

V nasledujúcej tabuľke 4.2 sú zhrnuté parametre jednotlivých EH, ktoré sú dostupné v príslušných publikáciách. Bohužiaľ, nie vždy je možné dohľadať všetky podstatné parametre. Ako už bolo popisované, mikro zberače, ktoré využívajú konštrukčné prvky ako ozubnice s pastorkom alebo samotné ozubené kolesá sa javia ako vhodné na transformovanie vibrácií na elektrickú energiu. V neprospech takýchto riešení hraje náročnosť konštrukcie jak z ekonomického hľadiska tak aj z hľadiska vyrobiteľnosti. Naopak jednoduchý typ mikro zberaču, ktorý je popísaný v podkapitole 4.2.2 sa ukazuje ako nenáročný a postačujúci návrh pre železničné aplikácie.

Kolektív:	Yu Pan	Mingyuan Gao	John Wang	Zdeněk Hadaš
Typ EH	DC gen.	elektromagnetický	so zotrvačníkom	kinetický
Umiestnenie	päta koľajnice	stojka koľajnice	medzi pražce	na pražce
Rozmery [mm]	200 (výška)	100x70x60	-	600x190x90
Frekvencia [Hz]	-	6	0.5/1	12
Počet závitov [-]	bez	3000	bez	300
Odpor cievky [ $\Omega$ ]	-	44.6	-	150
Výkon [mW]	2240	119*	1400	600*/29.3**

\* špičkový výkon / \*\* priemerný výkon

Tabuľka 4.2: Prehľad dostupných parametrov predstavených mikro zberačov pre železničnú trať

Účelom celej kapitoly 4 nie je len ukázať prierez možných návrhov a riešení, ale aj ponúknuť inšpiráciu pre autora tejto práce pri návrhu nového vibračného elektromagnetického mikro zberaču. Po veľmi stručnom zhodnotení výsledkov aktuálne už publikovaných návrhov je možné sa posunúť ďalej.

# 5 Matematický model a východiskové riešenie mikro zberaču

Navrhnuť vibračný mikro zberač pre železničnú trať je značne náročná úloha z hľadiska správneho nastavenia parametrov. Po logickom zamyslení je potrebné zdôrazniť fakt, že takmer každý vlak, respektíve prejazd vlaku, produkuje iné vibrácie. Je to najmä kvôli rozličným váham vlakov a jednotlivých vozňov. Rozhodne je značný rozdiel medzi osobným a nákladným vlakom, medzi rušňom a vozňom. Ďalším ovplyvňujúcim faktorom vibrácií je rýchlosť vlakov, počet vozňov, rozchod náprav a pod. Taktiež netreba zabudnúť na rozličnosť podloží koľajníc, ktoré značnou mierou ovplyvňujú vstupné vibrácie pre navrhovaný mikro zberač. V podstate by bolo možné každý jeden prechádzajúci vlak daným úsekom analyzovať osobitne a napísať niekoľko stranovú prácu.

## 5.1 Vzťahy pre vytvorenie matematického modelu

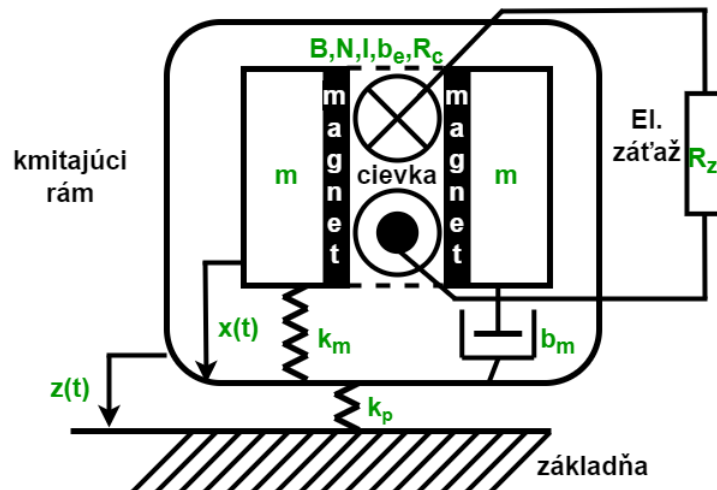
Navrhnuť vhodné parametre je veľmi komplexná úloha a viaceré čiastočné kroky musia byť robené zároveň. Vzhľadom k tomu, že zmenou jedného parametru sa menia aj iné, bolo potrebné vymyslieť spôsob analyzovania zmeny parametrov a následného spracovania výsledkov. Najvhodnejším nástrojom pre účely tejto diplomovej práce je vytvoriť matematický model a následne použiť program Matlab a Simulink pre potrebné výpočty. Cieľom matematického modelu je jednoduchá zmena parametrov a následne pozorovanie výstupných veličín z mikro zberaču.

Matematický model elektromagnetického vibračného mikro zberaču je najjednoduchšie popísať diferenciálnou rovnicou druhého rádu [18]:

$$m\ddot{x} + (b_m + b_e)\dot{x} + (k_m + k_p)x = m\ddot{z} \quad (5.1)$$

Pre lepšiu predstavu je možné nižšie na obrázku 5.1 vidieť schematicky náčrt elektromagnetického vibračného mikro zberaču. Z vyššie uvedenej rovnice predstavujú jednotlivé veličiny tieto parametre -  $m$  je kmitajúca hmota,  $b_m$  predstavuje mechanické tlmenie a  $b_e$  zas to elektrické. Tuhosti opäť vystupujú dve a to  $k_m$ , ktorá reprezentuje tuhosť magnetov a  $k_p$  je tuhosť planžety ktorej úlohou je vytvoriť flexibilnú väzbu. V posledom rade v rovnici ešte vystupujú dva dôležité členy a to  $x$ , ktorý reprezentuje súradnicu kmitajúcej hmoty voči rámu a potom  $z$  ako súradnica, ktorá vyjadruje absolútnu výchylku.

Zvyšné parametre, ktoré nie sú uvedené v rovnici, ale v náčrte áno, tak reprezentujú nasledujúce veličiny;  $B$  uvádza priemernú hodnotu magnetickej indukcie,  $N$  je počet závitov cievky,  $l$  je aktívna dĺžka vodiča jedného závit. Poslednými parametrami sú odpory a to konkrétne  $R_c$  ktorý reprezentuje odpor cievky a  $R_z$  je odporová záťaž na výstupe.



Obr. 5.1: Schéma elektromagnetického vibračného mikro zberaču

Čo sa týka tuhostí, tak pre planžetu  $k_p$ , je daná presne podľa charakteristiky použitej planžety. Naopak  $k_m$ , ktorá odpovedá magnetickej tuhosti, je snahou určiť tak, aby odpovedala požadovanej vlastnej frekvencii mikro zberaču podľa vzťahu 5.3 [18].

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_p + k_m}{m}} \quad (5.2)$$

$$k_m = (f \cdot 2\pi)^2 \cdot m - k_p \quad (5.3)$$

Ďalej je vhodné spomenúť faktor kvality  $Q$ , ktorý je možné určiť pomocou vzťahu 5.4, kde  $\xi$  udáva pomerný útlm [19]

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \xi} \quad (5.4)$$

A zároveň taktiež platí vzťah, ktorý popisuje závislosť faktoru kvality na kmitajúcej hmotnosti, vlastnej frekvencii a mechanickom tlmení [19].

$$Q = \frac{m \cdot \Omega}{b_m} \quad (5.5)$$

Z predošlého vzťahu potom úplne jasne vyplýva, že mechanické tlmenie  $b_m$  je možné určiť v závislosti na vlastnej frekvencii a faktore kvality ako

$$b_m = \frac{m \cdot f \cdot 2\pi}{Q} \quad (5.6)$$

## 5 MATEMATICKÝ MODEL A VÝCHODISKOVÉ RIEŠENIE MIKRO ZBERAČU

Okrem mechanických parametrov je teraz na mieste uviesť aj elektrické parametre. Elektrická rovnica pre vibračný mikro zberač je popísaná nasledovným vzťahom [19]

$$L_c \frac{di}{dt} + (R_c + R_z)i = B \cdot N \cdot l \cdot \dot{x}, \quad (5.7)$$

kde pravá časť rovnice reprezentuje indukované napätie, ktoré už bolo popísané v kapitole 3.2.2 a to konkrétne rovnicou 3.6

$$U_i = B \cdot N \cdot l \cdot v \quad (5.8)$$

Indukčnosť cievky býva zväčša veľmi malá, a preto sa v drvivej väčšine modelov považuje za nulovú. V tomto prípade by indukčnosť vychádzala v radoch  $\mu H$ , takže aj teraz je možné považovať indukčnosť za nulovú.

Následne, ak je ku cievke pripojená odporová záťaž, ako to je naznačené na schéme z obrázku 5.1 a indukčnosť je teda považovaná za nulovú, tak potom prúd tečúci elektrickým obvodom je možné vyjadriť ako

$$I = \frac{U_i}{R_c + R_z} \quad (5.9)$$

Lorentzová sila, ktorá popisuje pôsobenie sily na vodič pohybujúci sa v magnetickom poli je vyjadrená vzťahom [20]

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (5.10)$$

Rýchlosť  $v$  je možné určiť ako podiel dráhy  $l$  ktorú náboj  $q$  prejde za čas  $t$ , čiže  $v = \frac{l}{t}$ , a prúd je vyjadrený celkovým nábojom  $q$  ktorý prejde daným miestom za čas  $t$ , čiže  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ . Za predpokladu že vodič je vedený kolmo na magnetické indukčné čiary tak vzťah 5.10 je možné upraviť a použiť tento vzťah v nasledovnom tvare [20]

$$F = B \cdot N \cdot l \cdot I \quad (5.11)$$

Jednoduchým dosadením 5.8 do 5.9 a následne do 5.11 je možné vyjadriť elektrické tlmenie takto

$$b_e = \frac{(B \cdot N \cdot l)^2}{R_c + R_z} \quad (5.12)$$

Pre výstupný elektrický výkon s uvažovaním napätového deliču potom platí známi vzťah ktorý je možné jemne upraviť a tak získať okamžitý výstupný výkon z mikro zberaču

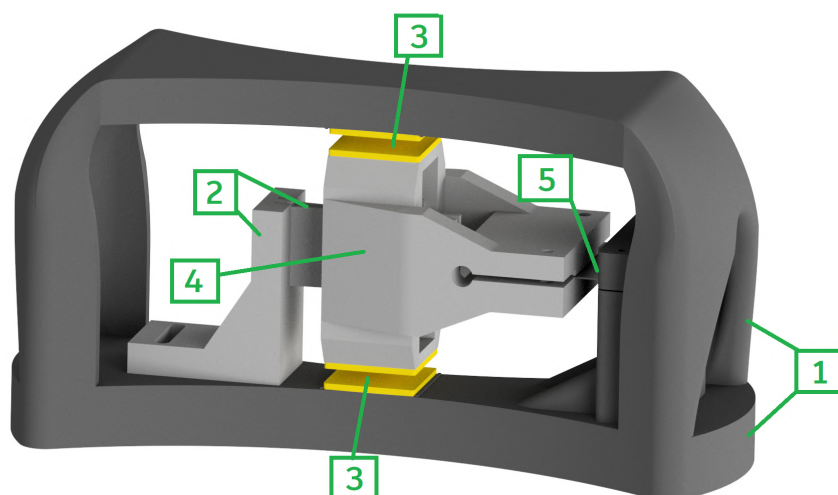
$$P_{\text{výstupný}} = U_i \cdot i = (B \cdot N \cdot l \cdot \dot{x})^2 \cdot \frac{R_z}{(R_z + R_c)^2} \quad (5.13)$$

S vyjadrenými vzťahmi bolo ďalším krokom vytvoriť výpočtový model v prostredí Matlab a Simulink. Pomocou tohto modelu boli následne tvorené analýzy a optimalizované jednotlivé parametre s cieľom získať, pokiaľ možno, čo najväčší výstupný výkon.

## 5.2 Vibračný mikro zberač s planžetovým uložením

Vzhľadom k spomenutým okolnostiam v úvode tejto kapitoly sa javilo ako vhodné obhliadnuť za návrhom z bakalárskej práce. V rámci vlastnej bakalárskej práce bol vytvorený návrh elektromagnetického vibračného zberaču s planžetovým uložením. Práve spomenuté planžetové uloženie sa ukázalo ako veľmi inovačný prvok oproti klasickým rotačným väzbám. 3D model tohto návrhu je možné vidieť na obrázku 5.2. Medzi konštrukčné elementy zmieneného návrhu patria:

1. Základňa
2. Cievka s držiakom
3. Magnetická pružina vytvárajúca tuhosť systému
4. Kmitajúca hmota s magnetickým obvodom
5. Planžetové uloženie



Obr. 5.2: Konštrukčný návrh vibračného generátoru s planžetovým uložením [21]

Celý návrh bol tvorený s cieľom využiť planžetové uloženie. Konštrukčný návrh sám o sebe spĺňal požadované parametre, ale problém nastal pri simulovaní dynamiky systému. Bohužiaľ bol celý návrh založený na výpočtovom modeli v Ansyse, ktorý sa neskôr ukázal ako nie dostatočne korektný. Táto nedokonalosť bola odhalená pri experimentálnom meraní charakteristík vibračného energy harvestru. Poučením z tejto chyby bolo vytvoriť tentokrát vhodnejší matematický model. Vyrobený a otestovaný mikro zberač z bakalárskej práce mal nasledovné parametre:

Parameter	Označenie	Hodnota
Celková hmotnosť	$m_{celková}$	550 g
Kmitajúca hmota	$m_{kmitajúca}$	170 g
Rezonančná frekvencia	$\Omega$	17 Hz
Faktor kvality	$Q_M$	250
Rozmery cievky	-	20x6x3 mm <sup>3</sup>
Teoretický počet závitov	$N$	1800
Odpor cievky	$R_C$	180 $\Omega$
FeNdB, rozmery magnetického obvodu	-	Dva páry, 30x20x5 mm <sup>3</sup>
Vzduchová medzera	-	5 mm
Priemerná hustota magnetického toku	$B$	0.45 T
Pomerný útlm	$\xi$	0.002
Generovaný výkon na 100g kmitajúcej hmoty	$P_{100}$	29.1 mW

Tabuľka 5.1: Dostupné parametre vibračného mikro zberaču s planžetovým uložením [21]

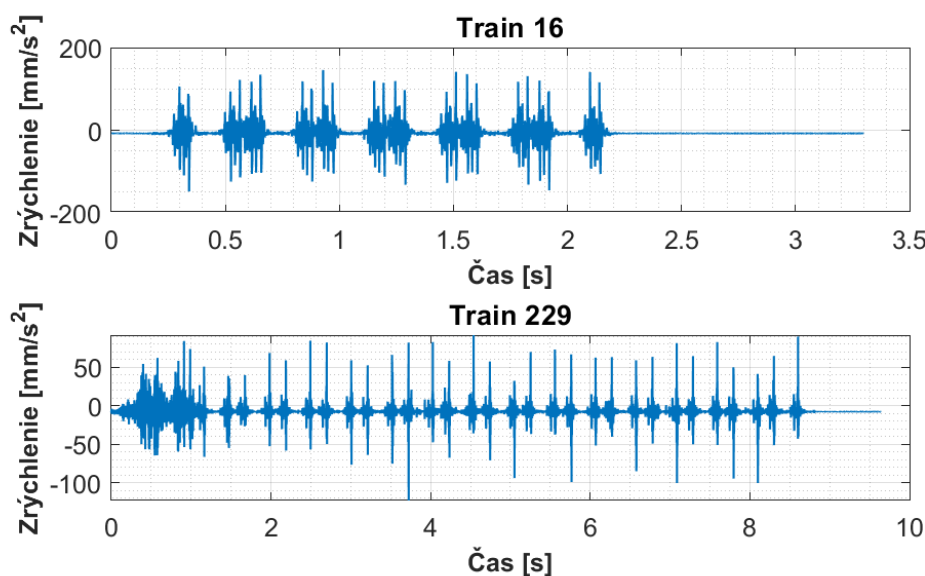
Množstvo vibračných mikro zberačov využíva istým spôsobom rotačnú väzbu, ale jej realizácia môže byť občas veľmi zložitá. V uvedenom návrhu z bakalárskej práce bola využitá planžeta ktorá je tenká, ale zároveň široká. Tenká planžeta o hrúbke 0.5 mm bola zvolená z dôvodu zavedenie čo najnižšieho mechanického tlmenia do systému. Šírka 30 mm bola vyberaná tak, aby sa zamedzilo nežiadúcim torzným kmitom [21]. U tohto návrhu sa ukázalo, že planžeta môže byť vhodným prvkom realizácie flexibilnej väzby namiesto klasickej rotačnej väzby.

Hlavným zámerom obhliadnutia sa za návrhom z bakalárskej práce, je využitie myšlienky realizácie flexibilnej väzby. Druhotným úmyslom je zúročiť parametre tohto elektromagnetického vibračného mikro zberaču s planžetovým uložením k vytvoreniu vhodného matematického výpočtového modelu. Ako už bolo spomenuté v úvode tejto kapitoly, naladiť optimálne parametre pre mikro zberač s využitím na železničnej trati môže byť značnou výzvou. Preto je vhodné mať určitý odhad jednotlivých parametrov mikro zberaču pre prvotné analýzy. Lepšie, než si vymýšľať hodnoty z hlavy, je využiť už existujúci prípad a za jeho pomoci navrhnuť a optimalizovať čo najvhodnejší mikro zberač.

## 6 Analýza vplyvu parametrov na chovanie mikro zberaču

Fundamentálnym zdrojom pre správne ladenie a analyzovanie správania vibračného mikro zberaču sú namerané dáta z požadovanej lokality. V tomto prípade sa jedna celkovo o 617 nameraných prejazdov zo železnice na britských ostrovoch. Reprezentatívnu dvojicu vstupných dat, čiže zrýchlení koľajnice pri prejazde vlaku, je možné vidieť na grafoch na obrázku 6.1.

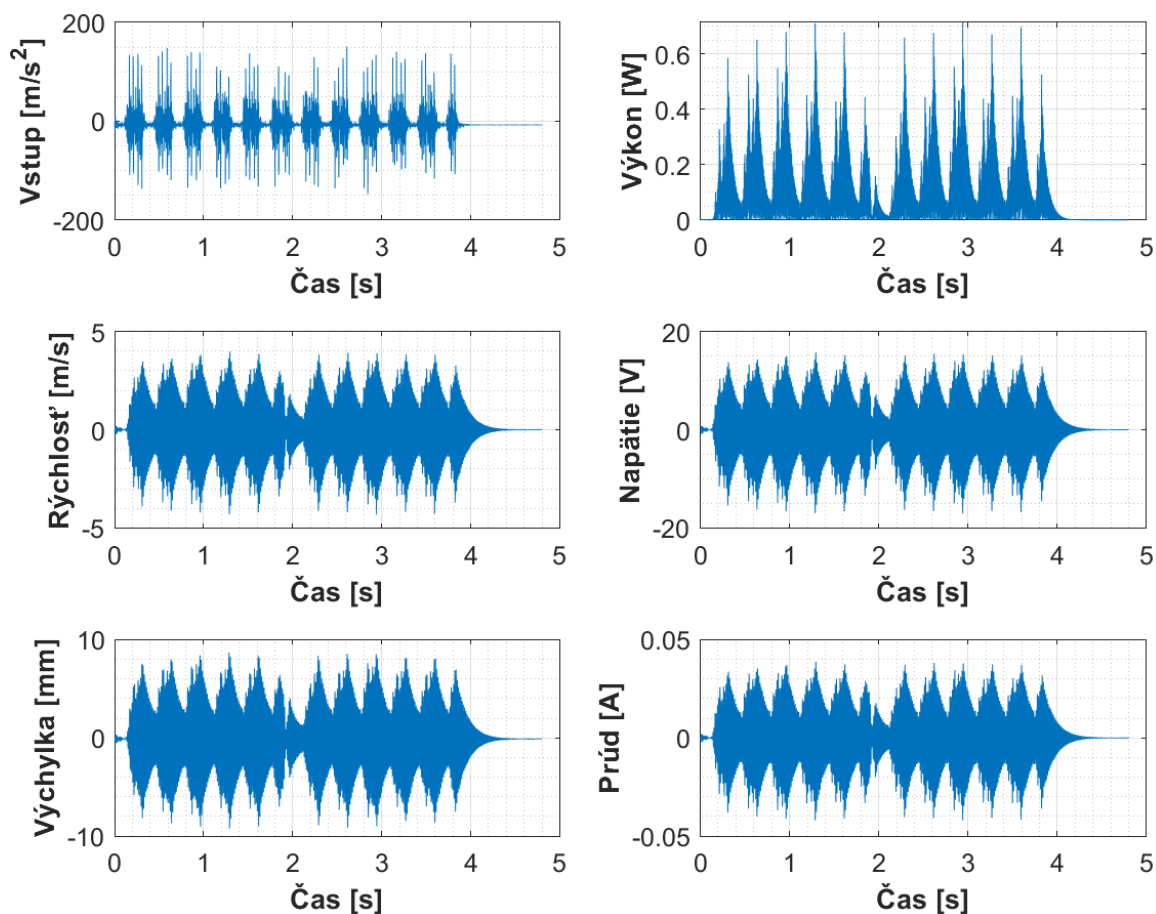
Bližšie informácie o parametroch vlakov akými sú dĺžka, rýchlosť, váha a pod., neboli zverejnené. Preto bolo rozhodnuté pristupovať ku nameraným dátam ako ku súboru 617 rozličných záznamov vstupných zrýchlení, ktoré sa vyskytujú počas bežnej prevádzky na danej trati. Tieto záznamy boli pomenované ako Train 1 až Train 617. Na zmienenom obrázku 6.1 je možné vidieť, že sa namerané dáta z prejazdov nelíšia len v časovej dĺžke, ale aj v amplitúdach zrýchlení. S vysokou pravdepodobnosťou je pre Train 229 zaznamenaný celý vlak, kde na začiatku bude pravdepodobne lokomotíva a dvojice amplitúd zrýchlení v závese predstavujú jednotlivé nápravy vozňov. Každopádne ide len o domnienky, ale pre účel tejto záverečnej práce nie je úplne podstatné o aký typ vlaku sa jedná. Podstatné sú hodnoty zrýchlení, ktoré spôsobia vibrácie.



Obr. 6.1: Namerané vstupné hodnoty zrýchlení niekoľkých vlakov

## 6.1 Analýza výstupných hodnôt

V prvotnej fáze bolo vybraných pár náhodných nameraných dat, pomocou ktorých bolo sledované chovanie mikro zberaču. Priebehy výstupných hodnôt z mikro zberaču pri prejazde jedného ukázkového vlaku je možné vidieť na grafoch v priloženom obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Chovanie mikro zberaču pri prejazde Train 204

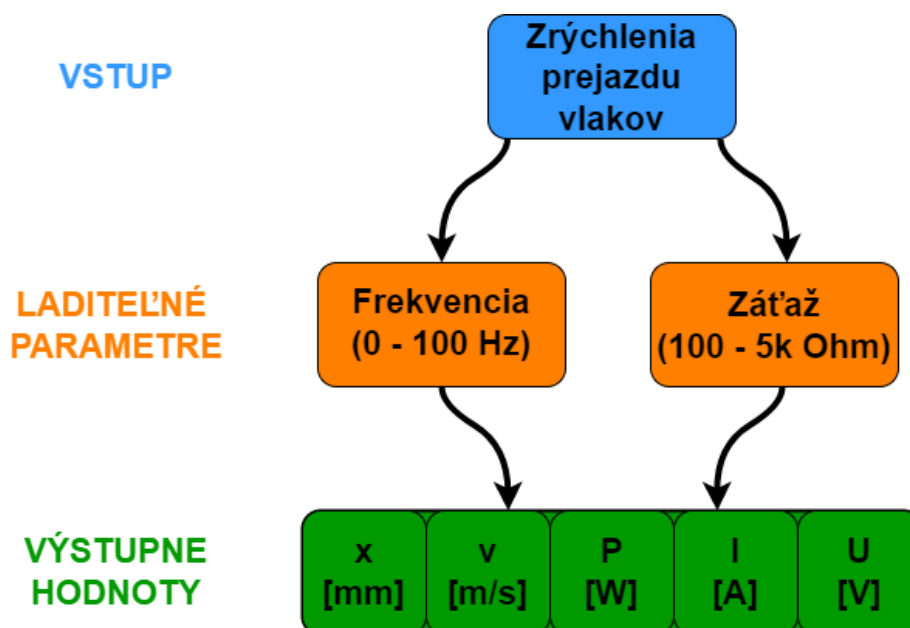
Grafy vykresľujú časové priebehy výstupných vypočítaných parametrov pomocou matematického modelu v nasledovnom poradí:

- vstupné zrýchlenie koľajnice pri prejazde vlaku
- výstupný výkon
- rýchlosť pohybu koncového bodu mikro zberaču
- výstupné napätie na záťaži
- výchylku kmitania koncového bodu mikro zberaču
- výstupný prúd

## 6 ANALÝZA VPLYVU PARAMETROV NA CHOVANIE MIKRO ZBERAČU

Z obrázku 6.2 je vidieť, že časové priebehy obsahujú množstvo hodnôt. Avšak uvedené hodnoty sú výstupnými len pre jednu naladenú frekvenciu a odporovú záťaž. Cieľom bolo ale preskúmať široké pásmo frekvencie a odporovej záťaže. To viedlo k extrémnemu počtu iterácií výpočtov, z čoho vyplývalo, že ručné prehľadávanie alebo vypisovanie indexov maximálnych hodnôt pre dané parametre neprichádzalo vôbec v úvahu. Taktiež ladenie pre pár vlakov nemá zmysel, keďže mikro zberač má byť osadený na koľajnicu kde jazdia všetky namerané vlaky, a nie len niektoré.

Pre ladenie parametrov bolo potrebné vytvoriť akúsi usporiadanú sekvenciu výpočtov a následne analyzovať výstupy čo najlepšie pre neskoršie vytvorenie grafov. Myšlienkový postup je zobrazený na obrázku 6.3.

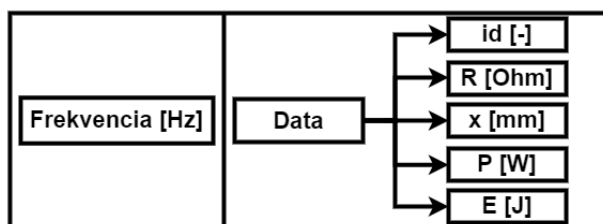


Obr. 6.3: Myšlienková mapa analyzovania vhodných parametrov

Ako už bolo vyššie uvedené, vstupom pre analýzy bolo 617 nameraných zrýchlení koľajnice počas prejazdu rôznych vlakov. Cieľom je samozrejme ladiť parametre tak, aby bolo možné získať čo najvyšší výstupný výkon. Preto bolo rozhodnuté, že sa bude ladiť vlastná frekvencia a odporová záťaž na výstupe. V tabuľke 3.2 bolo popísané, že elektromagnetický princíp premeny energie je výhodný pre frekvencie do 100 Hz. S týmto poznatkom bol vytvorený lineárne rozmiestnený vektor frekvencie od 10 Hz do 100 Hz s krokom 0.5 Hz. V prvej fázy analýz bol pre parameter odporovej záťaže vytvorený logaritmicky rozmiestnený vektor od 10  $\Omega$  do 20000  $\Omega$  celkovo pozostávajúci zo 40 hodnôt. To sa však časom ukázalo ako zbytočné, a preto bol vytvorený kratší logaritmický rozmiestnený vektor od 100  $\Omega$  do 5000  $\Omega$  s 15 hodnotami.

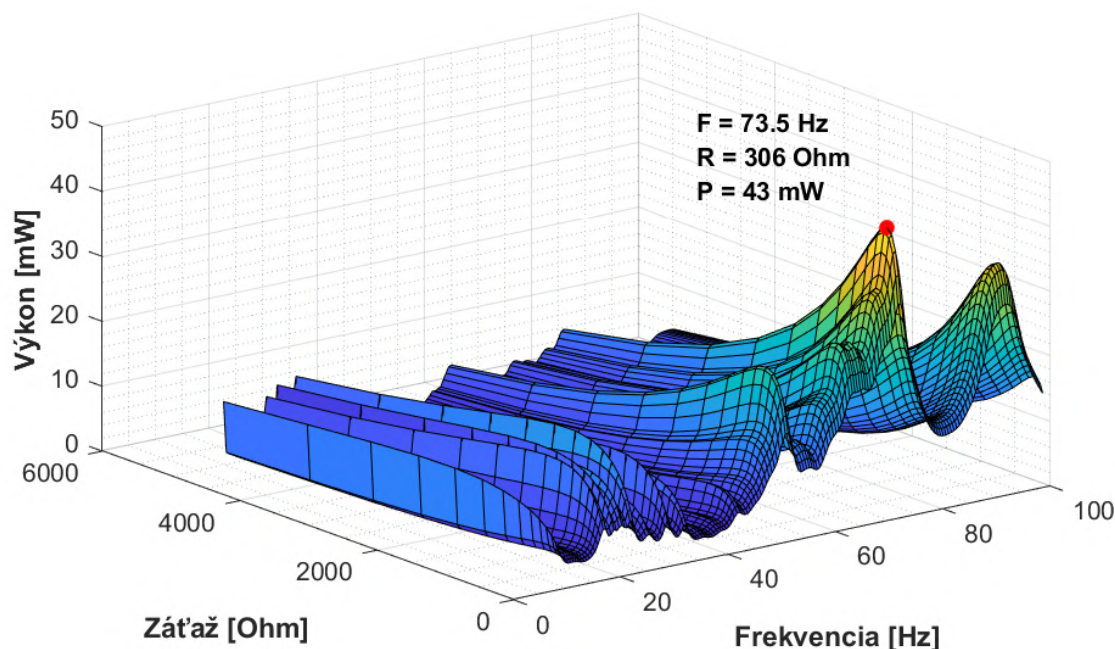
## 6.2 Široké pásmo parametrov a ich ladenie

Hlavný simulačný skript bol vytvorený tak, že pre každú frekvenciu sa simuloval prejazd každého vlaku s každou odporovou záťažou. To znamená, že výpočtový model mal extrémne množstvo iterácií na vypočítanie. Preto boli ukladané len podstatné dáta do veľkej štruktúry a to ID vlaku, hodnota odporovej záťaže, výchylka, priemerný výkon a energie pre danú iteráciu.



Obr. 6.4: Štruktúra ukladania parametrov

Vzhľadom k vyššie uvedeným faktom sa najvhodnejším spôsobom, ako reprezentovať výsledky a následne ladiť parametre, javí 3D graf. Následne bol preto zvolený 3D plošný graf, kde na osu x je vynesená frekvencia, na osu y odporová záťaž a osa z udáva priemerný výstupný výkon.

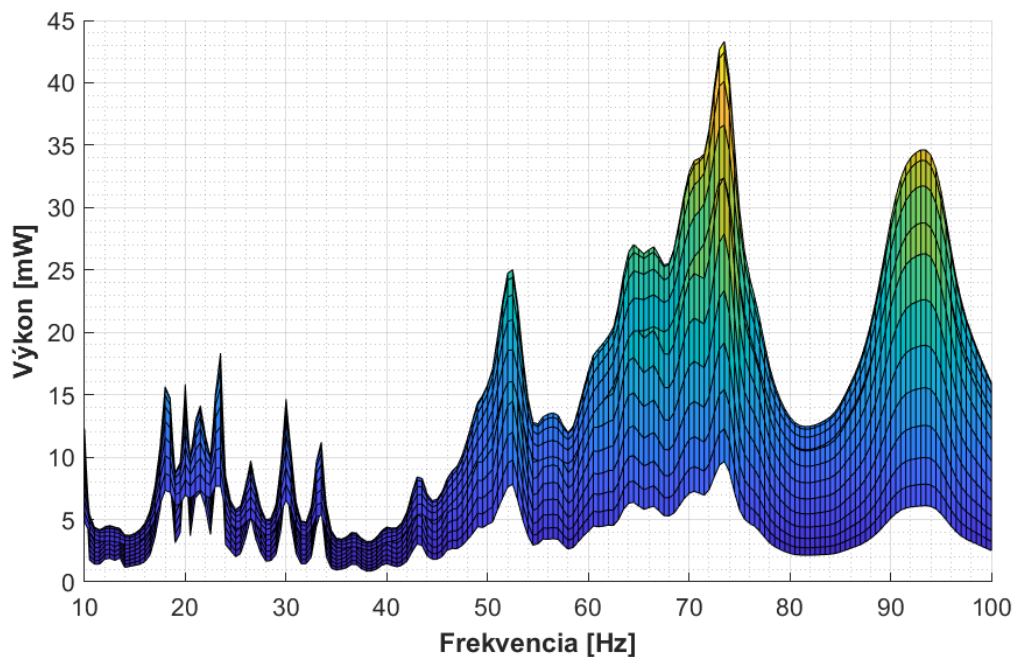


Obr. 6.5: Plošný graf výstupného výkonu

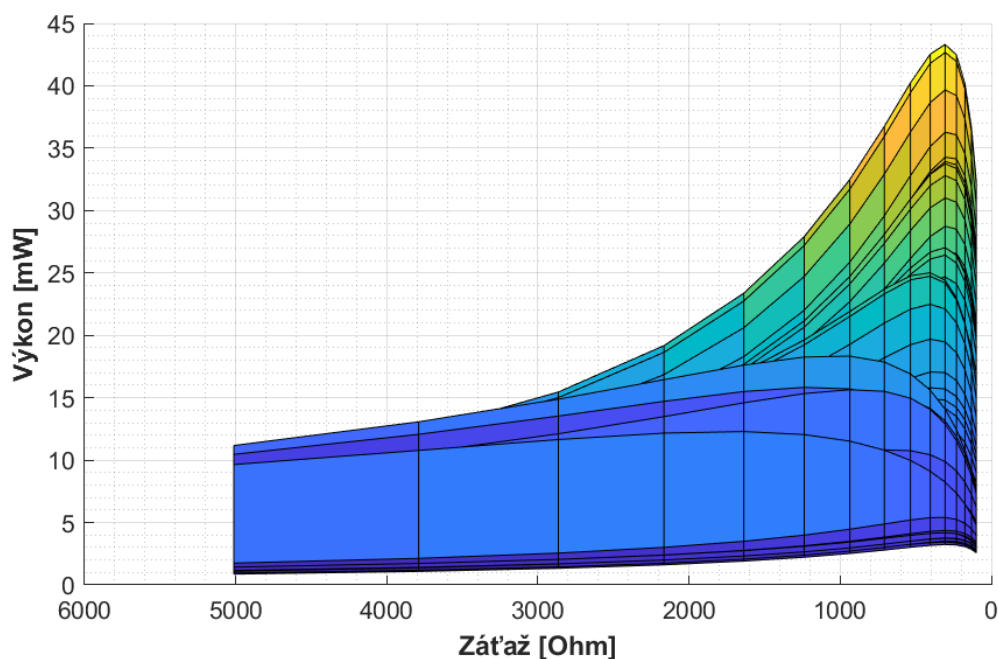
Skript, ktorý spracováva dáta a vytvára uvedený plošný graf funguje na princípe troj úrovňového for cyklu. Prvá úroveň udáva index pre vektor frekvencie, druhá index záťaže a tretia index vlaku. V danej iterácii je vždy vytiahnutý zo štruktúry priemerný výkon

## 6 ANALÝZA VPLYVU PARAMETROV NA CHOVANIE MIKRO ZBERAČU

pre aktuálnu frekvenciu, záťaž a vlak. Výsledkom vnútorného cyklu je za každým vektor celkovo pozostávajúci zo 617 hodnôt priemerných výstupných výkonov, kde každá hodnota reprezentuje jeden priemerný výstupný výkon pri prejazde daného vlaku. Z tohto celého vektoru je následne uložená priemerná hodnota, cez všetky vlaky, do matice výkonov o rozmere dĺžka vektoru(R) x dĺžka vektoru(F), čiže celková veľkosť matice priemerných výkonov je 15x181. Získaná matica hodnôt je následne vykreslená do grafu, viď obrázok 6.5.



Obr. 6.6: Plošný graf výstupného výkonu; Výkonovo frekvenčná charakteristika

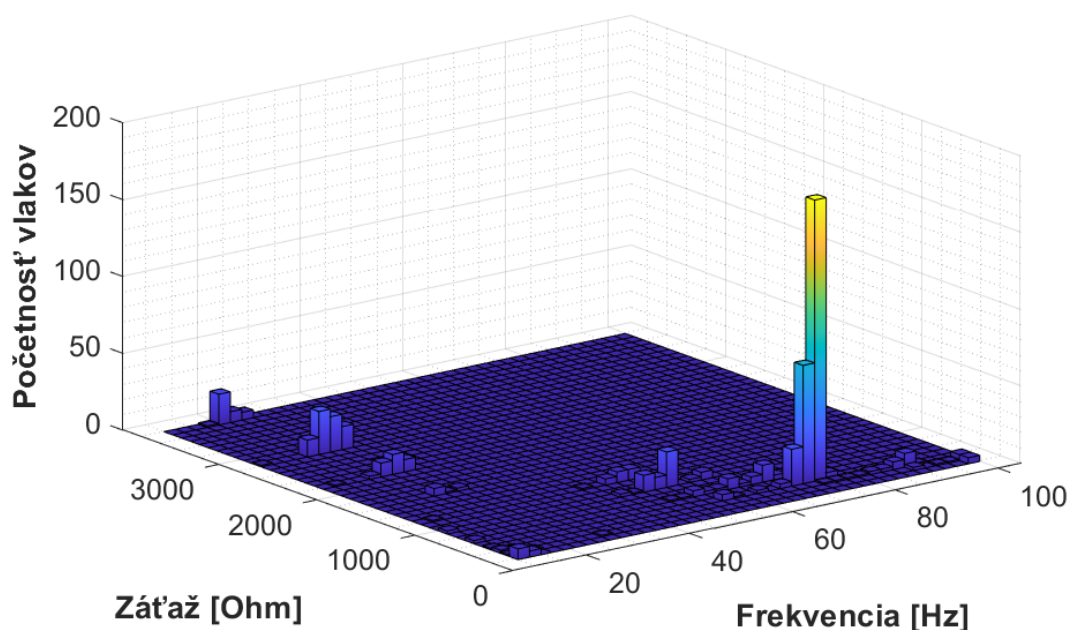


Obr. 6.7: Plošný graf výstupného výkonu; Výkonovo záťažová charakteristika

## 6 ANALÝZA VPLYVU PARAMETROV NA CHOVANIE MIKRO ZBERAČU

Grafy na obrázkoch 6.6 a 6.7 ukazujú detailnejší pohľad na 3D plošný graf. Na grafe z obrázku 6.5 je zvýraznený bod najvyššieho priemerného výkonu pre všetky vlaky. Z detailnejšieho pohľadu na obrázku 6.6 je zreteľné, že vhodné využiteľné pásmo je v rozmedzí zhruba 65 až 75 Hz. Čo sa týka odporovej záťaže z obrázku 6.7 je vidieť, že vhodné pásmo je v rozmedzí zhruba 150 až približne 1200 Ohmov. Pre väčšiu odporovú záťaž, než je uvedené pásmo, sa výkon rýchlo znižuje a pre nižšie hodnoty odporovej záťaže klesá priemerný výkon veľmi rapídne.

Pre overenie dosiahnutých výsledkov bol ešte vytvorený 3D histogram. Na osu x je vynesena frekvencia, na osu y záťaž a na osu z bola tento krát vynesena početnosť vlakov. Početnosť vlakov popisuje, koľko vlakov dosahuje pre naladené parametre frekvencie a odporu svoj maximálny možný priemerný výkon. Samozrejme by nemalo zmysel ladiť parametre, pri ktorých len zopár vlakov vybudí mikro zberač do takého stavu, aby vytváral čo najväčší možný výkon. Z grafu na obrázku 6.8 je viditeľné, že takmer tretina prechádzajúcich vlakov vybudí mikro zberač vo vhodnom pásme frekvencie a odporu tak, aby dával čo najväčší možný výkon.



Obr. 6.8: Početnosť vlakov pre maximálny priemerný výkon

### 6.3 Zhodnotenie analyzovania parametrov

Z uvedených grafov je úplne zreteľné, že mikro zberač je teoreticky schopný podávať vhodný výstupný výkon. Podľa teoretických výpočtov pre namerané dáta by mal mikro zberač dávať najväčší výkon pri naladení vlastnej frekvencie 73.5 Hz a za použitia odporovej záťaže približne  $400\Omega$ . Taktiež bolo ukázané, že pásmo vhodnej frekvencie je vcelku široké, a preto je vhodné mať tento fakt na pamäti pri konštrukčnom návrhu.

# 7 Návrh tuhosti a konštrukčný model elektromagnetického vibračného mikro zberaču

Matematickým modelom boli postupne ladené mechanické a elektrické parametre mikro zberaču. Predošlá kapitola pojednávala vhodné pracovné pásmo mikro zberaču a taktiež bod maximálneho výstupného výkonu. Pre dosiahnutie tohto pracovného pásma je potrebné venovať veľkú pozornosť ladeniu tuhosti systému, ktorá je kľúčovým parametrom vibračného mikro zberaču.

Keďže tuhosť môže byť realizovaná viacerými spôsobmi, tak s ňou taktiež súvisí konštrukčný návrh mikro zberaču. Vzhľadom k uvedeným súvislostiam je vhodné najprv vyriešiť realizáciu tuhosti a následne navrhnuť jednoduchý konštrukčný model tak, aby boli dosiahnuté všetky určené parametre.

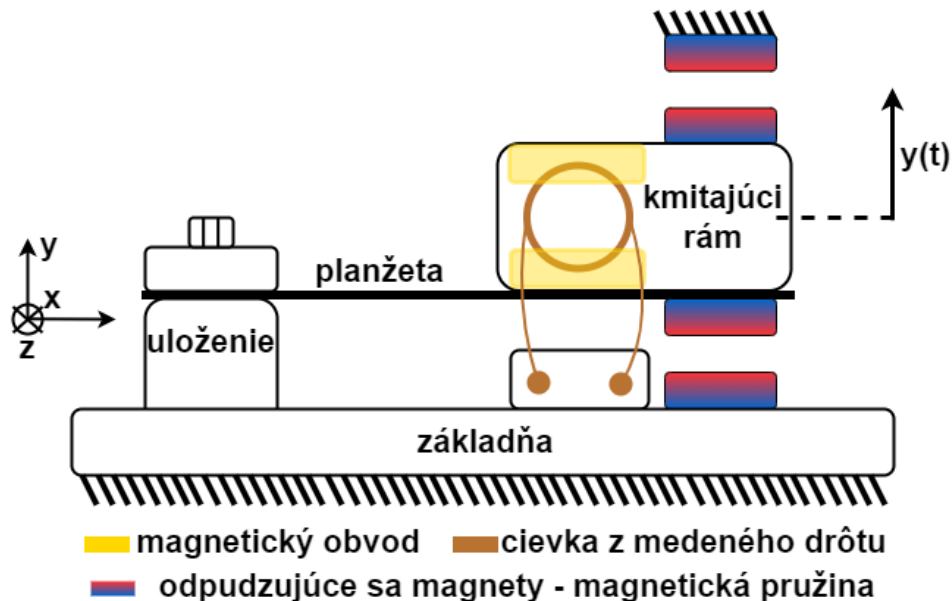
## 7.1 Realizácia tuhosti systému za účelom dosiahnutia optimálnej vlastnej frekvencie

Ako je už spomenuté vyššie, tuhosť systému je veľmi dôležitý parameter ktorého ladením je možné značne ovplyvniť výstupné parametre mikro zberaču. V kapitole 5.2 bol ukázaný návrh z bakalárskej práce, ktorý využíva tuhosť systému najmä skrz magnetickú pružinu a z malej časti aj skrz tenkú planžetu. Faktom je, že tuhosť planžety bola len zlomková oproti tej magnetickej. Tým pádom, najväčší vplyv na tuhosť systému mala magnetická pružina. Preto bolo prvotnou myšlienkou vytvoriť tuhosť systému práve pomocou odpudzujúcich sa magnetov.

### 7.1.1 Realizácia tuhosti systému pomocou magnetickej pružiny

Vytvoriť magnetickú pružinu nie je zložité. Princípom je vhodne osadiť magnety na kmitajúci rám a ďalšie magnety na pevnú základňu. Magnety musia byť voči sebe osadené súhlasnými pólmi, čiže aby sa navzájom odpuzovali. Ďalšími časťami mikro zberaču sú staticky upevnená cievka vinutá z medeného drôtu a vo vnútri kmitajúceho rámu magnety pre magnetický obvod. Náčrt takéhoto mikro zberaču je možné vidieť na obrázku 7.1.

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.1: Náčrt realizácie magnetickej tuhosti

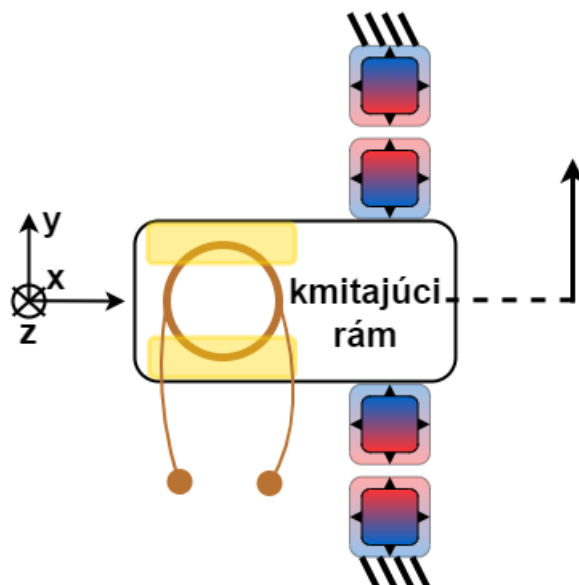
V dizertačnej práci O. Rubeša sú zaznamenané veľmi zaujímavé a hlavné dôležité poznatky, ktoré do značnej miery ovplyvnili ďalšie návrhy tejto diplomovej práce. Zásadná myšlienka, ktorú diskutuje a analyzuje je, aké rozmery by mali mať magnety a či by tieto rozmery mali byť zhodné alebo rozličné.

V práci reprezentuje niekoľko grafov závislosti sily na veľkosti prierezu magnetov. Popisuje, že rozdielne rozmery pohybujúcich a statických magnetov vykazujú nie úplne vhodné správanie. V niektorých prípadoch môže toto správanie vykazovať zmenu znamienka sily, čiže prípad kedy by sa kmitajúci rám vychýlil do krajnej polohy a ostal v nej pritiahnutý magneticou silou [19].

Taktiež poukazuje na to, že pri zmene šírky magnetov dochádza ku saturácii sily. Prakticky to znamená, že extrémne široké magnety nebudú vykazovať extrémne väčšiu silu. To isté platí aj pre samotné zväčšovanie výšky magnetov. Z jeho výsledkov je zreteľné, že najvýhodnejšie je meniť rozmery všetkých magnetov súčasne a ponechať štvorcový prierez. Názorný náčrt takejto zmeny je možné vidieť na obrázku 7.2. Pri takejto zmene magnetov platí, že použitie väčšieho štvorcového prierezu magnetu znamená väčšiu silu [19].

Z vyššie uvedených faktov bolo jasným cieľom sa zamerať iba na magnety štvorcového prierezu a preveriť možnosti ich využitia pre vhodnú magneticú pružinu.

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.2: Časť mikro zberaču so znázornením zmeny rozmerov magnetov

### 7.1.2 Topológia troch a štyroch magnetov pre magnetickú pružinu

V tomto momente je známe, že je potrebné vyberať magnety so štvorcovým prierezom. Presné rozmery zatiaľ nie sú známe, ale je vhodné sa ešte zamyslieť nad dvomi úvahami:

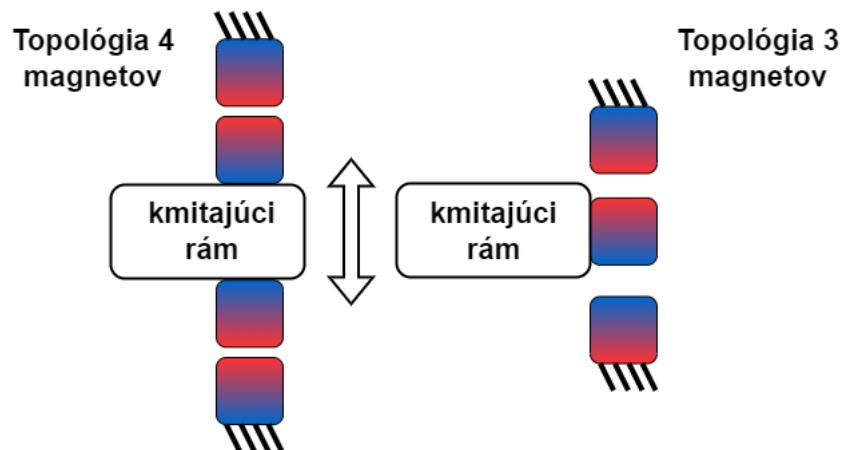
- Čo je výhodnejšie? Použiť jeden alebo dva pohyblivé magnety?
- Aká by mala byť medzera medzi magnetmi?

#### Počet pohyblivých magnetov

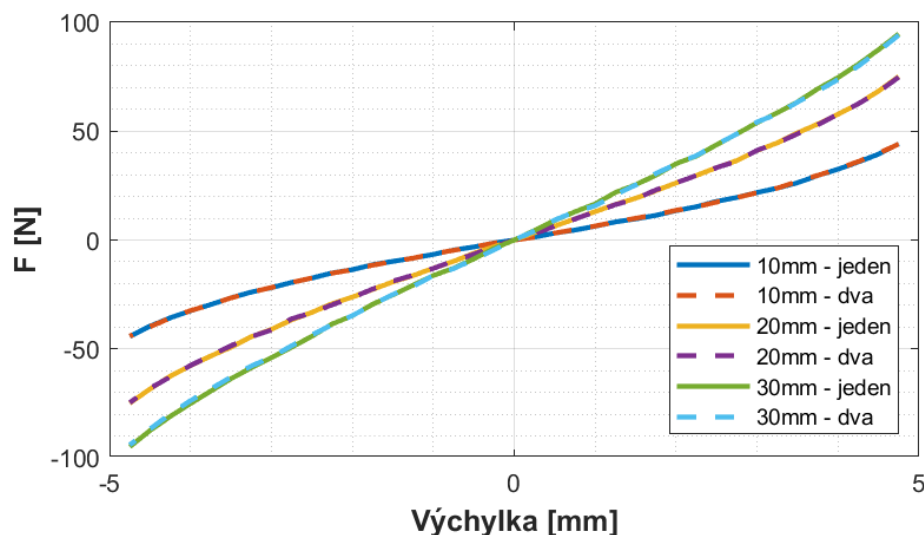
Bez pochyb sú potrebné dva statické magnety, aby bola vytvorená vhodná magnetická pružina. Magnet navyše znamená väčšie náklady. Otázka teda spočíva v tom, či vôbec majú dva pohyblivé magnety nejakú výhodu oproti jednému. Názorný náčrt topológie magnetickej pružiny je možné vidieť na obrázku 7.3.

Pre účely zistenia možných výhod bola vytvorená krátka analýza v programe FEMM 4.2, kde sa sledoval priebeh sily v závislosti na aktuálnej výchylke kmitajúceho magnetu. Porovnanie prebehlo tak, že sa určila maximálna výchylka kmitania od nulovej hladiny  $\pm 5$  mm. To znamená, že v bode  $-5$  mm a  $+5$  mm sa pohyblivý magnet dotýka buď spodného alebo horného statického magnetu. Potom boli vzaté do úvahy tri rozmery štvorcových magnetov a to  $10 \times 10$  mm,  $20 \times 20$  mm a  $30 \times 30$  mm. Následne sa všetky priebehy vyniesli do jedného grafu na obrázku 7.4. Legenda popisuje veľkosť strany štvorcového prierezu magnetu a za pomlčkou je vždy uvedený počet pohyblivých magnetov.

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.3: Náčrt magnetickej pružiny s jedným a dvomi pohyblivými magnetmi



Obr. 7.4: Závislosť sily na výchylke magnetov

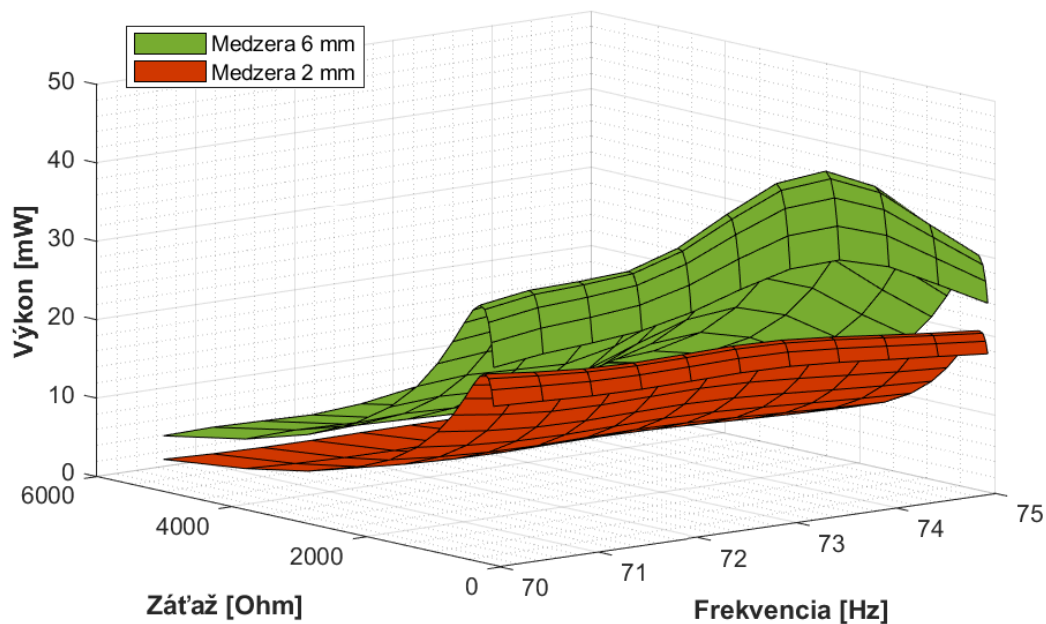
Výsledky z grafu na obrázku 7.4 podávajú jasné informácie. Topológia štyroch magnetov, tzn. dva pohyblivé a dva statické, neprináša žiadnu radikálnu výhodu. V niektorých bodoch je sila o niečo málo väčšia, ale vzhľadom k absolútnej sile môžu byť tieto minimálne rozdiely zanedbané. Z výsledkov bol vyvodený záver, ktorý poukazuje na výhodu využitia iba jedného kmitajúceho magnetu a to jak z ekonomického, tak aj z konštrukčného hľadiska.

### Rozmer vertikálnej medzery

Ďalším bodom úvahy je rozmer vertikálnej medzery medzi magnetmi. Statické magnety, ktoré sú súčasťou magnetickej pružiny fungujú aj ako hard stop pre kmitanie vibračného mikro zberaču. Pri tejto úvahe bolo nevyhnutné sa zamyslieť nad tým, ako sú jednotlivé parametre medzi sebou závislé a čo to v skutočnosti znamená. Z praktického hľadiska je známe, že čím je hard stop osadený bližšie, tým je výchylka menšia a tým pádom je aj výstupný elektrický výkon nižší.

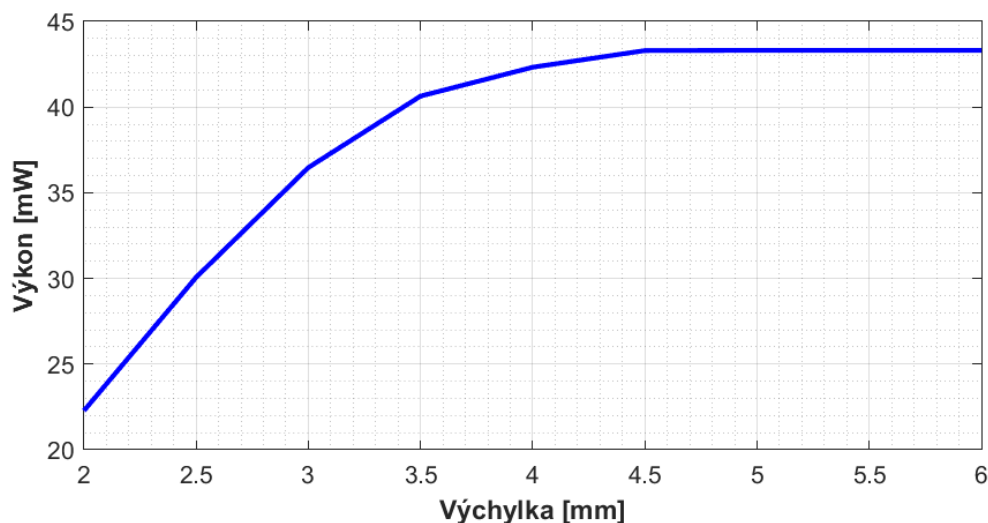
## 7 NÁVRH TUHOSŤI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

Vzhľadom k vyššie uvedeným faktom bolo rozhodnuté preveriť úzke pásmo optimálnej frekvencie a sledovať výstupný výkon v závislosti na zmene maximálnej možnej výchylky. Celkovo bolo preverených niekoľko rozličných výchyliek v rozmedzí 2 až 6 mm. Vypočítané výsledky boli opäť vynesené do príslušných grafov. Plošný graf výkonu pre porovnanie nastavenia minimálnej a maximálnej výchylky je možné vidieť na obrázku 7.5.



Obr. 7.5: Porovnanie výstupného výkonu s nastavením rozličných možných výchyliek

Pre lepšie porozumenie výsledkov bol vytvorený graf závislosti výstupného výkonu na maximálnej výchylke kmitania, ktorý je možné vidieť na obrázku 7.6.



Obr. 7.6: Závislosť výstupného výkonu na veľkosti vertikálnej medzery medzi magnetmi

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

Hodnoty výstupného výkonu vynesené do grafu na obrázku 7.6 boli získané pri frekvencii  $f = 73.5$  Hz a odporovej záťaži  $R = 306 \Omega$ . Je vidieť, že nadmerné zväčšovanie vertikálnej medzery medzi magnetmi neprináša zvýšenie výkonu, ale naopak sa výkon saturuje na hodnote približne  $P = 43$  mW. Taktiež je možné pozorovať, že ku zlomu a následnému prudšiemu klesaniu výkonu dochádza pre kmitania s maximálnou možnou výchylkou menšou než  $x = 3.5$  mm.

Úmyslom je nastaviť medzeru medzi magnetmi tak, aby bola čo najmenšia ale zároveň bolo možné získať optimálny výkon z mikro zberaču. Čím sú magnety bližšie ku sebe, tým je možné použiť menší prierez magnetov na vytvorenie rovnakej tuhosti čo vedie k nižšej cene za jeden kus magnetu.

K tomu aby bola dosiahnutá frekvencia  $f = 73.5$  Hz je potrebné dosiahnuť tuhosť systému, podľa vzťahu 5.3, približne  $k = 18.5$  N/mm. Pre overenie tuhosti vytvorenej pomocou odpudzujúcich sa magnetov bolo potrebné vytvoriť simulácie v prostredí FEMM 4.2. Hodnoty magnetickej tuhosti pri rozdielnych vertikálnych medzerách medzi magnetmi s nastavením štvorcového prierezu magnetov 20x20mm je možné vidieť v tabuľke 7.1.

x [mm]	k [N/mm]
2	24.26
2.5	21.69
3	19.67
3.5	18.26
4	16.61
4.5	15.41
5	14.36
5.5	13.41
6	12.58

Tabuľka 7.1: Hodnoty magnetickej tuhosti pre rozdielne vertikálne medzery

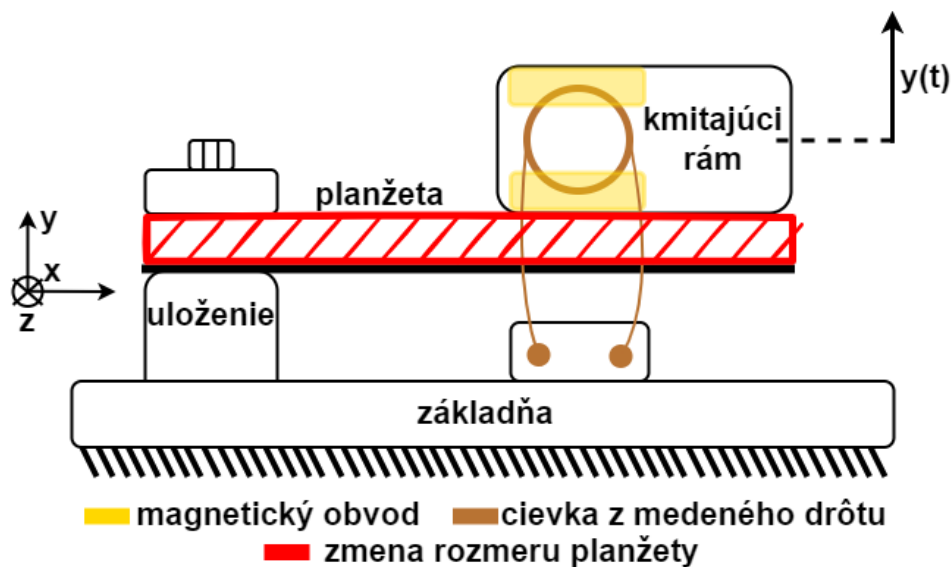
Pri dôkladnom prezretí grafu na obrázku 7.6 je vidieť, že s vertikálnou medzerou 3.5 mm je ešte stále možné získať priemerný výstupný výkon nad 40 mW. V tabuľke 7.1 je uvedená príslušná hodnota tuhosti pre túto medzeru ako  $k = 18.26$  N/mm, čo by mohlo postačovať na dosiahnutie vlastnej frekvencie približne 73.5 Hz.

Síce je dostupnosť týchto magnetov bezproblémová, ich cena je to, prečo sa stávajú nedostupnými. Jeden magnet, o štvorcovom priereze 20x20 mm, má cenovku presne 335,50 Kč/ks. Vzhľadom k vyššie diskutovanej topológii, by postačovali aj tri kusy magnetov. To znamená, že celková cena by činila 1006,50 Kč. V rámci dosiahnutia jedného zo stanovených cieľov práce, teda navrhnutie mikro zberaču s čo najnižšou cenou sa ukázalo, že magnety nebudú vhodným riešením tuhosti.

## 7 NÁVRH TUHOSŤI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

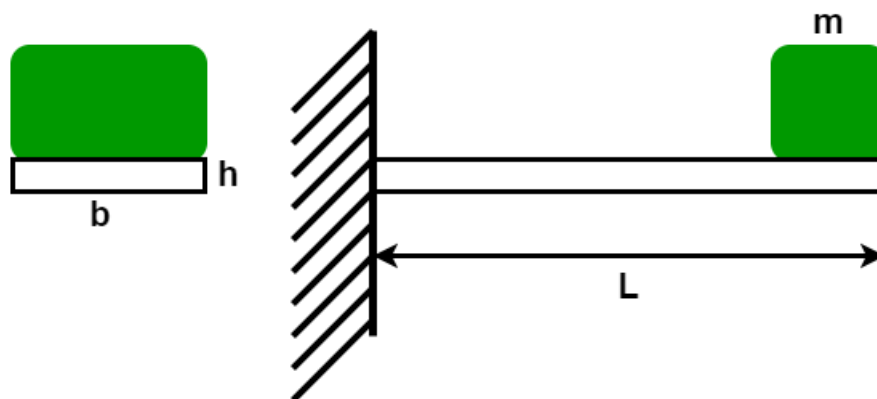
### 7.1.3 Využitie mechanickej tuhosti systému

Vzhľadom k zisteniam z predošlej podkapitoly bolo potrebné uvažovať o inej alternatíve ako vytvoriť celkovú tuhosť systému. Možnosti je určite mnoho, avšak cieľom je zachovať jednoduchosť a samozrejme nízku cenu. Za týchto okolností sa ukazuje ako najrelevantnejšie modifikovať planžetu, ktorá bude aj tak súčasťou systému. Tým pádom je možné odstrániť magnety a zjednodušiť celý koncept mikro zberaču.



Obr. 7.7: Náčrt realizácie mechanickej tuhosti

Účelom tejto podkapitoly je určiť parametre planžety, konkrétne jej šírku, hrúbku a dĺžku tak, aby bola dosiahnutá požadovaná tuhosť. Planžeta, s ktorou sa uvažovalo doteraz mala rozmery 30x0.5 mm (bxh) a tieto rozmery vyplývajú z návrhu v bakalárskej práci. Široká planžeta má zmysel z hľadiska zamedzenia torzných kmitov. Preto bolo rozhodnuté pôvodnú šírku ponechať a modifikovať hrúbku a dĺžku planžety. Zjednodušený náčrt pre ďalšie výpočty je možné vidieť na nasledujúcom obrázku 7.8.



Obr. 7.8: Náčrt pre výpočty rozmeru nosníka

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

Už na začiatku výpočtov treba počítať s tým, že planžetu, respektíve nosník, bude potrebné kúpiť. Z hrubého odhadu sa dá povedať, že nebude potrebný profil hrubší než 5 mm. Najčastejšie sú bežne dostupné profily so zmenou hrúbky o 0.5 mm. Preto bolo rozhodnuté preskúmať hrúbky od 0.5 do 5 mm so zmenou 0.5 mm, čiže celkovo 10 rôznych hrúbok planžety.

Pomocou Castiglianovej vety je známe, že posuv pôsobiska sily je daný parciálnou deriváciou celkovej energie napätosti podľa tejto sily [22]. To sa môže vyjadriť matematickým zápisom následovne

$$x = \frac{\partial W}{\partial F} \quad (7.1)$$

Vyjadrením energie napätosti je možné upraviť vzťah 7.1 nasledovným spôsobom

$$x = \frac{\int \frac{M_O^2}{E \cdot J_y} dl}{dF} = \frac{1}{2 \cdot E \cdot J_y} \int \frac{M_0^2}{dF} dl \quad (7.2)$$

Dosadením ohybového momentu  $M_O = F \cdot l$ , kvadratického momentu prierezu  $J_y = \frac{bh^3}{12}$  a integračných medzí pre  $dl = \langle 0, L \rangle$  je možné vyjadriť dĺžku nosníka ako

$$L = \sqrt[3]{\frac{J_y \cdot 3 \cdot E \cdot x}{F}} \quad (7.3)$$

Ďalej je známe, že sila môže byť vyjadrená pomocou tuhosti ako  $F = k \cdot x$  a zároveň tuhosť v závislosti na vlastnej frekvencii mikro zberaču  $k = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot m_{pridaná}$ . Tým pádom finálny vzťah pre výpočet dĺžky nosníku má tvar

$$L = \sqrt[3]{\frac{J_y \cdot 3 \cdot E}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot m_{pridaná}}} \quad (7.4)$$

Ešte je potrebné vyjadriť tuhosť nosníku v závislosti na vlastnej frekvencii mikro zberaču. Čiže aby danou tuhosťou bolo možné dosiahnuť požadovanú frekvenciu mikro zberaču.

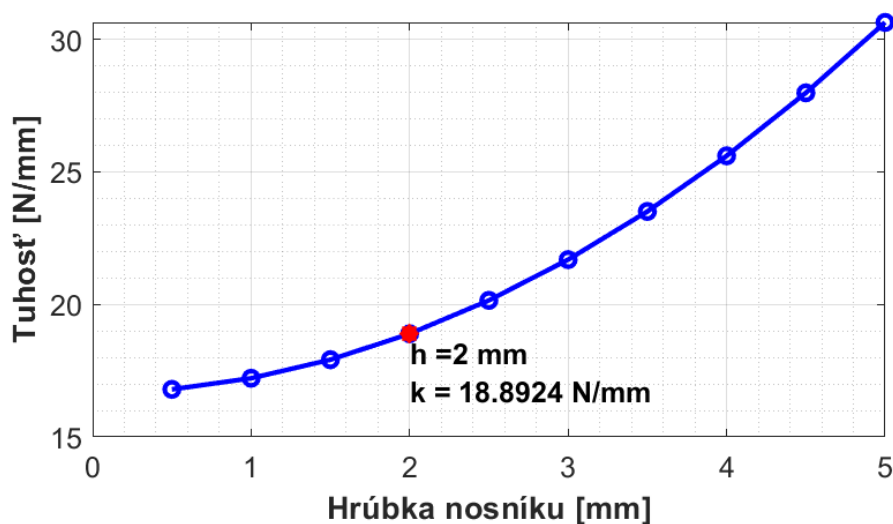
$$k_{nosník} = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot (m_{pridaná} + m_{redukovaná}) \quad (7.5)$$

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

Parameter  $m_{pridaná}$  vyjadruje hmotnosť kmitajúceho rámu a  $m_{redukovaná}$  je redukovaná hmotnosť kmitajúcej časti nosníku. Táto hmotnosť sa zvyčajne udáva ako 24% z celkovej hmotnosti. Tým pádom je možné ju vypočítať následovne

$$m_{redukovaná} = 0.24 \cdot b \cdot h \cdot L \cdot \rho \quad (7.6)$$

Ako už bolo spomenuté vyššie v diplomovej práci, pre dosiahnutie maximálneho možného výkonu bola potrebná tuhosť systému  $k = 18.5 \text{ N/mm}$ , čo odpovedá frekvencii  $f = 73.5 \text{ Hz}$ . Zo vzťahu 7.6 a 7.5 je vidieť, že tuhosť nosníku je ovplyvnená jeho dĺžkou. Z praktického hľadiska je veľmi jednoduché zmeniť dĺžku, ale podstatnejším rozmerom pri výbere nosníku je jeho hrúbka. Preto nebola v tomto kroku sledovaná dĺžka, ale iba závislosť tuhosti nosníku na jeho hrúbke.

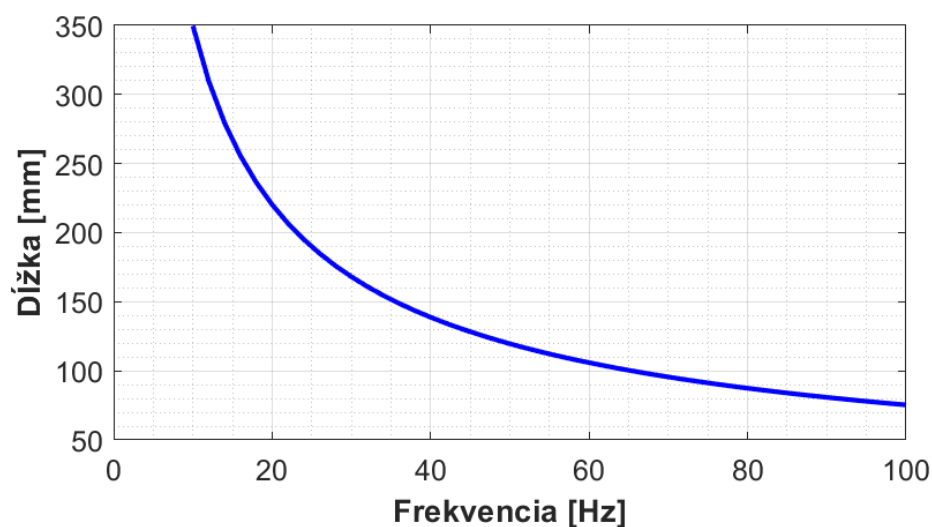


Obr. 7.9: Závislosť tuhosti planžety na hrúbke prierezu

Z grafu na obrázku 7.9 je vidieť, že pre dosiahnutie požadovanej tuhosti najviac vyhovuje hrúbka prierezu 2 mm. To znamená, že parametre prierezu nosníku sú 30x2 mm. Ako už bolo uvedené v tejto práci, faktom ostáva, že zmena dĺžky nosníku ovplyvní jeho tuhosť a tým pádom sa zmení aj vlastná frekvencia. Preto bolo rozhodnuté ešte preveriť závislosť dĺžky nosníku na vlastnej frekvencii.

Na obrázku 7.10 je možné vidieť graf spomenutej závislosti. Ako bolo očakávané podľa vzťahu 7.4, tak s narastajúcou vlastnou frekvenciou sa znižuje dĺžka nosníku. Ak vezmeme do úvahy, že by bola vyžadovaná veľmi nízka frekvencia a je potrebné počítať aj s určitou rezervou, tak je z grafu zreteľné, že by úplne postačovala maximálna dĺžka 400 mm. Z ekonomického hľadiska je použitie planžety veľmi vhodné riešenie. Oceľ s prierezom 30x2 mm je možné kúpiť za 30 Kč/ 1000 mm. To znamená, že celková cena takéhoto nosníku vychádza na 12 Kč.

## 7 NÁVRH TUHOSŤI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.10: Závislosť dĺžky planžety na vlastnej frekvencii

### Záver a poznatky z ladenia tuhosti systému

Ako ukázali výpočty, magnety pre túto aplikáciu neprinášali veľké výhody. Preto bola preverená myšlienka použitia hrubšej planžety. Táto hypotéza sa ukazuje ako veľmi vhodné riešenie. V prvom rade je to ekonomicky omnoho prijateľnejšia varianta. Za magnety by bolo potrebné zaplatiť 1006,50 Kč, naopak za planžetu iba 12 Kč. Táto zmena návrhu teda prináša úsporu o 98.8%. Taktiež je možné pristupovať ku dĺžke planžety ako ku modifikovateľnému parametru. Pri obhliadnutí sa za grafom z obrázku 7.10 je vidieť, že zmenou dĺžky použitého nosníku môže byť ladená vlastná frekvencia. Tento fakt bude ďalej prenesený ku konštrukčnému návrhu.

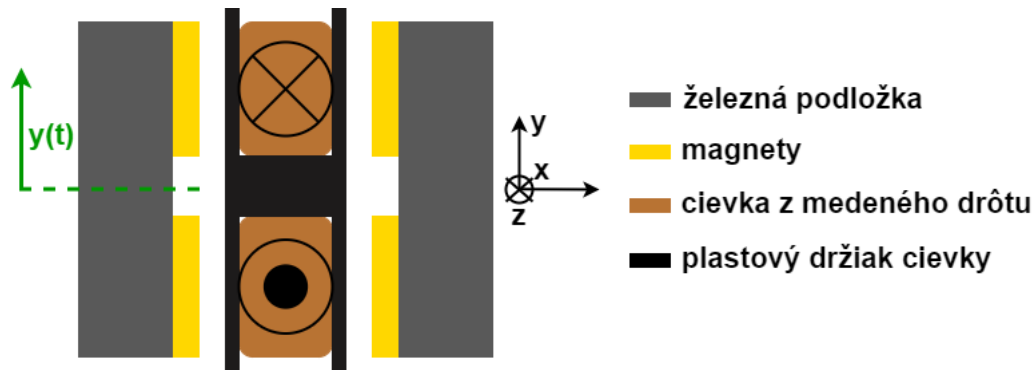
## 7.2 Konštrukčné riešenie mikro zberaču

Samotná konštrukcia sa vyvíjala zároveň s ladením a optimalizovaním parametrov mikro zberaču, keďže niektoré parametre z návrhu konštrukcie boli potrebné ku výpočtom. Po navrhnutí mechanických parametrov bolo potrebné navrhnuť ešte magnetický obvod aby bolo možné vytvoriť finálny 3D model vibračného mikro zberaču.

### 7.2.1 Magnetický obvod s cievkou

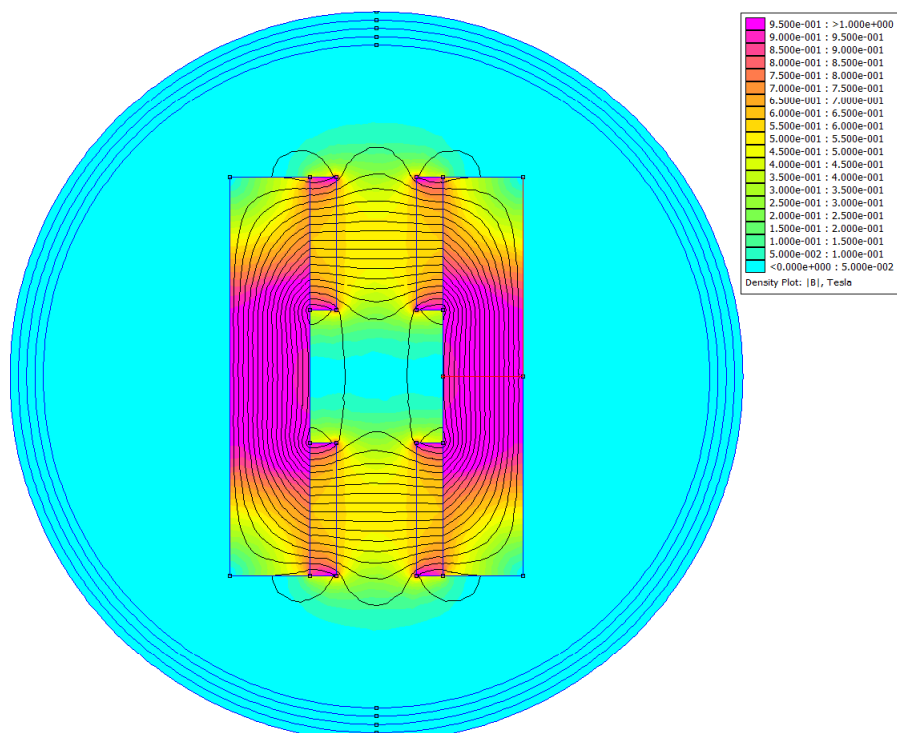
Navrhnuť magnetický obvod s cievkou nie je náročná úloha, avšak o to dôležitejšia, nakoľko vďaka relatívnemu pohybu cievky a magnetického poľa sa indukuje napätie na cievke ako to bolo popísané v podkapitole 3.2.2. Súčasťou tejto časti sú kovové podložky cez ktoré sa uzatvára magnetický obvod a samozrejme magnety, ktoré ho vytvárajú. Podstatnou úlohou je navrhnuť rozmery magnetov a kovovej podložky tak, aby magnetická indukcia bola čo najväčšia vo vzduchovej medzere, ale zároveň aby v celom obvode nedošlo k presýteniu. Na obrázku 7.11 sú znázornené jednotlivé časti topológie magnetického obvodu s cievkou a farebnou legendou

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.11: Náčrt magnetického obvodu

Železná podložka s nalepenými magnetmi je budená vibráciami. Cievka je uložená staticky a tak dochádza k relatívnemu pohybu. Približné rozmery boli čerpané z bakalárskej práce, nakoľko sa už pre jej účely ukázali ako vyhovujúce. Rozmery boli optimalizované pomocou magnetickej analýzy v prostredí FEMM 4.2. Aj keď sa jedná iba o 2D simulácie, tak pre účely tejto diplomovej práce sú úplne postačujúce. Hĺbka v tretom rozmere bola stanovená na 20 mm, čo je častá hodnota pri simuláciách elektromagnetických vibračných mikro zberačov. Výsledok magnetickej simulácie je možné vidieť na obrázku 7.12



Obr. 7.12: Výsledky magnetickej analýzy

Finálne rozmery a parametre, s rešpektovaním súradného systému z obrázku 7.11, magnetického obvodu s cievkou sú následovné. **Železná podložka** bola simulovaná zo železného materiálu s konduktivitou  $\sigma = 10.3 \text{ MS/m}$  a má rozmery  $5 \times 30 \times 20$  (x,y,z). **Magnety** boli použité neodymové s povrchovou úpravou zlatom a hodnotou  $\text{MGOe} = 50$ . Rozmery jednej magnetickej plochy sú  $2 \times 10 \times 20$  (x,y,z). **Vzduchová medzera** medzi magnetmi má

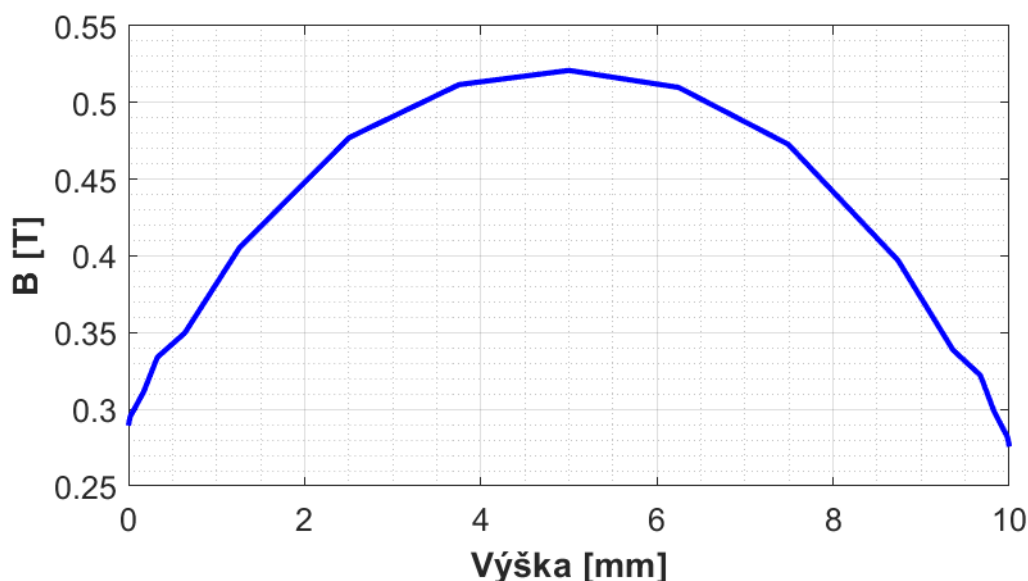
## 7 NÁVRH TUHOSŤI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

rozměry 5x30x20 (x,y,z). **Priestor pre cievku** je v časti vzduchovej medzery. Na správnom mieste drží cievku plastový držiak. Horný a spodný priestor, kde je vinutá cievka, je rovnaký o rozmere 4x4x21 (x,y,z). Cievka je vinutá z medeného lakovaného drôtu o priemere 0.118 mm. Teoretický výpočet počtu závitov cievky ja následovný

$$N = \frac{a \cdot b}{d^2} = \frac{4 \cdot 4}{0.118^2} \doteq 1150z. \quad (7.7)$$

Cievka bola vinutá ručne pomocou vlastného navíjacieho zariadenia vytvoreného z krokového motoru a arduino. Každých 100 závitov bolo navíjanie prerušené aby mohol byť aplikovaný bezfarebný lak. Celkovo bolo navinutých 1050 závitov, čo je len malá odchýlka od teoretického výpočtu. Priemer zvoleného drôtu je značne tenký a pri jeho vinutí môže dôjsť k pretrhnutiu. Avšak na druhú stranu sa tenkým drôtom dá docieľiť väčší počet závitov, čo znamená väčšie výstupné napätie.

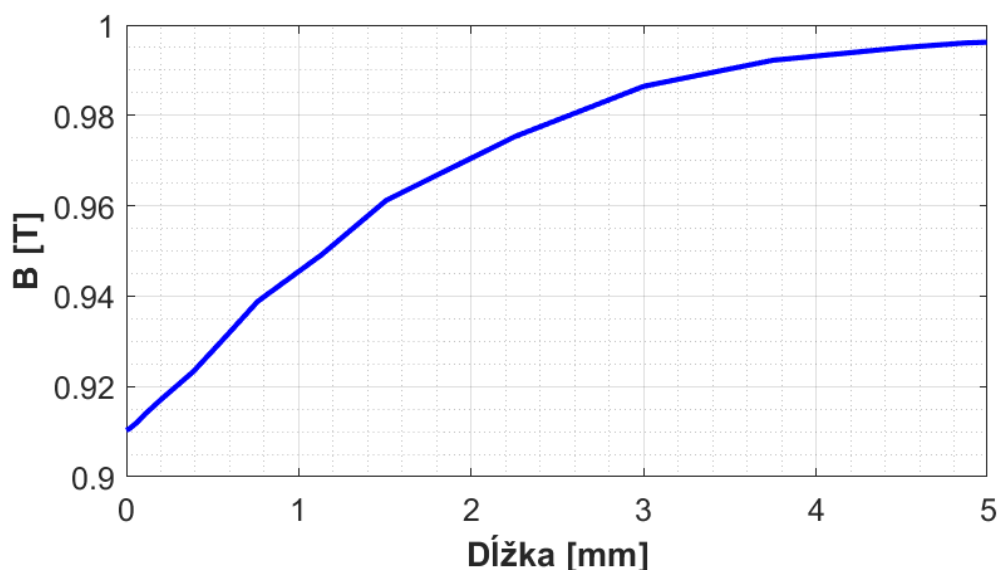
Následne boli skontrolované hodnoty magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere, čiže v priestore pre uloženie cievky, a v horizontálnom reze cez kovovú konzolu.



Obr. 7.13: Graf závislosti magnetickej indukcie na výške magnetov vo vzduchovej medzere

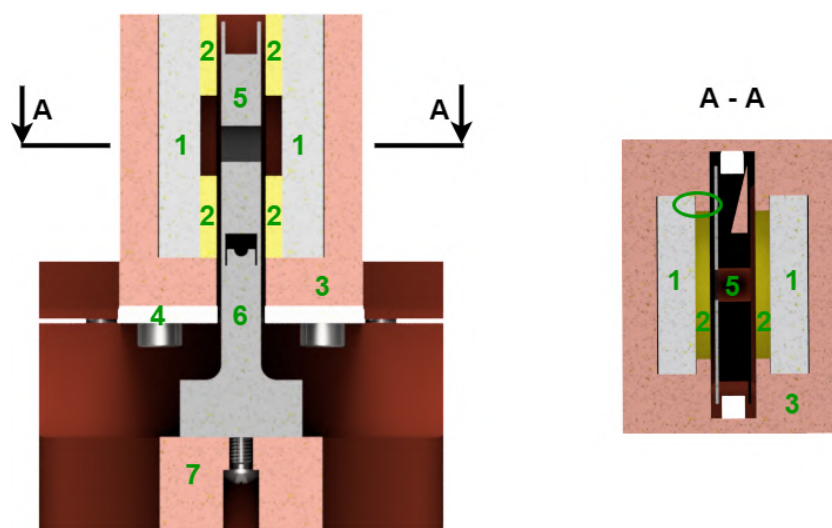
Z grafu na obrázku 7.13 je patrné, že magnetická indukcia je najväčšia v úrovni prostriedku neodýmových magnetov a klesá smerom ku ich krajom. Priemerná hodnota magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere vola určená ako  $B = 0.45T$ . Druhý graf na obrázku 7.14 vyobrazuje magnetickú indukciu v kovovej konzole presnejšie v jej polovici výšky. Cieľom bolo dosiahnuť to, aby hodnota magnetickej indukcie neprekračovalo hodnotu približne  $B = 1T$ . Je vidieť, že táto podmienka bola splnená. V ďalšom kroku je možné vytvoriť konštrukčný návrh uloženia magnetov s podložkami.

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU



Obr. 7.14: Graf závislosti magnetickej indukcie na šírke konzoly uprostred konzoly

Na obrázku 7.15 je vidieť pohľad z prednej strany v reze skrz magnetický obvod a uloženie cievky. Na kovové podložky (1) sú osadené magnety (2) vhodným spôsobom tak, aby vytvorili uzatvorený magnetický obvod. Následne boli tieto podložky aj s magnetmi vložené do vnútra kmitajúceho rámu (3). Kmitajúci rám je pevne spojený s nosníkom (4) pomocou 4 skrutiek o rozmere M3x6. Cievka je vinutá na plastovom držiaku (5) a ten je následne lepený na posuvnú redukciu (6). Redukcia cievky je položená na mikro zberač (7) a na mieste ju držia dve skrutky o rozmere M2x8. Drážka v základni mikro zberaču je o niečo širšia než je priemer skrutiek a to z toho dôvodu, aby bolo možné doladiť polohu cievky pootočením okolo zvislej osi. Na označenom reze A-A je vhodné si všimnúť zelenú elipsu, ktorá zvýrazňuje zarážky pre kovové podložky. Je to z toho dôvodu, že pri návrhu z bakalárskej práce sa časom ukázala degradácia lepeného spoju a podložky s magnetmi sa odlepili od kmitajúceho rámu. Nápad zarážok bol prevzatý z dizertačnej práce O. Rubeša.

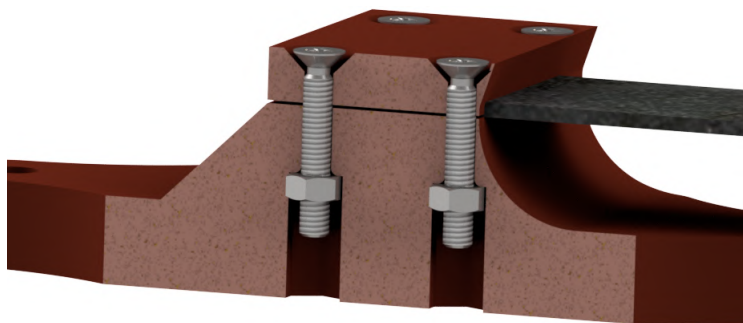


Obr. 7.15: Uloženie magnetického obvodu a s cievkou

## 7 NÁVRH TUHOSŤI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

### 7.2.2 Uloženie nosníku

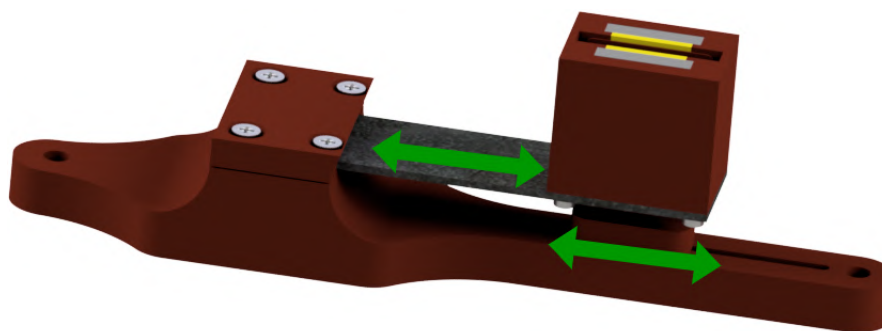
Idea uloženia nosníku sa ukázala už v bakalárskej práci ako vhodná a jednoduchá, avšak pre predkladaný návrh muselo byť uloženie jemne modifikované. Nakoľko mikro zberač má byť uložený na železničnú trať, kde vstupné zrýchlenia sú občas vysoké, bolo potrebné jemne zosilniť uloženie. Široký nosník je položený na základňu a následne je z vrchu osadená prítlačná platňa s výrezom akurát pre rozmery nosníku. Do základne sú nalisované matice M4 a celé uloženie je potom zaistené z vrchu 4 skrutkami o rozmere M4x20. Vonkajší obvod závitú skrutky je vzdialený od hrany nosníku 0.5 mm. Osadiť skrutky čo najbližšie nosníku má zmysel z hľadiska pevnejšieho spoju, ale zároveň bola ponechaná mala medzera na možnosť doladenia pozície nosníka voči cievke rotáciou okolo zvislej osi.



Obr. 7.16: Spojenie medzi nosníkom a základňou mikro zberaču

### 7.2.3 Modularita konštrukčného riešenia a finálny 3D návrh

Niekoľkokrát už bolo v tejto záverečnej práci spomenuté, že navrhnuť mikro zberač pre železničnú trať môže byť značnou výzvou práve kvôli správne naladeniu frekvencie a záťaže. Zmeniť odporovú záťaž nemusí byť veľký problém. Naopak naladiť inú frekvenciu môže predstavovať prekážku. Avšak poznatky uvedené v podkapitole 7.1.3 ukazujú, že zmenou dĺžky je možné meniť tuhosť a tým pádom aj naladiť inú frekvenciu.

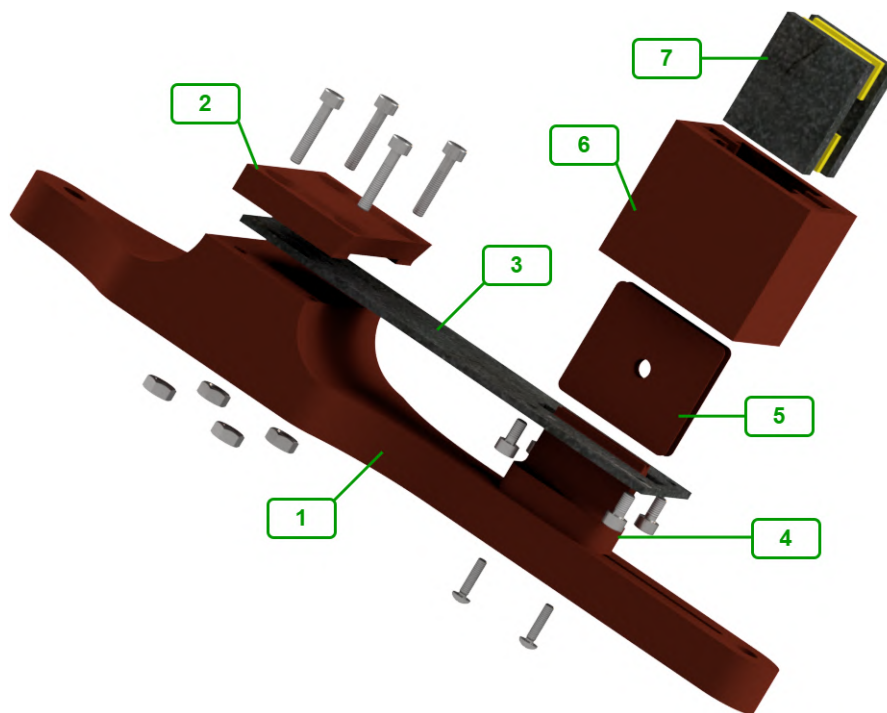


Obr. 7.17: Posuv nosníku a cievky

Vzhľadom k vyššie uvedeným poznatkom bola celá konštrukcia prispôbena ladeniu frekvencie a riešenie je v skutku jednoduché. Celé to funguje tak, že sa povolia štyri skrutky, ktoré držia nosník a tým pádom je možné meniť dĺžku nosníku s kmitajúcim rámom.

## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

Samozrejme je k tomu potrebné meniť aj polohu cievky. Preto bola vytvorená drážka v základni, pozdĺž ktorej je možné posúvať aj cievku. Týmto riešením je možné zmeniť dĺžku nosníku od približne 75 mm do 125 mm čo odpovedá naladeniu mikro zberača na vlastnú frekvenciu približne od 95 Hz do 48 Hz. Finálny 3D model predstaveného mikro zberaču je možné vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 7.18: Konštrukčný návrh vibračného mikro zberaču pre železničnú trať

Nižšie uvedené očíslované elementy konštrukcie odpovedajú číslam z predošlého obrázku.

1. Základňa
2. Prítlačná platňa na uchytenie nosníku
3. Kmitajúci nosník
4. Redukcia na uchytenie cievky
5. Cievka
6. Kmitajúci rám
7. Magnetický obvod

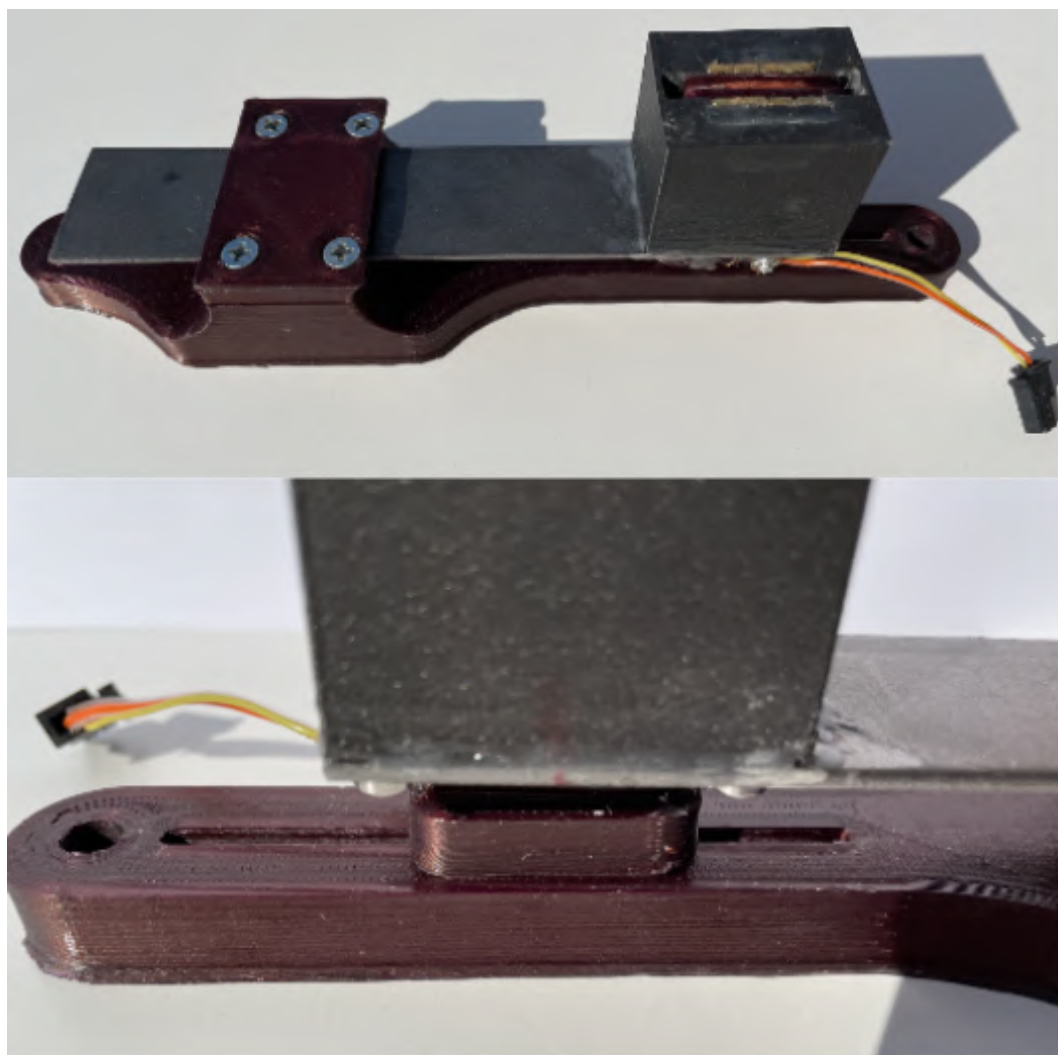
## 7 NÁVRH TUHOSTI A KONŠTRUKČNÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÉHO MIKRO ZBERAČU

### 7.2.4 Ekonomické hľadisko

Z finančného hľadiska sa ukazuje predkladaný návrh ako veľmi vhodný. Jednotlivé ceny za použité produkty sú uvedené približne. Magnety pre magnetický obvod - 75 Kč. Kovové podložky - 10 Kč. Medený drôt na vinutie - 40 Kč. Kovový nosník - 12 Kč. Spojovací materiál - 40 Kč. Lepidlo - 80 Kč. Náklady na 3D tlač - 180 Kč. V súčte to je dokopy necelých 450 Kč, a to je rozhodne veľmi priaznivá cena na celkové náklady potrebné na výrobu jedného mikro zberaču.

### 7.2.5 Finálny vyrobený kus

Pre výrobu vibračného mikro zberaču bolo potrebné niektoré komponenty nakúpiť a niektoré zas vyrobiť metódou 3D tlače. Tlačené komponenty sú na obrázku 7.18 zobrazené hnedou farbou a to konkrétne: základňa, prítlačná platňa, redukcia na uchytenie cievky, držiak cievky a kmitajúci rám. Na tlač spomenutých komponentov bol využitý materiál PLA a ASA. Finálny vyrobený mikro zberač je možné vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 7.19: Vyrobený mikro zberač

# 8 Testovanie vyhotoveného mikro zberaču pre železničnú trať

Funkčný exemplár predstavovaného mikro zberaču bolo potrebné dôkladne otestovať. Cieľom je otestovať funkčnosť mikro zberaču a získať jeho charakteristiky aby bolo možné v závere zhodnotiť tento návrh. Postup meraní bol rozdelený do dvoch etáp

- Meranie charakteristík s voľnou odozvou mikro zberaču
- Harmonické budenie zdrojom vibrácií

## 8.1 Charakterizácia parametrov z voľnej odozvy

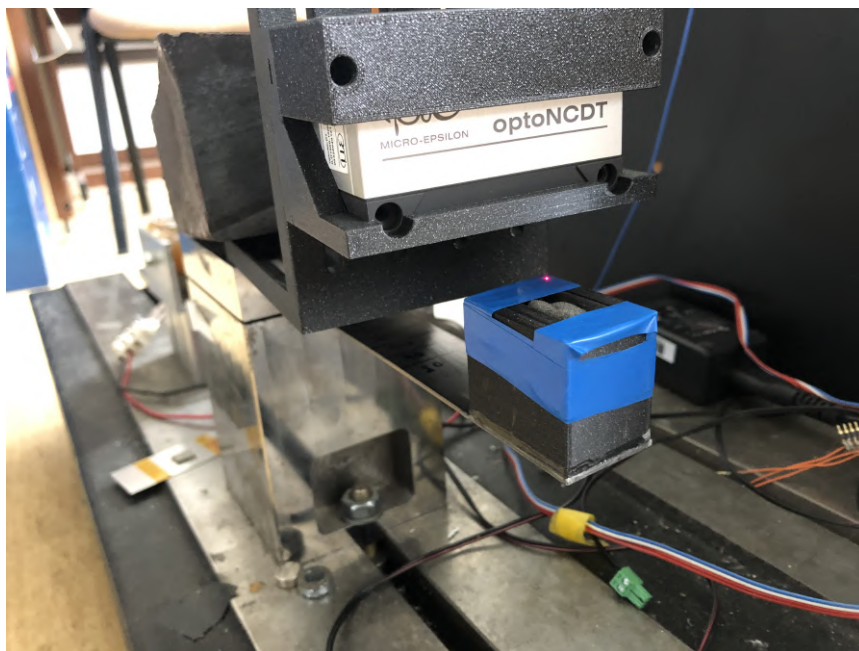
Merania s voľnou odozvou boli rozdelené do dvoch etáp. V prvej etape bolo sledované správanie len nosníku s kmitajúcim rámom. Následne bol testovaniu podrobený finálny návrh vibračného mikro zberaču.

### 8.1.1 Meranie nosníku a kmitajúceho rámu

V prvej etape bol testovaniu podrobený iba samotný nosník s kmitajúcim rámom a kovovými podložkami pre magnetický obvod. V tomto bode neboli ešte cievka a magnety súčasťou testovacieho exempláru. Fotografia z merania je možné vidieť na priloženom obrázku 8.1.

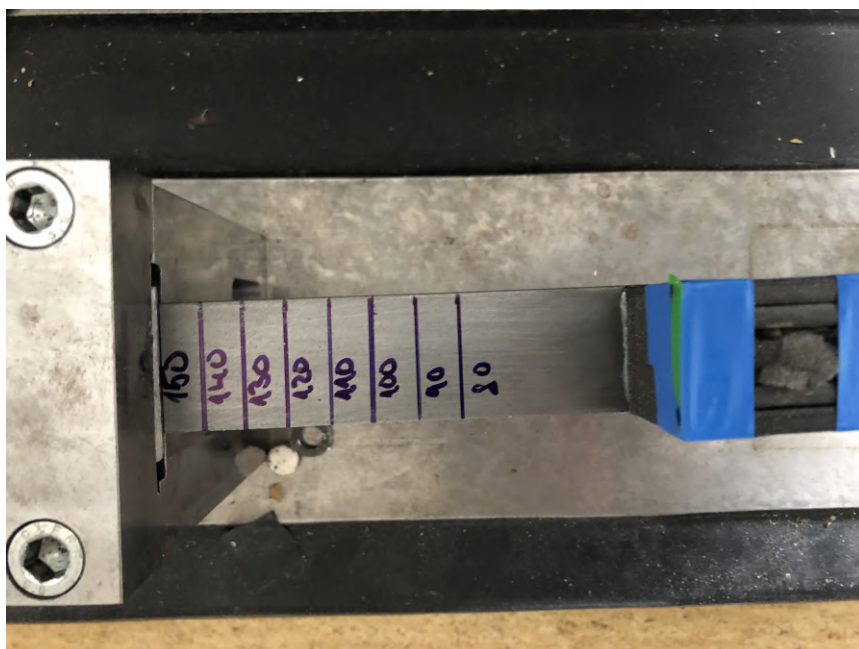
Meranie bolo prevedené nasledovným spôsobom. Nosník s kmitajúcim rámom bol uchytý do robustného ocelového uloženia pripomínajúci uloženie navrhnuté v konštrukčnom návrhu. Následne bol osadený inteligentný optický merač výchylky optoNCDT 1900-10. Na obrázku 8.1 je možné vidieť, že kmitajúci rám bol oblepený modrou páskou. Je to z toho dôvodu, že laserový snímač nevedel správne zamerať čiernu plochu vytlačeného kmitajúceho rámu. Po aplikovaní pásky bolo možné spustiť meranie.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĽ



Obr. 8.1: Časť mikro zberaču pri prvom meraní

Zdrojom počiatočného vychýlenia bolo brnkánie rukou. Optickým senzorom bola následne meraná voľná odozva. Meniacim sa parametrom v tomto meraní bola dĺžka nosníku. Na základe zmeny dĺžky bola meraná odozva v časovej oblasti.

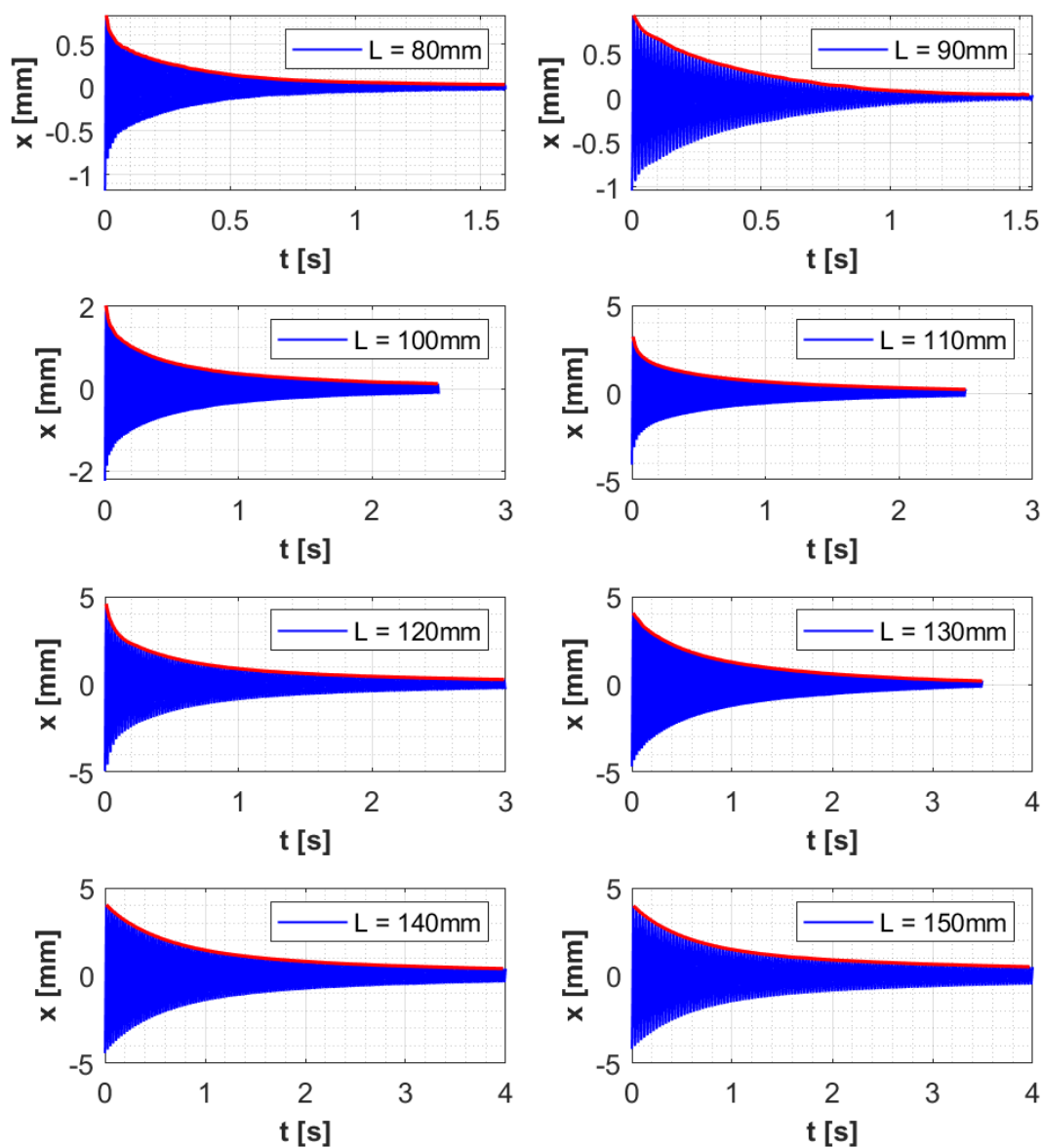


Obr. 8.2: Naznačená zmena dĺžky nosníku

Z nameranej odozvy pre každú dĺžku nosníka bola určená hodnota vlastnej frekvencie, pomerný útlm z pomeru amplitúd a tomu odpovedajúci faktor kvality pre každý kmit.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĽ

Na nasledujúcom grafe na obrázku 8.3 sú vynesené do grafov namerané časové priebehy výchylky voľnej odozvy pre variáciu dĺžok nosníku.

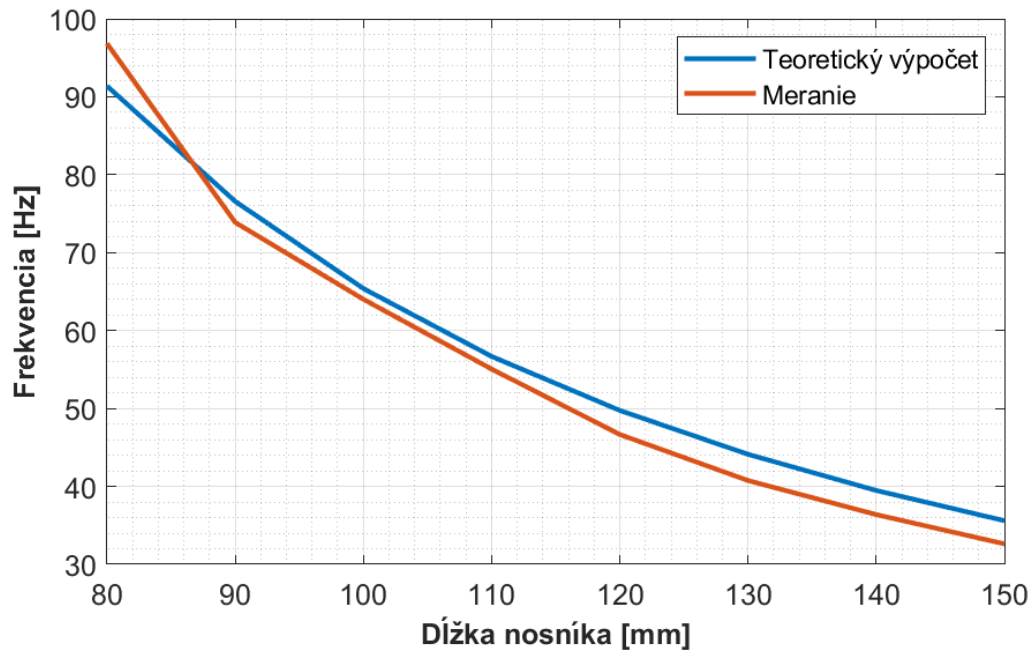


Obr. 8.3: Amplitúdovo časová charakteristika pre každú dĺžku nosníka

Ako je možné vidieť nakreslené značky na fotografii na obrázku 8.2, merania boli prevedené pre dĺžku nosníka od 80 do 150 mm. V grafoch na obrázku 8.3 je v okienku legendy v každom prípade uvedená dĺžka nosníka, ktorá zodpovedá vykreslenej charakteristike. Ako bolo očakávané je vidieť, že s narastajúcou dĺžkou nosníka sú amplitúdy výchyliek väčšie a zároveň celý priebeh dokmitáva dlhšiu dobu. Červenou farbou je v každom grafe vyznačená obálka doznievania.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ

Z uvedených nameraných dát boli určované jednotlivé charakteristiky. V prvom kroku bola sledovaná frekvencia. Frekvencia z nameraných dát bola určovaná pre každý kmit z prevrátenej hodnoty periódy, a uložená bola priemerná hodnota. Následne boli tieto hodnoty nameraných frekvencií porovnané s teoretickými frekvenciami vypočítaných pomocou upraveného vzťahu 7.4 .



Obr. 8.4: Závislosť frekvencie na dĺžke nosníku

Z uvedeného grafu je veľmi zreteľne vidieť, že frekvencie určené z meraní sa odlišujú len veľmi málo od tých teoretických. Najväčší rozdiel je pri dĺžke  $L = 80$  mm kde rozdiel frekvencií bol určený ako  $\Delta f = 5.4$  Hz. Naopak najmenším rozdielom sa rozchádzajú hodnoty frekvencie pri dĺžke nosníku  $L = 100$  mm a to konkrétne o  $\Delta f = 1.4$  Hz.

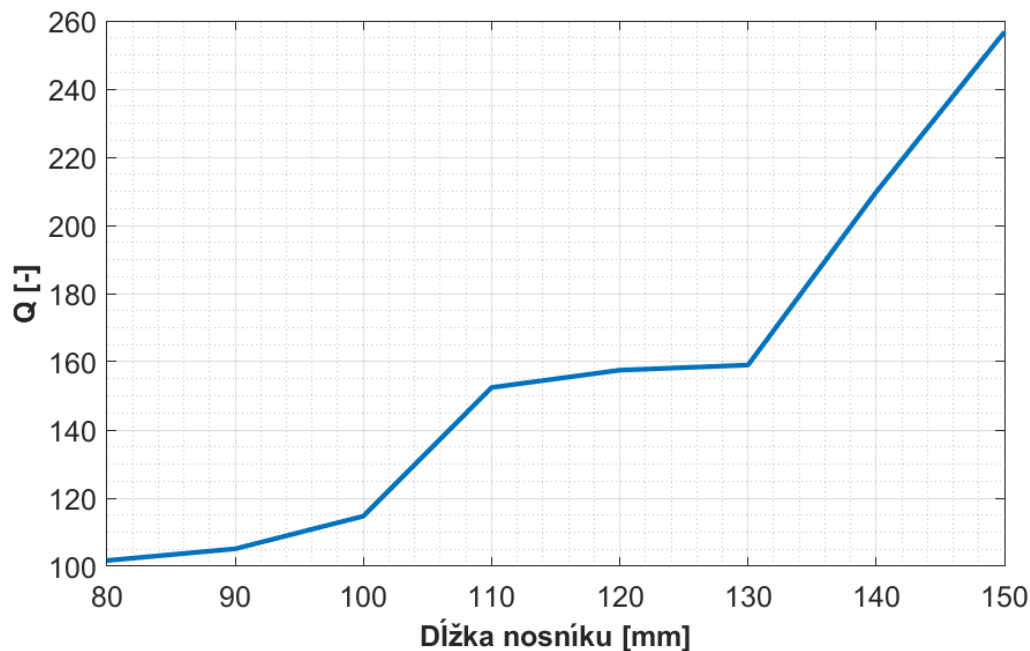
Ako už bolo spomenuté vyššie, tak pre každý kmit bol vypočítaný logaritmický dekrement pomocou nasledujúceho vzťahu [18].

$$\delta_i = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (8.1)$$

Vyjadrením periódy kmitu ako  $T = \frac{2\pi}{\Omega_0}$  je možné vyjadriť pomerný útlm v závislosti na logaritmickom dekremeinte následovne

$$\xi = \frac{\delta_i}{2\pi} \quad (8.2)$$

Vyjadrením pomerného útlmu bolo možné následne vypočítať mechanický faktor kvality podľa vzorca 5.4, ktorý bol už uvedený vyššie v tejto práci.



Obr. 8.5: Priemerné hodnoty faktoru kvality v závislosti na dĺžke nosníka

Pri malých výchylkách kmitania dochádzalo k šumu, ktorý sa značne prejavil na vypočítaných hodnotách faktoru kvality. Táto nepresnosť mohla byť spôsobená tým, že povrch kde boli merané výchylky nebol dokonale rovný ale skôr hrboľatý kvôli výrobe pomocou 3D tlače. Preto hodnoty faktoru kvality pri malých výchylkách neboli brané v úvahu a boli vypočítané priemerné hodnoty faktoru kvality zo zvyšku merania pri zmene dĺžky nosníku ako to je uvedené v grafe na obrázku 8.5. Je vidieť, že s narastajúcou dĺžkou nosníku má faktor kvality taktiež tendenciu stúpať.

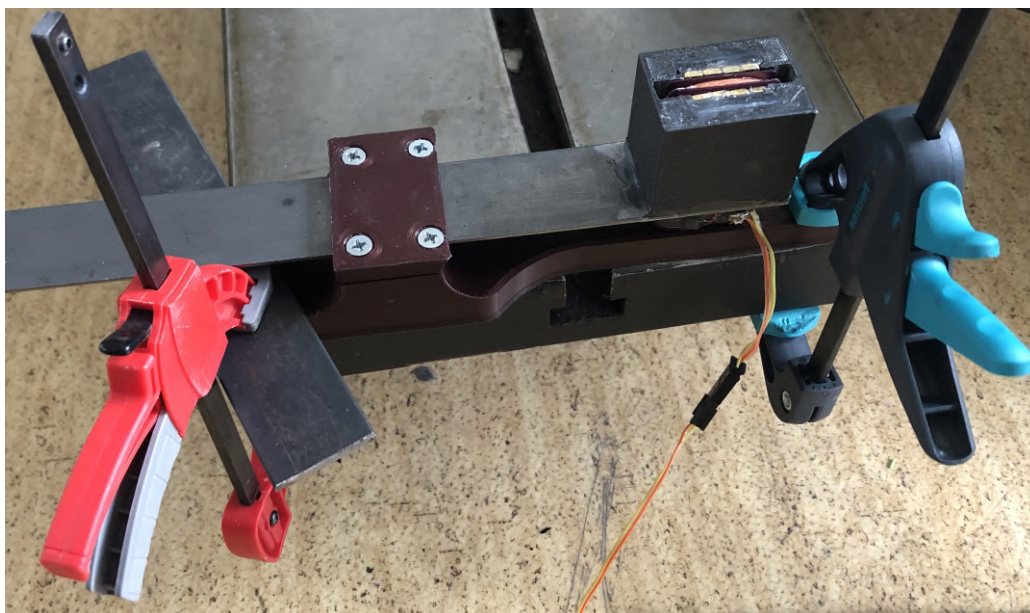
### 8.1.2 Testovanie finálnej verzie mikro zberaču

V tejto podkapitole bude popísané, ako bol testovaný finálny vyrobený kus vibračného mikro zberaču pre železničnú trať. Opäť sa jedná o meranie voľnej odozvy a určenie kľúčových parametrov mikro zberaču ako v predošlom meraní. Avšak tentokrát už nebol využívaný laserový merač ale osciloskop. Osciloskop bol pripojený na oba konce vinutej cievky a tak bolo možné merať už priamo indukované napätie na cievke. Merania sa líšili spôsobom uchytenia mikro zberaču ku pevnej podložke. V dvoch prípadoch sa jednalo o využitie sťahovacích svoriek a v poslednom prípade išlo o využitie spoju pomocou skrutiek M6. V každom meraní bola nastavená dĺžka nosníku na  $L = 100$  mm.

#### Uchytenie mikro zberaču k pevnej podložke pomocou svoriek vpredú a vzadu

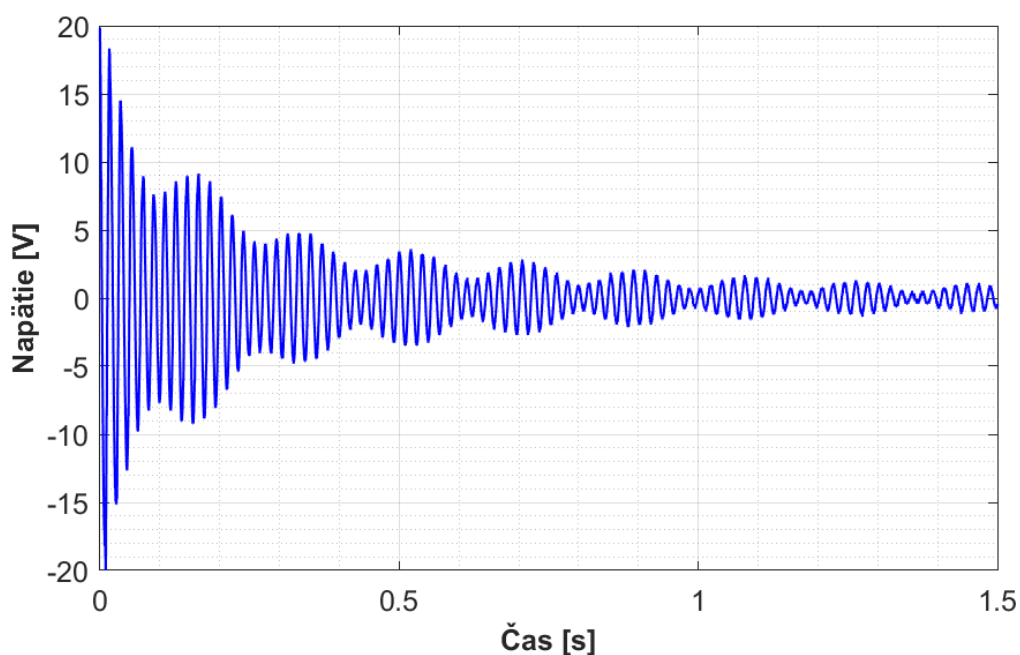
Na obrázku 8.6 je možné vidieť spôsob uchytenia mikro zberaču k pevnej podložke. Ku uchyteniu boli využité dve svorky na prednej a zadnej vysunutej časti základne. Meranie bolo prevedené rovnakým spôsobom ako už bolo popísané vyššie. Kmitajúci rám bol vychýlený rukou a následne bola meraná voľná odozva.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĽ



Obr. 8.6: Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - 1. spôsob uchytenia

Meranie s týmto uchytením bolo opakované niekoľko krát. Časový priebeh indukovaného napätia je možné vidieť na grafe na obrázku 8.7. Už na prvý pohľad je veľmi zreteľné, že dochádza akémusi pulzovaniu, ktoré bolo spôsobené parazitnými frekvenciami. Celé kmitanie bolo taktiež doprevádzané zvukovým efektom, ktorý poukazoval na nie úplne pevné zaistenie základne mikro zberaču voči pevnej podložke. Vzhľadom k priebehu nemalo zmysel sa ďalej zaoberať meraním s takýmto uchytením.

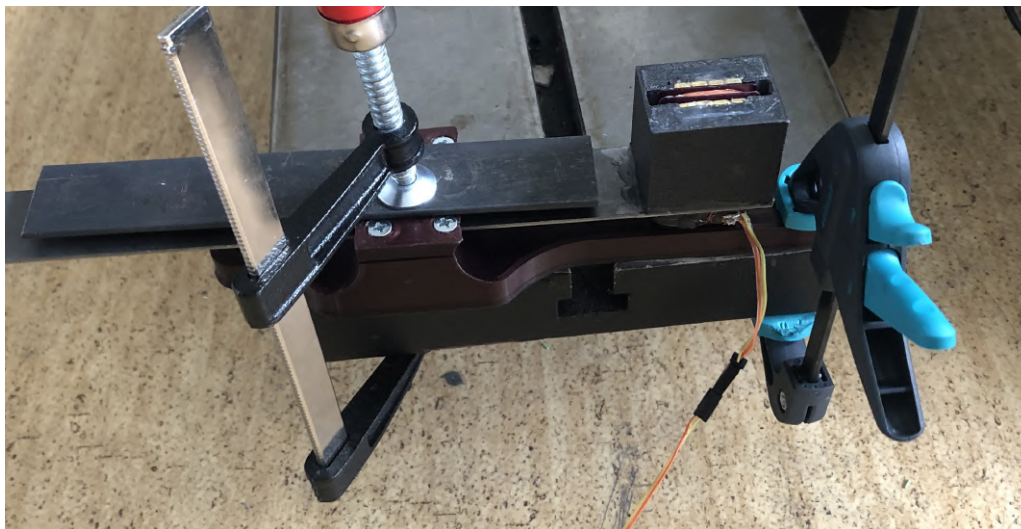


Obr. 8.7: Časový priebeh napätia pri prvom spôsobe uchytenia mikro zberaču

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĚ

### Uchytenie mikro zberaču k pevnej podložke pomocou svorky na uložení nosníka

Keďže v prvom meraní vykazoval mikro zberač nízke výstupné hodnoty bolo hľadané alternatívne riešenie uchytenia. Pred meraním boli pre istotu skontrolované skrutky na uložení nosníku aby sa vylúčila akákoľvek nechcená vôľa. Pre lepšie zaistenie nosníku bola osadená svorka priamo na uložení. Na obrázku 8.8 je možné vidieť uchytenie mikro zberaču ku pevnej podložke.

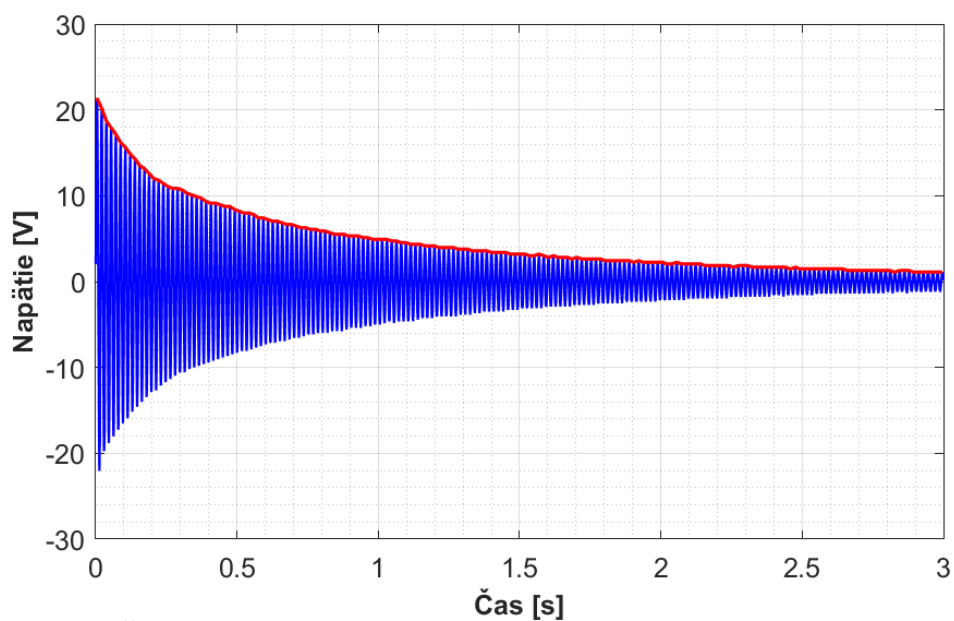


Obr. 8.8: Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - 2. spôsob uchytenia

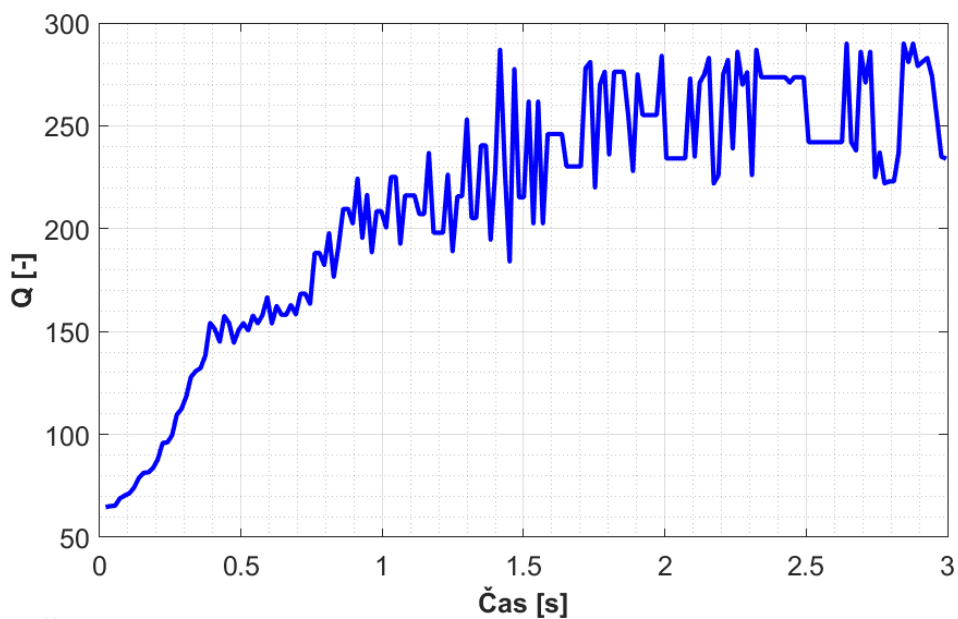
Na obrázku 8.9 je vykreslený graf časového priebehu napätia pre variantu, kde bola použitá svorka na hlavnom uložení nosníku. Už na prvý pohľad je priebeh napätia omnoho lepší než v predošlom prípade. Taktiež je poznať, že kmitanie sa tlmí pomalšie a celkovo mikro zberač dokmitáva dlhšiu dobu.

Na ďalšom uvedenom grafe na obrázku 8.10 je vidieť časový priebeh mechanického faktoru kvality. Pri veľkých výchylkách ukazuje niečo okolo  $Q = 100$  a postupne sa pri malých výchylkách šplhá približne až ku hodnote  $Q = 250$ , kde je vidieť veľmi výrazný šum a skoro až skokové zmeny hodnoty mechanického faktoru kvality. Tento šum je spôsobený nepresnosťou meranie pri veľmi malých výchylkách.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ



Obr. 8.9: Časový priebeh napätia pri druhom spôsobe uchytenia mikro zberaču



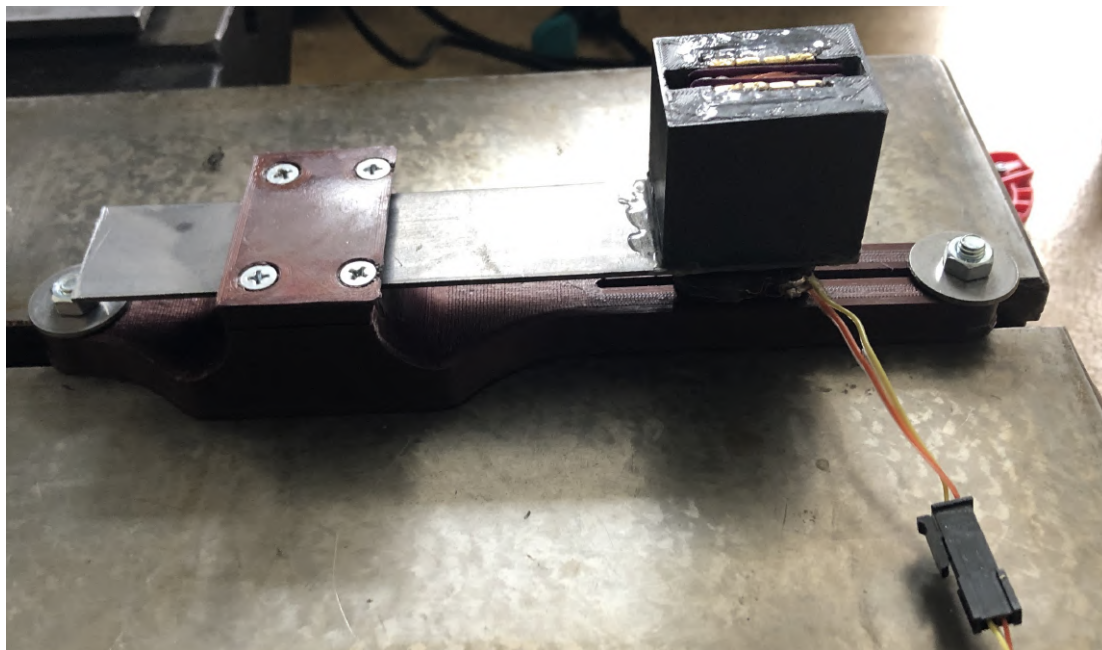
Obr. 8.10: Časový priebeh mechanického faktoru kvality pri druhom spôsobe uchytenia mikro zberaču

Pri uvedenom druhom meraní bola vlastná frekvencia vypočítaná z kmitov ako  $f = 59.5$  Hz. Z teoretických výpočtov by mala hodnota frekvencie s dĺžkou nosníku  $L = 100$  mm odpovedať frekvencii  $f = 65.5$  Hz. Z tohto údaju vyplýva, že rozdiel frekvencie z teoretického výpočtu a tohto merania je  $\Delta f = 6$  Hz.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ

### Uchytenie mikro zberaču k pevnej podložke pomocou dvoch skrutiek M6

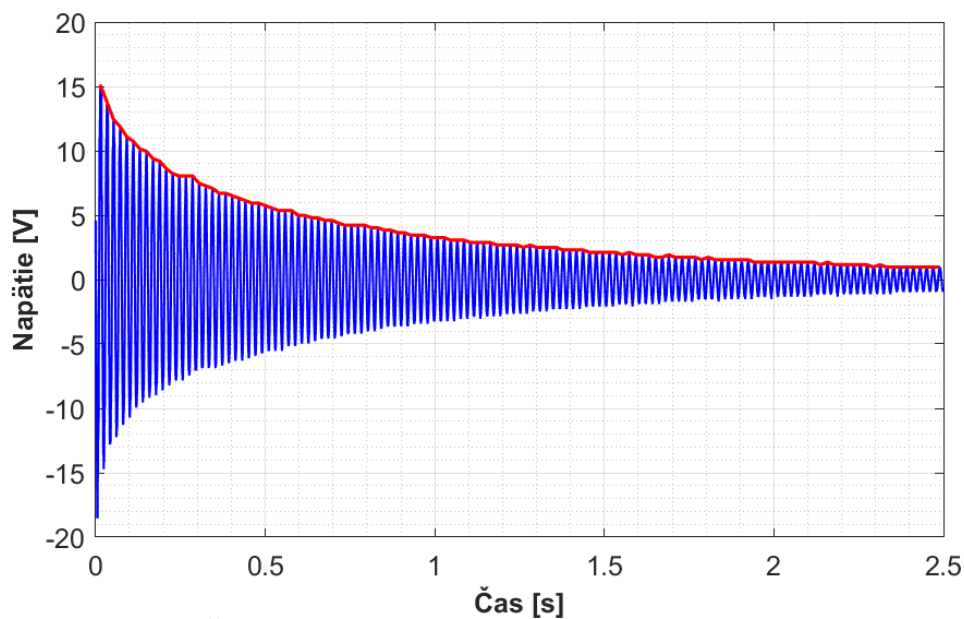
Pri poslednom meraní voľnej odozvy bola využitá drážka, do ktorej boli vsunuté skrutky M6. Následne sa na tieto skrutky nasadil mikro zberač skrz pred pripravené diery v základni. Celý mikro zberač sa zaistil podložkami a maticami. Testovaciu sústavu je možné vidieť na obrázku 8.11.



Obr. 8.11: Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - uchytenie pomocou skrutiek

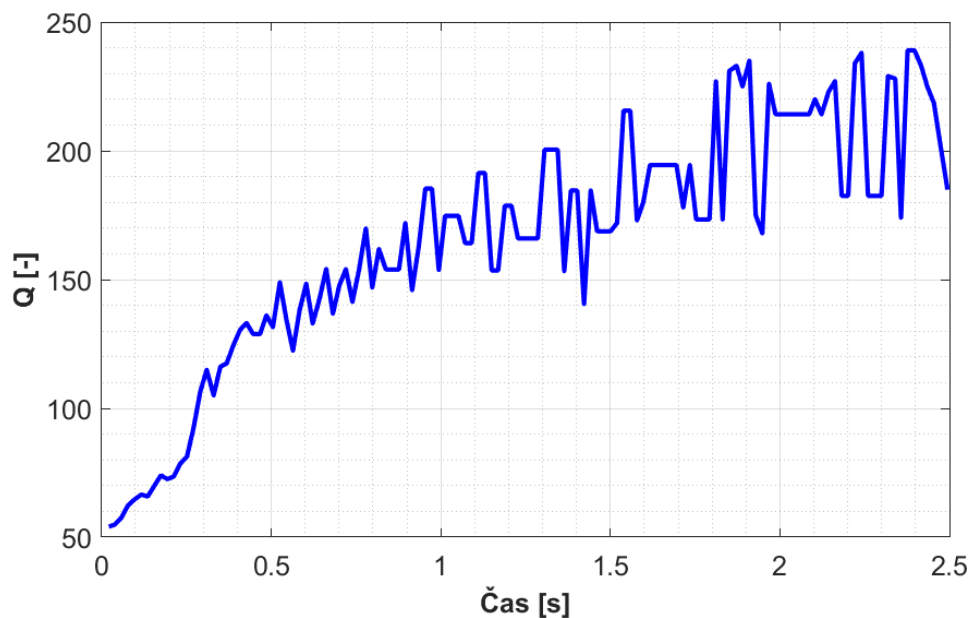
Znovu bol k meraniu využitý osciloskop pripojený na konce cievky, ktorý meral indukované napätie. Priebeh nameraných hodnôt napätia je možné vidieť na grafe na obrázku 8.12. Z grafu je zreteľné, že počiatočné vychýlenie bolo nižšie než pri dvoch predošlých meraniach. Obyčajným počiatočným vychýlením rukou nie je možné zaručiť za každým úplne rovnaké podmienky, a preto sa môžu počiatočné amplitúdy napätia líšiť. Avšak vhodnejšie je porovnávať hodnoty vlastne frekvencie a mechanického faktoru kvality. Pri tomto meraní bola vypočítaná priemerná vlastná frekvencia z kmitov  $f = 51.5 \text{ Hz}$ . Z tohto výsledku je možné zhodnotiť, že sa jedná o značný rozdiel oproti teoretickej frekvencii o  $\Delta f = 14 \text{ Hz}$ . Najpravdepodobnejšou príčinou tak výrazného poklesu frekvencie je skutočnosť, že matice boli utiahnuté príliš silno. Matice boli utahované čo najviac z domnienky, že viac utiahnuté konce spôsobia celkovo pevnejší spoj. Avšak ukázalo sa, že to málo práve opačný efekt a aj keď boli konce utiahnuté prostriedok mikro zberaču bol tým pádom jemne vzpriečený.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ



Obr. 8.12: Časový priebeh napätia pri uložení pomocou skrutiek M6

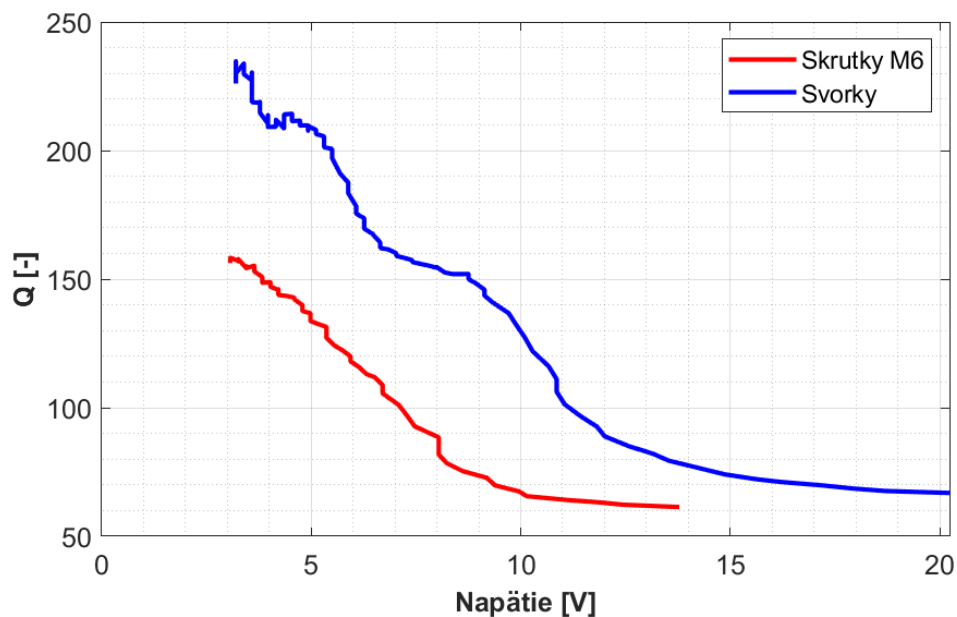
Z nasledujúceho grafu na obrázku 8.13 je možné vidieť pokles faktoru kvality oproti predošlému meraniu. Pri veľkých výchylkách je opäť jeho hodnota nízka a postupne sa zvyšuje. Avšak tento krát sa stredná hodnota faktoru kvality ustáli približne okolo hodnoty iba  $Q = 200$ .



Obr. 8.13: Časový priebeh mechanického faktoru kvality pri tretom spôsobe uchytenia mikro zberaču

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ

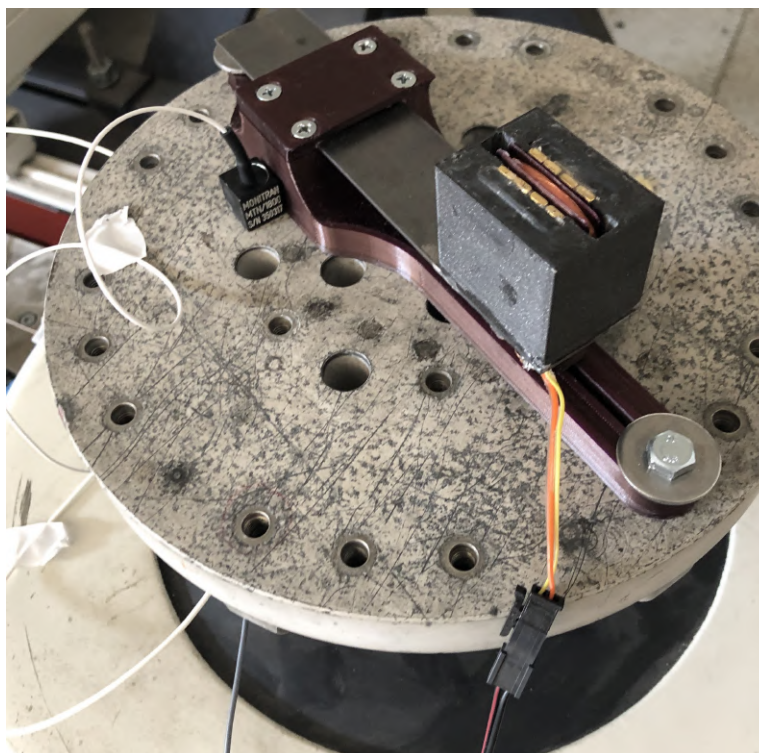
Pre lepšiu predstavu bol vytvorený ešte jeden graf závislosti mechanického faktoru kvality na indukovanom napätí. Graf je možné vidieť na obrázku 8.14. Do grafu boli vykreslené vypočítané hodnoty mechanického faktoru kvality pre verziu uchytenia so skrutkami a pomocou svorky na uložení nosníku. Je vidieť, že pri nízkych napätiach ktoré odpovedajú malým výchylkám je opäť veľký šum. Avšak už z pohľadu na graf je vidieť, že pri uchytení svorkou na uložení je celkový priebeh faktoru kvality lepší. Z tohto a taktiež z predošlých grafov je možné konštatovať, že veľmi záleží na mieste uchytenia mikro zberaču k pevnej podložke.



Obr. 8.14: Závislosť mechanického faktoru kvality na napätí

## 8.2 Harmonické budenie zdrojom vibrácií

Ku testovaniu s harmonickým budením bol využitý zdroj vibrácií v priestoroch DynLab na VUT FSI. Generátor bol osadený na vibračný stôl a aretovaný pomocou dvoch skrutiek M6 s podložkami. Osadenie mikro zberaču je možné vidieť na obrázku 8.15. Opäť bolo merané indukované napätie na cievke a taktiež zrýchlenie vibrácií na vibračnom stole a na zdroji vibrácií pomocou dvoch akcelerometrov.



Obr. 8.15: Osadenie mikro zberaču na zdroj vibrácií

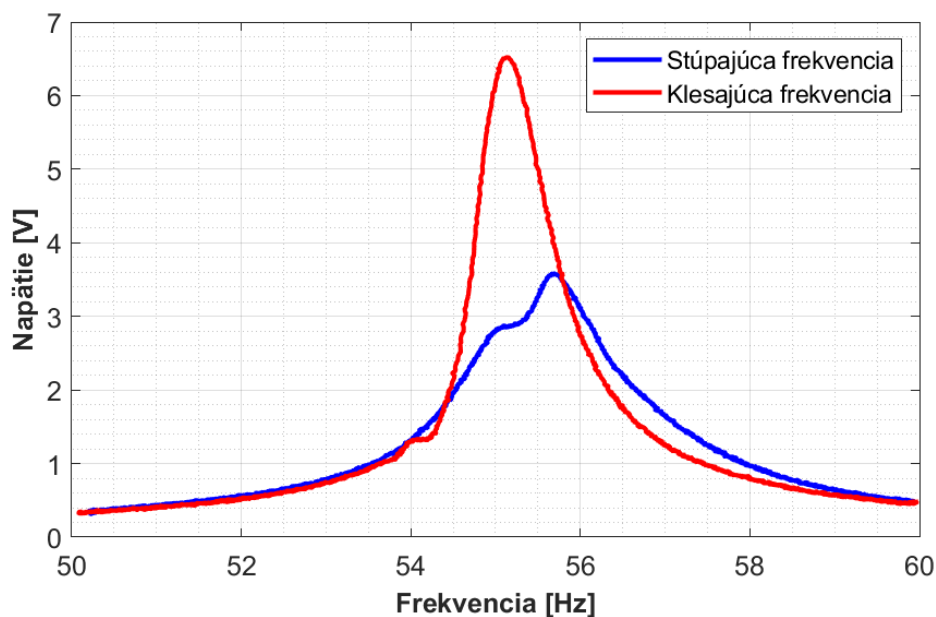
Meranie bolo rozdelené do troch fázy.

- Meranie pri vstupnom zrýchlení 10 mg
- Meranie pri vstupnom zrýchlení 20 mg
- Meranie pri vstupnom zrýchlení 20 mg, vlastnej frekvencii a s meniacou odporovou záťažou

### 8.2.1 Meranie pri vstupnom zrýchlení 10 mg

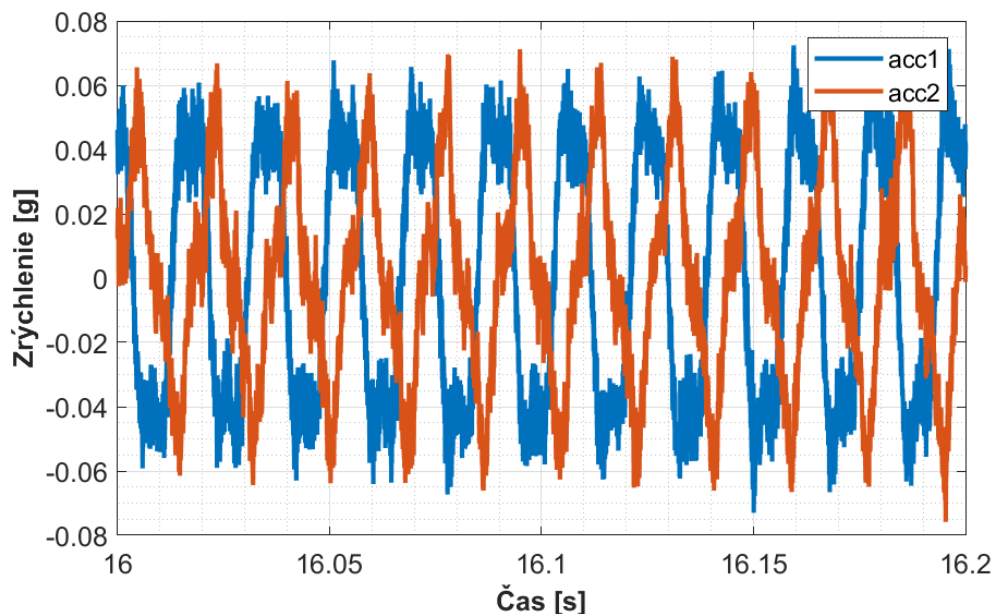
V prvom kroku bolo nastavené zrýchlenie zdroju vibrácií na 10 mg. Skúmaná oblasť frekvencií bola 50 až 60 Hz so stúpajúcim frekvenčným krokom a následne aj s klesajúcim. Cieľom bolo vytvoriť napätovo frekvenčnú charakteristiku a určiť vlastnú frekvenciu mikro zberaču.

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĽ



Obr. 8.16: Napätovo frekvenčná charakteristika pri zrýchlení 10mg

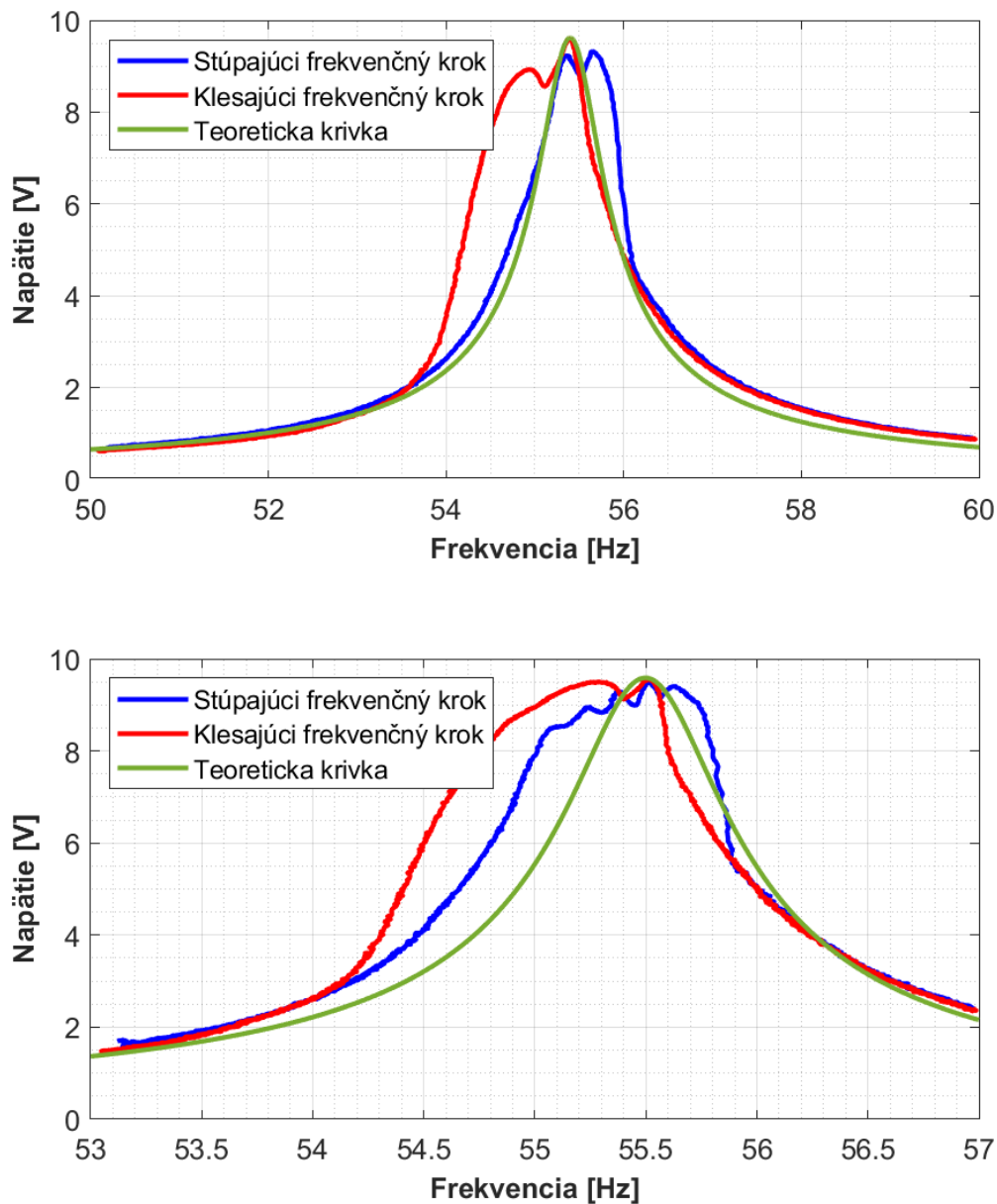
So stúpajúcim frekvenčným krokom bola dosiahnutá rezonancia pri frekvencii  $f = 55.7$  Hz. Amplitúda indukovaného napätia bola určená ako  $U_i = 3.6$  V. Klesajúci frekvenčný krok ukázal rezonanciu pri frekvencii  $f = 55.2$  Hz s amplitúdou  $U_i = 6.5$  V. Nižšiu hodnotu amplitúdy napätia, pri prejazde so zvyšujúcou frekvenciou, je možné vysvetliť poklesom vstupných zrýchlení. Tento fakt je možné vidieť na grafe na obrázku 8.17. Požadované zrýchlenie 10 mg nebolo dosiahnuté zdrojom vibrácií a tým pádom došlo aj k poklesu hodnoty amplitúdy indukovaného napätia.



Obr. 8.17: Časť zaznamenaného zrýchlenia z akcelerometrov v oblasti rezonancie mikro zberaču

### 8.2.2 Meranie pri vstupnom zrýchlení 20 mg

Druhé meranie bolo prevedené pri vstupnom zrýchlení vibrácií 20 mg. Tentokrát boli merania dve. Jedno s meniacim sa frekvenčným pásmom od 50 do 60 Hz a druhé meranie s užším pásmom 53 až 57 Hz a pomalejším prejazdom. Opäť boli zaznamenávané hodnoty výstupného napätia, ako so stúpajúcim frekvenčným krokom, tak aj s klesajúcim. Priebeh napätí je možné pozorovať na grafe na obrázku 8.18.



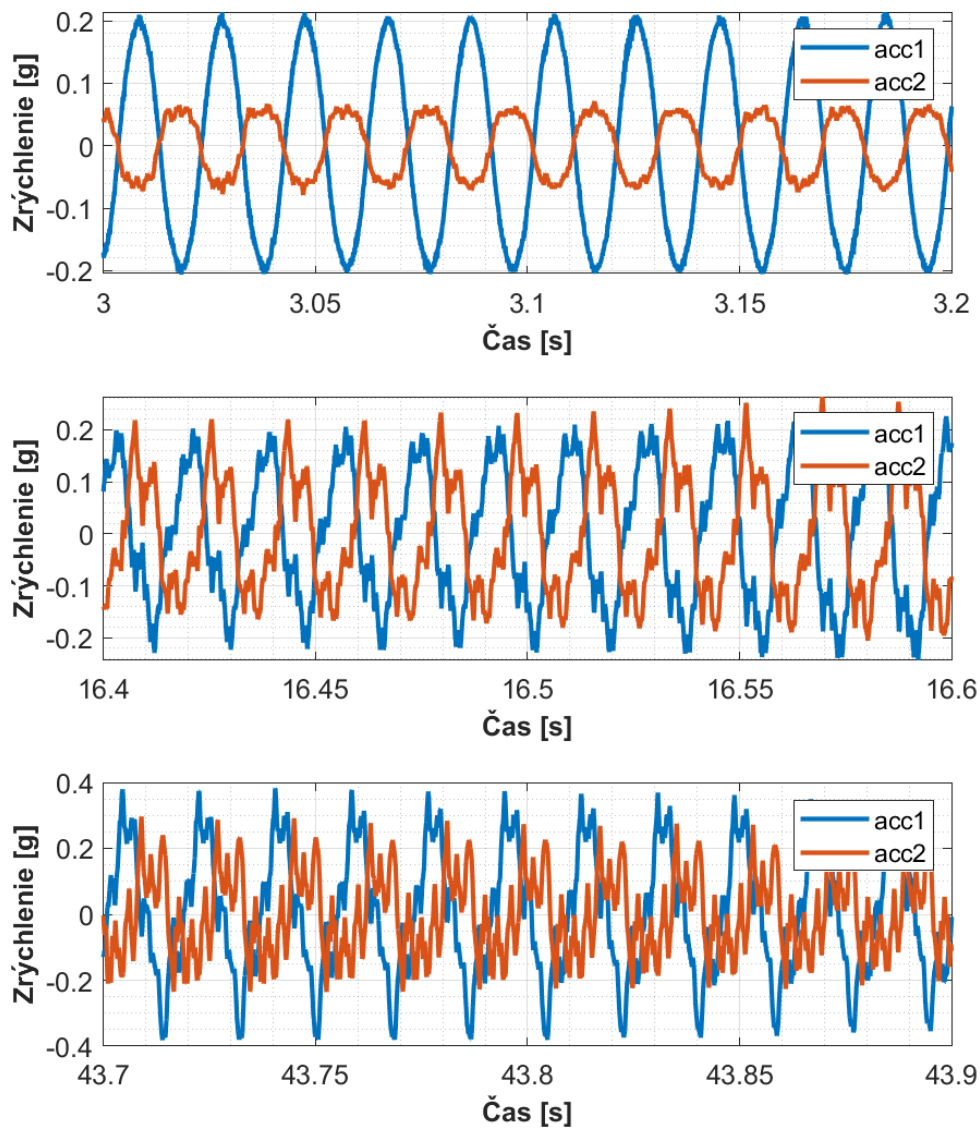
Obr. 8.18: Napätovo frekvenčná charakteristika pri zrýchlení 20 mg

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĽ

Už pri prvom pohľade na uvedený graf je možné pozorovať viaceré menšie napätové špičky v oboch prípadoch. Preto bol pre porovnanie vykreslený teoretický priebeh amplitúdovej charakteristiky pomocou vzťahu [18]

$$x = \frac{F}{(m_{red} + m_{pridaná}) \cdot \sqrt{(\omega^2 + \Omega^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega^2 \cdot \Omega^2}} \quad (8.3)$$

Po preložení nameraných hodnôt teoretickou krivkou bolo opäť podozrenie na chybu spôsobenú zdrojom vibrácií. Preto bol opäť vykreslený priebeh meraných zrýchlení.



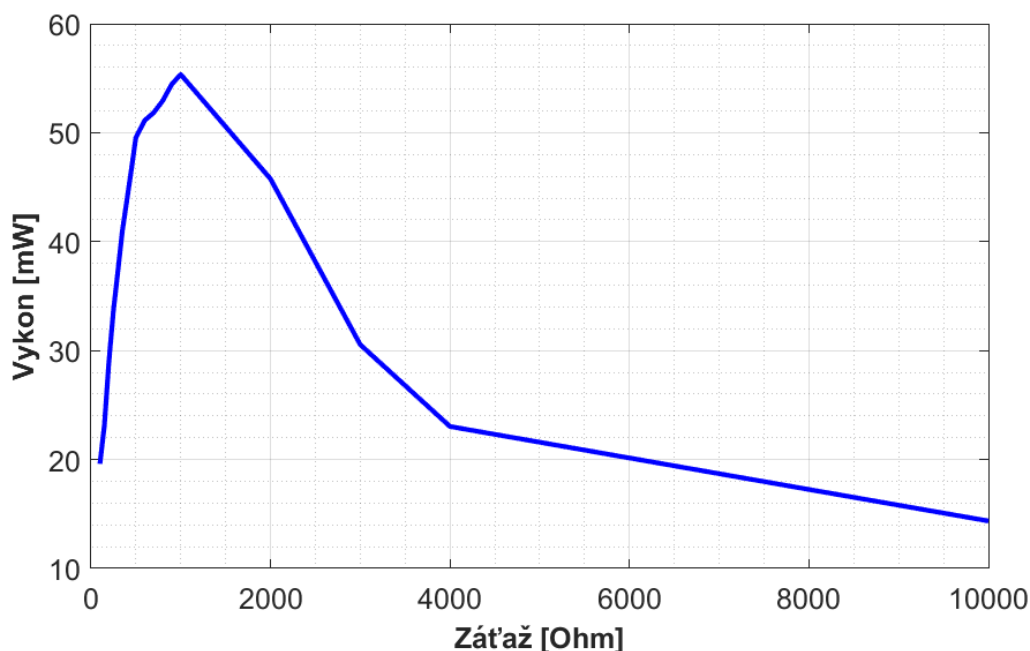
Obr. 8.19: Priebeh zrýchlení meraných akcelerometrami v rozdielnych časových oblastiach

Poradie grafov na vyššie uvedenom obrázku je nasledovné. Prvý graf vykresľuje namerané zrýchlenia v oblasti mimo rezonanciu. Druhý graf vykresľuje hodnoty z akcelerometrov v oblasti rezonancie pri meraní širokého pásma. V poslednom grafe sú uvedené hodnoty zrýchlení z akcelerometrov v rezonancii pri meraní s užším pásmom frekvencie. Opäť je zreteľné, že dochádza k nie úplne vhodnému chovaniu zdroju vibrácií čo viedlo k spomínaným duplicitným napätovým špičkám.

Pri lepšom priblížení grafov bolo možné určiť potrebné hodnoty. Pri širšom pásme boli vyčítané z grafu hodnoty rezonančnej frekvencie a napätových amplitúd pre stúpajúci krok ako  $f = 55.6 \text{ Hz}$  a  $U_i = 9.3 \text{ V}$  a pre klesajúci krok  $f = 55.4 \text{ Hz}$  a  $U_i = 9.6 \text{ V}$ . V opakovanom meraní s užším frekvenčným pásmom a pomalším prejazdom boli určené hodnoty pre stúpajúci krok frekvencie  $f = 55.6 \text{ Hz}$  a  $U_i = 9.4 \text{ V}$  a pre klesajúci krok  $f = 55.5 \text{ Hz}$  s hodnotou amplitúdy  $U_i = 9.5 \text{ V}$ .

### 8.2.3 Meranie s odporovou záťažou

Posledným meraním predstavovaného mikro zberaču bolo meranie s meniacou sa odporovou záťažou na výstupe. K zmene odporu bola využitá odporová dekáda na ktorej je možné veľmi jednoducho meniť odpor počas merania. Frekvencia vibrácií bola nastavená na  $f = 55.5 \text{ Hz}$  a zrýchlenie opäť na hodnotu  $20 \text{ mg}$ . Uvedenú charakteristiku je možné vidieť na grafe na obrázku 8.20.



Obr. 8.20: Pribeh výstupného výkonu v závislosti na meniacom sa odpore na záťaži

## 8 TESTOVANIE VYHOTOVENÉHO MIKRO ZBERAČU PRE ŽELEZNIČNÚ TRATĎ

Prie získanie výkonovej charakteristiky bolo potrebné merať výstupné napätie a zaznamenávať aktuálne hodnoty odporov. Následne bol výstupný výkon vypočítaný ako

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (8.4)$$

Z grafu je vidieť, že maximálny výkon je dosiahnutý pri odpore  $R = 1000 \Omega$  a bol vypočítaný ako  $P = 55.3 \text{ mW}$ . Celková kmitajúca hmotnosť je určená sčítaním redukovanej hmotnosti nosníku a hmotnosti kmitajúceho rámu ako  $m = 96 \text{ g}$ . S týmto údajom bolo možné určiť teoretickú hodnotu výkonu na 100 gramov kmitajúcej hmoty

$$P_{100} = \frac{P}{m} \cdot 100 = \frac{55.3}{96} \cdot 100 = 57.6 \text{ mW} \quad (8.5)$$

### Zhodnotenie testovania

Napriek tomu, že neboli podmienky na testovanie vždy ideálne bolo možné niekoľkými testami prezentovať funkčnosť predstaveného návrhu. Aj keď sa vlastná frekvencia mikro zberaču v niektorých meraniach nezhoduje s tou teoretickou, vykazuje navrhnutý mikro zberač skvelé výsledky. Príčina nezhody už bola popísaná a s najväčšou pravdepodobnosťou je na vine použitý materiál pre výrobu základne, ktorý pohltí určitú časť budenia.

## 9 Záver

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo navrhnúť a vyrobiť vhodný mikro zberač pre železničnú trať, ktorá sa nachádza konkrétne na Britských ostrovoch. K tomu aby tak mohlo byť účinené bolo najprv potrebné vytvoriť prehľad jak fyzikálnych princípov tak aj aktuálne dostupných riešení.

Rešerš energy harvesting technológií, v ktorej sú krátko popísane rôzne možnosti premeny vibrácií na elektrickú energiu ukázala, že najvhodnejším spôsobom premeny s aplikovaním na železničnej trati je pomocou elektromagnetickej indukcie. Takéto mikro zberače majú potenciál na vytvorenie bezúdržbových elektrických zdrojov. S týmito zisteniami bolo následne popísaných zopár aktuálne dostupných riešení elektromagnetických vibračných mikro zberačov.

Skôr než sa pristúpilo k návrhu, bol v ďalšom bode záverečnej práce popísaný vhodný matematický model. Tento model je založený na základných mechanických a elektrických vzťahoch popisujúcich jednotlivé závislosti parametrov vibračného mikro zberaču. K vhodnejšiemu počiatočnému odhadu a nastaveniu jednotlivých hodnôt premenných boli využité poznatky z vlastnej bakalárskej práce, kde bol navrhovaný vibračný mikro zberač s planžetovým uložením.

S vytvoreným matematickým modelom v prostredí Matlab-Simulink, bolo analyzované správanie mikro zberaču na základe vstupných nameraných dat. Keďže výstupom z matematického modelu bolo veľké množstvo hodnôt, tak sa najvhodnejším spôsobom ako reprezentovať výsledky, ukázal 3D graf. Z analýz vyplynulo, že pre aplikovanie predkladaného mikro zberaču na zmienenu trať je vhodné naladiť vlastnú frekvenciu a odporovú záťaž v rozmedzí optimálneho pásma. Pre frekvenciu bolo toto pásmo určené ako 65 až 75 Hz a pre odpor na záťaži od 150 do približne až 1200  $\Omega$ .

Nakoľko je tuhosť kľúčovým parametrom, tak práve jej bola venovaná značná časť predkladanej diplomovej práce. V kapitole, ktorá prejednáva tuhosť systému boli preverené dva rôzne spôsoby jej realizácie. Ako sa ukázalo, vytvorenie tuhosti pomocou odpudzujúcich sa magnetov nebolo vhodným riešením, a preto bol zvyšok kapitoly zameraný na mechanickú tuhosť vytvorenú pomocou nosníku. Ukázalo sa, že nosník je vyhovujúcim riešením, keďže za jeho pomoci je možné veľmi jednoducho dosiahnuť zmeny vlastnej frekvencie. Realizácia tuhosti a konštrukčný návrh mikro zberaču boli riešené simultánne, tým pádom sa jednalo o mechatronický prístup, kedy bolo potrebné zvládnuť viaceré úkony zároveň.

Ukázalo sa, že predkladaný návrh má veľkú výhodu v laditeľnosti vlastnej frekvencie a zároveň veľké plus z ekonomického hľadiska.

S vyrobenou a funkčnou vzorkou elektromagnetického vibračného mikro zberaču bolo možné pristúpiť k poslednej etape záverečnej práce a to konkrétne k otestovaniu a overeniu jeho parametrov. Vzhľadom k možnostiam a vybaveniu laboratória bolo demonštrovaných niekoľko testov predkladaného návrhu. Hypotéza o zmene vlastnej frekvencie

## 9 ZÁVER

bola demonštrovaná v jednom z testov a ukázala sa ako správna. Zároveň sa jednotlivé namerané hodnoty vlastnej frekvencie so zmenou dĺžky nosníka zhodovali takmer presne s teoretickým výpočtom. Ďalšími meraniami bolo zistené, že do značnej miery ovplyvňuje vlastnú frekvenciu, a celkovo priebeh výstupného napätia, spôsob uchytenia mikro zberaču k pevnej podložke. Tento fakt je možné vysvetliť tým, že základňa bola vyrobená z plastového materiálu PLA. Z meraní vyplynulo, že ak by bola základňa vyrobená z hutnejšieho materiálu, mohlo byť dosiahnuté omnoho lepších výstupných hodnôt.

Predkladaný návrh sa dá hodnotiť ako úspešne vyrobený a otestovaný. Výstupom záverečnej práce je vyrobený a funkčný prototyp elektromagnetického vibračného mikro zberaču. Taktiež je k práci pridaných niekoľko výpočtových skriptov, pomocou ktorých je možné analyzovať vstupné vibrácie namerané z akejkoľvek železničnej trate a následne tomu prispôbiť vlastnú frekvenciu mikro zberaču jednoduchou zmenou dĺžky nosníku.

# Literatúra

- [1] Kulah H. a Najafi K., *Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications*. IEEE Sensors Journal, vol. 8, no. 3, pp. 261-268, March 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.917125.
- [2] Roundy S., Wright P., Rabaey J., *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes*. Computer Communications. Volume 26, Issue 11. 2003. Pages 1131-1144. ISSN 0140-3664. [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7) .
- [3] Hadaš Z., *Energy Harvesting Technologies*. Kurz: Chytré technologie a materiály v mechatronice (RAE-A). VUT Brno, Fakulta Strojní. September 2021. Brno, Česká Republika.
- [4] Roundy S., *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion* The University of California, Berkley, 2003.
- [5] Finanger R., *What is energy harvesting?*. onio.com[online]. 21. január 2020 [cit. 2022-3-8]. Dostupné z: <https://www.onio.com/article/what-is-energy-harvesting.html>
- [6] Hadaš Z., *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Dizertačná práca. FSI, VUT v Brne. 2007
- [7] El-Sayed A., Tai K., Biglarbegian M. a Mahmud S., *A survey on recent energy harvesting mechanisms*. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). 2016, Strany 1-5. doi: 10.1109/CCECE.2016.7726698.
- [8] ElectronicsTutorials. *Electromagnetic Induction*. Electromagnetism - 5. Electromagnetic Induction [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>
- [9] Nave C. R., *Faraday's Law*. HyperPhysics [online]. 2017 [cit. 2022-3-11]. Georgia State University. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw.html>
- [10] IDC Technologies. *Quantum Mechanics-Electromagnetic induction* . Resources - Technical References - Electrical Engineering-Technical References [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/Quantum\\_Mechanics\\_Electromagnetic\\_Induction.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Quantum_Mechanics_Electromagnetic_Induction.pdf)
- [11] Park H., Kim J., *Electromagnetic induction energy harvester for high-speed railroad applications*. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. 3, 41-48 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0006-6>

## LITERATÚRA

- [12] Pan Y., Liu F., Jiang R., Tu Z. a Zuo L., *Modeling and onboard test of an electromagnetic energy harvester for railway cars*. Applied Energy. 2019. Strany 568-581. ISSN 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.182
- [13] Bradai S., Naifar S., Viehweger C. a Kanoun O., *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting for Railway Applications*. MATEC Web Conf. 2018. DOI: 10.1051/matec-conf/201814812004
- [14] Pan Y., Lin T., Qian F., Liu Ch., Yu J., Zuo J. a Zuo L., *Modeling and field-test of a compact electromagnetic energy harvester for railroad transportation*. Applied Energy. Vydanie 247. 2019. Strany 309-321. ISSN 0306-2619 DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.051
- [15] Gao M., Wang P., Cao Y., Chen R. a Cai D., *Design and Verification of a Rail-Borne Energy Harvester for Powering Wireless Sensor Networks in the Railway Industry*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. ročník 18, číslo 6. Strany 1596-1609. Jún 2017. DOI: 10.1109/TITS.2016.2611647.
- [16] Wang J. J., Penamalli G. P. a Zuo L., *Electromagnetic energy harvesting from train induced railway track vibrations*. Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications. 2012. Strany 29-34. DOI: 10.1109/MESA.2012.6275532.
- [17] Hadaš Z., Rubeš O., Kšica F. a Chalupa J., *Kinetic Electromagnetic Energy Harvester for Railway Applications-Development and Test with Wireless Sensor*. SENSORS, 2022, roč. 22, č. 3, s. 1-19. ISSN: 1424-8220.
- [18] Houfek L., *Dynamika; Lineární kmitání s jedním stupněm volnosti*. Kurz: Dynamika II - lineární kmitání (R2D). VUT Brno, Fakulta Strojní. September 2020. Brno, Česká Republika.
- [19] Rubeš O., *Nelineární alternativní zdroje energie*. Brno, 2022. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [20] Reichl, J. *Částice s nábojem v magnetickém poli*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2022-04-15]. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/293-castice-s-nabojem-v-magnetickem-poli>
- [21] Beňo M., *Návrh vibračního generátoru s planžetovým uložením*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124766>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Rubeš.
- [22] VUT Brno. *7. Základní formulace lineární PP. 7.3. Obecné věty lineární pružnosti* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://beta.fme.vutbr.cz/cpp/texty/p07.pdf>

# Zoznam obrázkov

3.1	Okolité zdroje energie [5] . . . . .	12
3.2	Schematický nákres elektromagnetického generátoru . . . . .	14
3.3	Elektromagnetická indukcia na princípe pohybujúceho sa magnetu [8] . . .	16
4.1	Predstavený EH pre vysoko-rýchlostné vlaky. (Prebrané z [11]) . . . . .	17
4.2	Elektromagnetický EH s umiestnením na koľaj. (Prebrané z [14]) . . . . .	18
4.3	Koľajnicový mikro zberač s magnetom na pružine. (Prebrané z [15]) . . . .	19
4.4	Ilustrácia predstaveného konceptu Wang s kolektívom. (Prebrané z [16]) .	19
4.5	Výstupné napätie z generátoru pri výchylke 6.35 mm (Prebrané z [16]) . .	20
4.6	Výstupné napätie z generátoru pri výchylke 12.7 mm (Prebrané z [16]) . .	20
4.7	Predstavený návrh KEH s uložením na vlakové pražce (Prebrané z [17]) .	21
4.8	Graf závislosti špičkového napätia na frekvencii (Prebrané z [17]) . . . . .	23
4.9	Graf závislosti špičkového výkonu na frekvencii (Prebrané z [17]) . . . . .	23
4.10	Výstupný výkon pre reálne namerané dáta (Prebrané z [17]) . . . . .	23
5.1	Schéma elektromagnetického vibračného mikro zberaču . . . . .	26
5.2	Konštrukčný návrh vibračného generátoru s planžetovým uložením [21] . .	29
6.1	Namerané vstupné hodnoty zrýchlení niekoľkých vlakov . . . . .	31
6.2	Chovanie mikro zberaču pri prejazde Train 204 . . . . .	32
6.3	Myšlienková mapa analyzovania vhodných parametrov . . . . .	33
6.4	Štruktúra ukladania parametrov . . . . .	34
6.5	Plošný graf výstupného výkonu . . . . .	34
6.6	Plošný graf výstupného výkonu; Výkonovo frekvenčná charakteristika . . .	35
6.7	Plošný graf výstupného výkonu; Výkonovo záťažová charakteristika . . . .	35
6.8	Početnosť vlakov pre maximálny priemerný výkon . . . . .	36
7.1	Náčrt realizácie magnetickej tuhosti . . . . .	38

## ZOZNAM OBRÁZKOV

7.2	Časť mikro zberaču so znázornením zmeny rozmerov magnetov . . . . .	39
7.3	Náčrt magnetickej pružiny s jedným a dvomi pohyblivými magnetmi . . . . .	40
7.4	Závislosť sily na výchylke magnetov . . . . .	40
7.5	Porovnanie výstupného výkonu s nastavením rozličných možných výchyliek . . . . .	41
7.6	Závislosť výstupného výkonu na veľkosti vertikálnej medzery medzi magnetmi . . . . .	41
7.7	Náčrt realizácie mechanickej tuhosti . . . . .	43
7.8	Náčrt pre výpočty rozmeru nosníka . . . . .	43
7.9	Závislosť tuhosti planžety na hrúbke prierezu . . . . .	45
7.10	Závislosť dĺžky planžety na vlastnej frekvencii . . . . .	46
7.11	Náčrt magnetického obvodu . . . . .	47
7.12	Výsledky magnetickej analýzy . . . . .	47
7.13	Graf závislosti magnetickej indukcie na výške magnetov vo vzduchovej medzere . . . . .	48
7.14	Graf závislosti magnetickej indukcie na šírke konzoly uprostred konzoly . . . . .	49
7.15	Uloženie magnetického obvodu a s cievkou . . . . .	49
7.16	Spojenie medzi nosníkom a základňou mikro zberaču . . . . .	50
7.17	Posuv nosníku a cievky . . . . .	50
7.18	Konštrukčný návrh vibračného mikro zberaču pre železničnú trať . . . . .	51
7.19	Vyrobený mikro zberač . . . . .	52
8.1	Časť mikro zberaču pri prvom meraní . . . . .	54
8.2	Naznačená zmena dĺžky nosníku . . . . .	54
8.3	Amplitúdovo časová charakteristika pre každú dĺžku nosníka . . . . .	55
8.4	Závislosť frekvencie na dĺžke nosníku . . . . .	56
8.5	Priemerné hodnoty faktoru kvality v závislosti na dĺžke nosníka . . . . .	57
8.6	Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - 1. spôsob uchytenia . . . . .	58
8.7	Časový priebeh napätia pri prvom spôsobe uchytenia mikro zberaču . . . . .	58
8.8	Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - 2. spôsob uchytenia . . . . .	59
8.9	Časový priebeh napätia pri druhom spôsobe uchytenia mikro zberaču . . . . .	60
8.10	Časový priebeh mechanického faktoru kvality pri druhom spôsobe uchytenia mikro zberaču . . . . .	60
8.11	Meranie voľnej odozvy mikro zberaču - uchytenie pomocou skrutiek . . . . .	61

## ZOZNAM OBRÁZKOV

8.12	Časový priebeh napätia pri uložení pomocou skrutiek M6 . . . . .	62
8.13	Časový priebeh mechanického faktoru kvality pri tretom spôsobe uchytenia mikro zberaču . . . . .	62
8.14	Závislosť mechanického faktoru kvality na napätí . . . . .	63
8.15	Osadenie mikro zberaču na zdroj vibrácií . . . . .	64
8.16	Napätovo frekvenčná charakteristika pri zrýchlení 10mg . . . . .	65
8.17	Časť zaznamenaného zrýchlenia z akcelerometrov v oblasti rezonancie mikro zberaču . . . . .	65
8.18	Napätovo frekvenčná charakteristika pri zrýchlení 20 mg . . . . .	66
8.19	Priebeh zrýchlení meraných akcelerometrami v rozdielnych časových oblastiach . . . . .	67
8.20	Priebeh výstupného výkonu v závislosti na meniacom sa odpore na záťaži .	68