



# 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

## NELINEÁRNÍ ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE

NONLINEAR ENERGY HARVESTING DEVICES

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Rubeš

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2022

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vibračním mikro sběračem energie, tedy zařízením, které kinetickou energii vibrací přeměňuje na elektrickou energii. Jedná se zpravidla o zařízení o rozměrech do deseti centimetrů s výstupním výkonem v řádu miliwattů. Takový výkon je dostatečný pro napájení současných komunikačních modulů a lze ho tedy použít pro různé bezdrátové senzory s využitím například pro internet věcí. Stávající zařízení jsou založena na lineárním oscilátoru a mají jen úzké pásmo budících frekvencí, ve kterých efektivně vyrábějí elektrickou energii. Rozšíření tohoto frekvenčního pásma s pomocí nelinearit je hlavním cílem této práce. Vznikne tak výsledné nelineární zařízení, které efektivně pracuje s větším rozsahem budících frekvencí a umožňuje tak širší využití v technické praxi.

## **Klíčová slova**

Piezoelektrický jev, elektromagnetická indukce, vibrační mikro sběrač, nelineární oscilátor, magnetická pružina.

## **Abstract**

This thesis is focused on vibration energy harvester, which is a device converting kinetic energy of vibrations into electrical energy. The approximate dimensions of the device are ten centimeters, and the output power is in milliwatts. A device that generates such amount of power can function as a power source for communication modules and can be used for wireless sensors, which can be utilized for example in the Internet of Things. Existing devices are based on a simple linear oscillator, but they have a narrow operating frequency bandwidth, where they can operate effectively. The bandwidth extension of vibration energy harvesters using nonlinear characteristics is the main aim of this thesis. It leads to a design of a nonlinear device with wide operating frequency bandwidth that provides higher implementation in industry.

## **Key words**

Piezoelectric effect, electromagnetic induction, vibration energy harvester, nonlinear oscillator, magnetic spring.

RUBEŠ, Ondřej. *Nelineární alternativní zdroje energie*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137874>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

## Čestné prohlášení

Já, Ondřej Rubeš, prohlašuji, že jsem dizertační práci *Nelineární alternativní zdroje energie* vypracoval samostatně, s radami vedoucího práce doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně dne 18. 1. 2022

.....  
Ondřej Rubeš

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D., za jeho vedení po celou dobu doktorského studia, za všechny rady jak v oblasti výzkumné, tak v oblasti plnění formálních kritérií.

Velký dík patří samozřejmě i mé ženě a dětem, že se mnou měli tu trpělivost a podporovali mě na cestě k dokončení této práce.

Zvláštní dík zde věnuji i svému dědovi, prof. Ing. Václavu Legátovi, DrSc., který má velkou část zásluh na mém vztahu k technice a který mě pochopitelně též motivoval k akademické práci, avšak kvůli covidu je toto poděkování už jen in memoriam.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům i všem svým blízkým, kteří mě v životě vedli, motivovali a ovlivňovali, neboť díky nim všem jsem došel až na konec doktorského studia s dokončenou dizertační prací.

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Formulace problému a cílů dizertační práce.....	10
3	Současný stav poznání.....	11
3.1	Základní typy přeměny energie vibrací na energii elektrickou.....	11
3.1.1	Elektromagnetický vibrační mikro sběrač energie.....	11
3.1.2	Piezoelektrický vibrační mikro sběrač energie.....	12
3.1.3	Hybridní vibrační mikro sběrač energie.....	15
3.2	Používané druhy nelinearit.....	15
3.2.1	Mechanický doraz.....	15
3.2.2	Magnetická levitace.....	16
3.2.3	Přídavná magnetická tuhost.....	18
3.2.4	Varianty s bistabilním chováním.....	20
3.2.5	Vlastní nelineární tuhost mikro sběrače.....	23
3.2.6	Další atypická řešení.....	26
4	Základní srovnání lineárního a nelineárního oscilátoru.....	28
4.1	Změna amplitudy buzení.....	29
4.2	Změna tlumení.....	31
5	Vliv elektrického tlumení na obecný nelineární mikro sběrač.....	33
5.1	Model obecného nelineárního vibračního mikro sběrače.....	33
5.2	Elektrický výkon vibračního mikro sběrače.....	34
5.3	Optimální elektrické tlumení.....	36
5.4	Závěry z vlivu elektrického tlumení na výkon.....	38
6	Obecný návrh magnetů pro nelineární tuhost oscilátoru.....	39
6.1	Shodná velikost všech tří magnetů.....	40
6.1.1	Změna velikosti magnetů při zachování čtvercového průřezu.....	40
6.1.2	Změna šířky magnetů.....	41
6.1.3	Změna výšky magnetů.....	42
6.2	Různá velikost magnetů.....	43
6.2.1	Změna velikosti pevných magnetů.....	43
6.2.2	Změna velikosti pohyblivého magnetu.....	44
6.2.3	Změna výšky pevných magnetů.....	45
6.2.4	Změna výšky pohyblivého magnetu.....	46
6.2.5	Změna šířky pevných magnetů.....	47
6.2.6	Změna šířky pohyblivého magnetu.....	48
6.3	Shrnutí poznatků potřebných k návrhu magnetů pro nelineární tuhost.....	49
7	Model, realizace a měření piezoelektrického vibračního mikro sběrače.....	50

7.1	Model piezoelektrického vibračního mikro sběrače .....	50
7.2	Způsoby určení parametrů piezoelektrického vibračního mikro sběrače .....	54
7.2.1	Určení elektromechanického koeficientu z elektrického napětí a mechanické výchylky .....	54
7.2.2	Určení elektromechanického koeficientu z vlastní frekvence při různých elektrických zátěžích.....	55
7.2.3	Určení elektromechanického koeficientu z tlumení při různých elektrických zátěžích	56
7.2.4	Prosté posouzení dostatečné hodnoty elektrického koeficientu z maximálního elektrického tlumení.....	57
7.3	Realizace a měření vzorků piezoelektrických vibračních mikro sběračů .....	57
7.3.1	Komerční mikro sběrač Midé .....	57
7.3.2	Vlastní mikro sběrač s piezo vrstvami v módu 33 .....	58
7.3.3	Vlastní mikro sběrač s piezo vrstvami v módu 31 .....	59
7.3.4	Závěry z měření použitých vzorků .....	60
7.4	Monostabilní piezoelektrický vibrační mikro sběrač .....	62
7.5	Bistabilní piezoelektrický vibrační mikro sběrač.....	63
8	Model, realizace a měření elektromagnetického vibračního mikro sběrače.....	66
8.1	Model elektromagnetického vibračního mikro sběrače .....	66
8.2	Návrh a výroba testovacího vzorku.....	69
8.2.1	Uložení pohyblivého ramene .....	69
8.2.2	Magnetický obvod pro cívku .....	70
8.2.3	Cívka.....	70
8.2.4	Magnety vytvářející magnetickou pružinu .....	71
8.2.5	Nosný rám a pohyblivé rameno .....	72
8.3	Testování vyrobeného funkčního vzorku.....	73
8.3.1	Určení vlastní frekvence a vlastního tlumení z volné odezvy .....	73
8.3.2	Harmonické buzení slabým zdrojem vibrací .....	77
8.3.3	Harmonické buzení dostatečně silným zdrojem vibrací .....	79
9	Bezdrátový senzor vibrací napájený elektromagnetickým vibračním mikro sběračem	84
10	Přínosy dizertační práce.....	86
11	Závěr .....	87
12	Seznam použitých zdrojů.....	88
13	Seznam vlastních publikací .....	94



# 1 Úvod

V poslední době se stále více objevují snahy o zvyšování efektivity a bezpečnosti technických zařízení. Nutným předpokladem pro tato vylepšení je monitorování provozu samotných zařízení i okolních podmínek. Tento předpoklad s sebou přináší potřebu velkého množství senzorů, které by snímaly měřené veličiny a odesílaly je dále ke zpracování. Je pochopitelné, že ideální varianta takového senzoru je autonomní, bez nutnosti připojování kabeláží, a tedy bez externího napájení. Pro napájení autonomních senzorů lze samozřejmě použít baterie. Ty mají však nevýhodu v omezené životnosti. Po jejich vybití je nutná výměna, a tak je autonomie těchto zařízení pouze dočasná. U některých případů to nemusí vadit, avšak je jasné, že zařízení, které by mělo vlastní zdroj elektrické energie a dokázalo by pracovat bez údržby několik let, by bylo vhodnější než zařízení s bateriemi, které je třeba pravidelně měnit.

Jako náhrada za baterii lze využít alternativní zdroj energie v angličtině nazývaný „energy harvester“ nebo „energy scavenger“. Takový zdroj využívá energie, která se nachází v okolí a není nijak využita. Může se jednat například o energii tepelnou, elektromagnetického záření, proudění vzduchu či vody nebo mechanické vibrace. Tato práce se zabývá posledně zmiňovaným, tedy zařízením, které z mechanických vibrací dokáže vyrobit elektrickou energii. V angličtině je ustálený název pro toto zařízení „vibration energy harvester“. V češtině se nabízí pojem vibrační mikro sběrač energie.

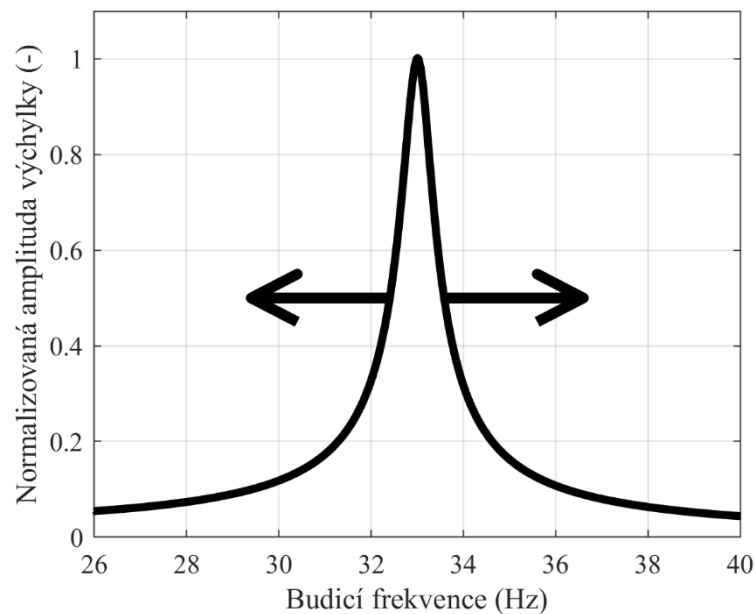
Předmětem této práce je vývoj vibračního mikro sběrače energie, který přeměňuje kinetickou energii vibrací na elektrickou energii. Jádrem zařízení je mechanický oscilátor zesilující výchylku vibrací v rezonanci. Tyto zesílené vibrace jsou pomocí různých fyzikálních principů převedeny na elektrickou energii a ta je dále ukládána nebo rovnou využívána pro senzory a komunikační zařízení. Jako fyzikální princip přeměny energie vibrací na elektrickou energii je v této práci využita elektromagnetická přeměna a piezoelektrická přeměna. Tyto principy přeměny jsou fyzikálně dobře popsány a jejich vývoj se prakticky omezuje jen na konstrukční uspořádání.

Stěžejní část zařízení, tedy mechanický oscilátor s jedním stupněm volnosti, který má v tradičním uspořádání lineární tuhost, má jednu rezonanční frekvenci a kolem ní poměrně úzké pracovní pásmo, ve kterém kmitá s velkou výchylkou. Vibrační mikro sběrač energie v tomto úzkém pásmu rezonance poskytuje efektivní zdroj energie a mimo něj je jeho výkon prakticky nulový.

Cílem této dizertační práce je analyzovat možnosti pro rozšíření pracovního pásma a tím zvýšení výkonu pro různé buzení. Zde se nabízí využití nelineárních parametrů mechanického oscilátoru a připojené elektrické zátěže, které přinesou dostatečný výkon pro autonomní elektroniku i mimo původní úzké rezonanční pásmo.

## 2 Formulace problému a cílů dizertační práce

Vibrace v technické praxi mají zpravidla proměnlivou frekvenci i amplitudu. Pro efektivní využití těchto vibrací jako zdroje elektrické energie je zapotřebí aby vibrační mikro sběrač pracoval v širokém spektru budících vibrací. Proto je vhodné využití vibračního mikro sběrače založeného na nelineárním oscilátoru, který oproti lineárnímu poskytuje širší pásmo pracovní frekvence. Schematicky je toto rozšíření zobrazeno na Obr. 1.



*Obr. 1 Amplitudo-frekvenční charakteristika lineárního oscilátoru a ilustrace požadovaného rozšíření pásma*

Cílem práce je vyvinout metodiku návrhu nelineární tuhosti a optimální elektrické zátěže tak, aby byl potenciál nelineární tuhosti co nejvíce využit a odebíraný výkon byl co nejvyšší. Celou problematiku je potřeba řešit komplexně jak v doméně mechanické, tak v doméně elektrické včetně jejich vzájemné interakce.

Konkrétní dílčí cíle práce jsou tyto:

- Analýza obecného nelineárního oscilátoru
- Analýza vlivu elektrické zátěže na výstupní výkon a šířku pracovního pásma
- Metodika návrhu magnetů pro nelineární tuhost (monostabilní i bistabilní)
- Realizace piezoelektrického nelineárního vibračního mikro sběrače
- Realizace elektromagnetického nelineárního vibračního mikro sběrače
- Zhodnocení vhodnosti těchto zdrojů pro napájení potřebné elektroniky.

## 3 Současný stav poznání

V oblasti vibračních mikro sběračů energie probíhá vývoj od druhé poloviny devadesátých let. V roce 1996 se objevuje článek [1] pojednávající o výrobě elektrické energie z vibrací. Zařízení je zde nazýváno mikro elektrický generátor jeho rozměry jsou 5x5x1 mm a predikovaný výkon je 1  $\mu\text{W}$  při buzení 70 Hz. Jedná se však pouze o teoretickou studii. V témže roce se objevuje rozbor [2] pojednávající o možnostech generátorů pro použití na člověku. Jsou zde rozebrány možnosti zisku energie od využití tepla, přes využití dechu nebo tepu až po sílu došlapu při chůzi. Jedná se opět pouze o teoretickou studii zakončenou odhadem maximální získatelné energie z člověka 5-8 W.

V následujícím roce 1997 již přichází první experiment. Na základě studie z předchozího odstavce [1] je vyroben laboratorní mikro generátor [3], který při frekvenci 4,4 kHz a amplitudě budícího zrychlení 40 g generuje výstupní výkon 0,3  $\mu\text{W}$ . Tato data ukazují, že hledání optimální konfigurace bylo na počátku opravu náročné.

V roce 1998 se již objevuje anglický pojem „energy harvesting“ a sice v práci [4], která se zabývá výrobou elektrické energie z chůze za pomoci deformačního členu v podrážce boty. Výzkumný tým dosahuje průměrného výstupního výkonu 0,23 W, což je slušný výsledek, avšak je dosažen za pomoci rozměrné konstrukce v podrážce boty. V témže roce se objevuje vibrační mikro sběrač energie jako zdroj pro autonomní zařízení na zpracování signálu. Je navržen na výrobu 400  $\mu\text{W}$  elektrické energie, což by mělo být dostačující pro napájení obvodu pro zpracování signálu.

Na přelomu tisíciletí se již objevuje více článků, zabývajících se toto tematikou. Jako příklad může být uveden vývoj elektromagnetického mikro sběrače energie [5] a vývoj piezoelektrického mikro sběrače [6]. Od nového tisíciletí tedy nastává vývoj mikro sběračů elektrické energie na mnoha univerzitách a v mnoha různých směrech [7–10]. V této práci je řešeno využití energie z vibrací, tedy vibrační mikro sběrače energie. Z této kategorie jsou nejdůležitější dva principy přeměny a sice elektromagnetický a piezoelektrický. Tyto dva principy budou v následujícím textu stručně představeny a dále uvedeny známé koncepce využívající nelineárního přístupu.

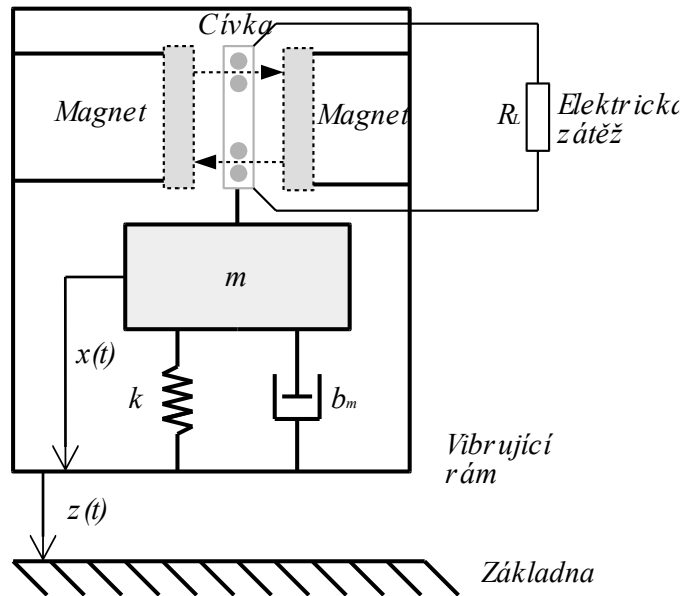
### 3.1 Základní typy přeměny energie vibrací na energii elektrickou

V této kapitole budou stručně představeny dva základní typy přeměny energie vibrací na energii elektrickou, tedy dva základní typy vibračních mikro sběračů energie.

#### 3.1.1 Elektromagnetický vibrační mikro sběrač energie

Elektromagnetický vibrační mikro sběrač využívá principu elektromagnetické indukce, kdy se cívka pohybuje v magnetickém poli a indukuje se v ní napětí [11]. Je to princip obdobný jako v dynamu nebo synchronním generátoru s tím rozdílem, že nedochází k rotaci cívky (nebo magnetu) ale pouze k jejímu kmitání tam a zpět.

Schéma zobrazuje Obr. 2. Základní části mikro sběrače jsou vibrující rám a oscilující hmota  $m$ , která je k rámu připevněna pružinou s tuhostí  $k$  a jsou zde ztráty reprezentované tlumičem  $b$ . K přeměně energie vibrací na elektrickou energii slouží cívka, pohybující se v magnetickém poli. K cívce je potom připojena elektrická zátěž, kterou v základním modelu reprezentuje odpor. Mikro sběrač má výchylku vůči základnímu tělesu  $z$ , a kmitání oscilující hmoty vůči rámu je popsáno souřadnicí  $x$ .



Obr. 2 Schéma elektromagnetického vibračního mikro sběrače energie

Elektromagnetický mikro sběrač je popsán rovnicemi [12]:

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + BNli + kx = -m\ddot{z} \quad (1)$$

$$L_C \frac{di}{dt} + (R_C + R_L)i = BNl\dot{x} \quad (2)$$

Kde  $m$  je hmotnost oscilující hmoty,  $b_m$  je mechanické tlumení,  $B$  je průměrná hodnota magnetické indukce v oblasti, kde se nacházejí vodiče cívky,  $N$  je počet závitů cívky,  $l$  je aktivní délka jednoho závitu cívky,  $i$  je proměnný elektrický proud určený z druhé rovnice,  $k$  je tuhost pružiny,  $x$  je souřadnice oscilující hmoty vůči rámu,  $z$  je absolutní výchylka vibrujícího rámu,  $L_C$  je vlastní indukčnost cívky,  $R_C$  je vlastní odpor cívky a  $R_L$  je odpor připojené elektrické zátěže. Indukčnost cívky bývá natolik malá, že ji většina modelů považuje za nulovou.

Zatímco rovnice (1) je vlastně rovnicí mechanickou, rovnice (2) popisuje elektrickou doménu elektromagnetického mikro sběrače. Vazbu mezi těmito doménami popisuje právě člen  $BNl$ , který vystupuje v obou těchto rovnicích.

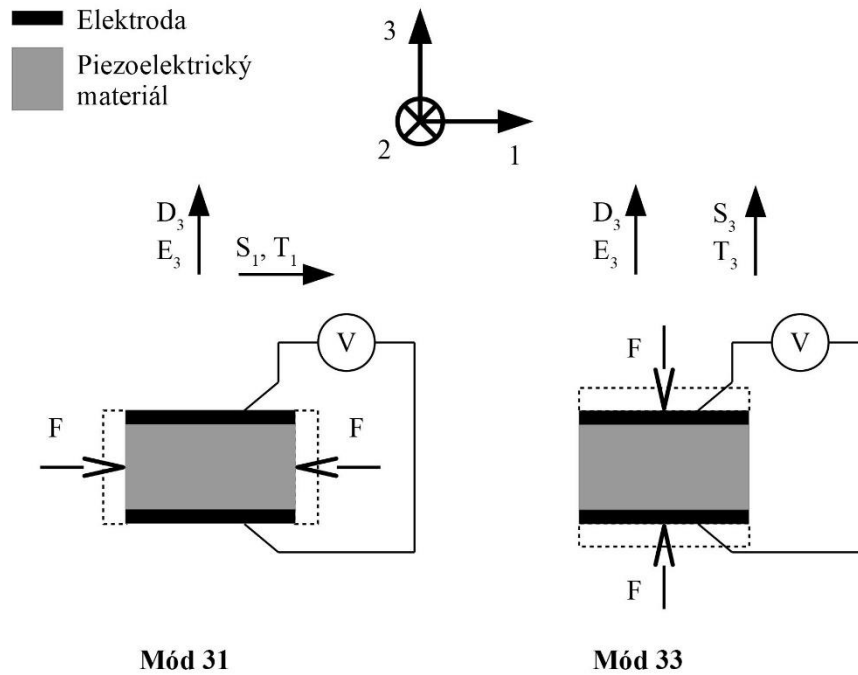
### 3.1.2 Piezoelektrický vibrační mikro sběrač energie

Piezoelektrický vibrační mikro sběrač energie využívá principu piezoelektrické přeměny energie, kdy deformací piezoelektrického materiálu vzniká proud, který lze využívat pro napájení elektroniky. Piezoelektrický jev je popsán rovnicemi [13]:

$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k \quad (3)$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (4)$$

Kde  $T_p$  je mechanické napětí,  $c_{pq}^E$  mechanická tuhost,  $S_q$  je mechanické přetvoření,  $e_{kp}$  piezoelektrická konstanta,  $E_k$  je intenzita elektrického pole,  $D_i$  je elektrická indukce,  $\epsilon_{ik}^S$  je permitivita a  $i,k,p,q$  jsou koeficienty směrů. Tyto rovnice popisují piezoelektrický jev v šesti směrech [13], nicméně pouze dva jsou důležité pro mikro sběr energie [14]: mód 33 a mód 31. Tyto módy jsou zobrazeny na Obr. 3. Je patrné že v módu 31 je materiál deformován podélně s elektrodami, zatímco v módu 33 je materiál deformován kolmo na elektrody.



Obr. 3 Módy 31 a 33, ve kterých jsou nejčastěji využívány piezoelektrické materiály.

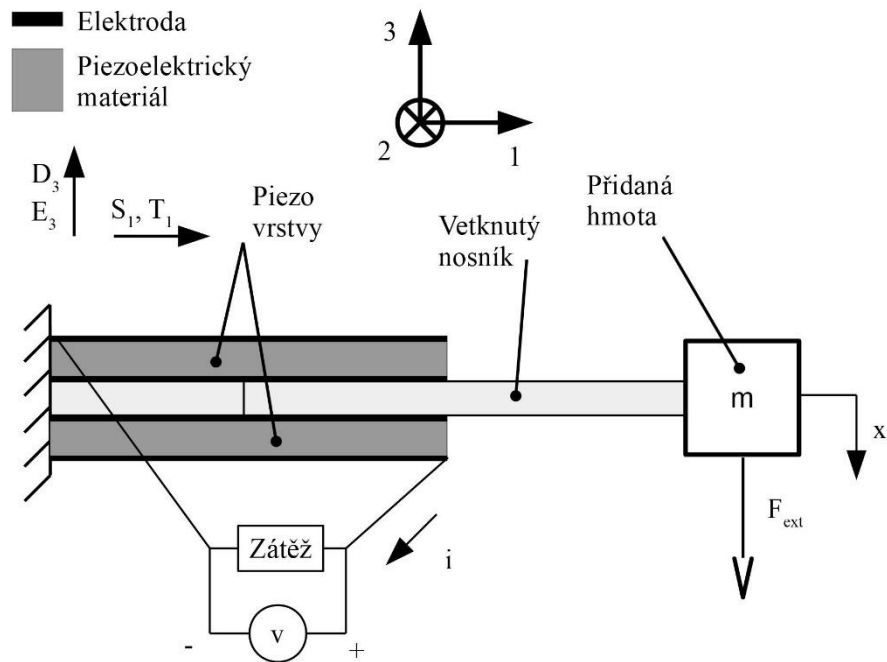
Nejčastější konfigurace piezoelektrického vibračního mikro sběrače je jednostranně vetknutý nosník [15–17] s přidanou hmotou na konci. Tato konfigurace je zobrazena na Obr. 4. Je zřejmé, že pro malé výchylky lze problém kmitání nosníku převést na ekvivalentní model kmitání s jedním stupněm volnosti. Takový model je popsán rovnicemi [18]:

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx + \Theta u = F_{ext} \quad (5)$$

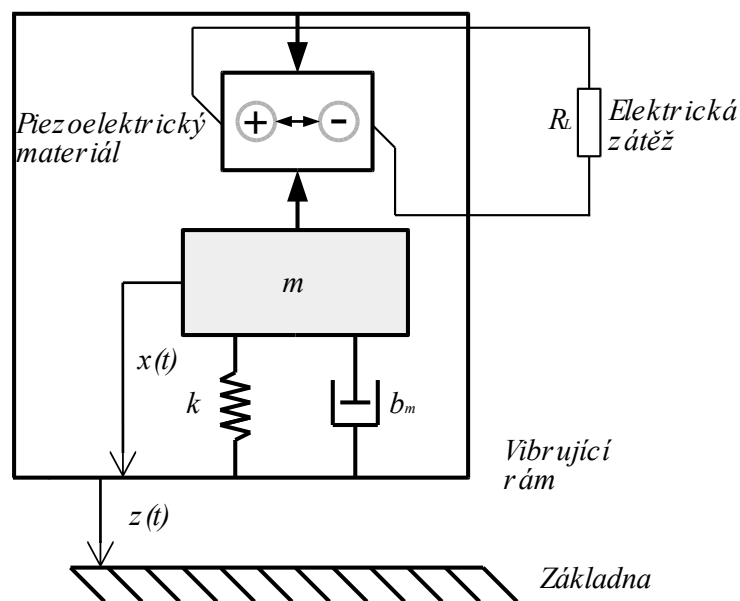
$$\dot{u} = \frac{1}{C}(\Theta\dot{x} - i) \quad (6)$$

Kde  $m$  je hmotnost oscilující hmoty,  $b_m$  je mechanické tlumení,  $k$  je tuhost pružiny,  $x$  je výchylka,  $F_{ext}$  je vnější budicí síla. V případě buzení vibracemi platí  $F_{ext} = -ma_v$ , kde

$a_v$  je zrychlení vibrujícího rámu. Piezoelektrický materiál se chová jako zdroj proudu a zároveň elektrody tvoří kondenzátor, je tedy nutné doplnit druhou elektrickou rovnicí (5), ve které  $u$  je napětí,  $C$  je elektrická kapacita piezovrstvy,  $\Theta$  je elektromechanický koeficient a  $i$  je proud odebíraný zátěží. Je tedy zřejmé, že model je analogický s modelem elektromagnetického vibračního mikro sběrače. Modifikované schéma je na Obr. 5. Oproti elektromagnetickému je rozdíl v principu přeměny. Kromě jiného fyzikálního principu je zde důležitý také jiný model. U piezoelektrického je třeba uvažovat i diferenciální rovnici elektrickou vlastního pieza. Jak bude ukázáno dále, tato vlastnost hraje silnou roli při hledání optimální elektrické zátěže.



Obr. 4 Schéma piezomateriálu v módu 31 na vibračním mikro sběrači



Obr. 5 Schéma zjednodušeného piezoelektrického vibračního mikro sběrače energie

Zatímco ke konstrukci elektromagnetického mikro sběrače postačuje sada magnetů, vlastnoručně namotaná cívka a mechanická konstrukce, konstrukce piezoelektrického vyžaduje využití nosníku s nanesenou piezovrstvou. Ten je možné zakoupit od několika komerčních firem, nebo se pokusit o výrobu ve specializované laboratoři. Proces je tak složitější než u elektromagnetického mikro sběrače.

### 3.1.3 Hybridní vibrační mikro sběrač energie

V literatuře se lze též setkat s variantami hybridních mikro sběračů, které kombinují elektromagnetickou a piezoelektrickou přeměnu energie. Takové zařízení můžeme nalézt např. v [19–22]. Ve zkratce zde však můžeme říct, že nepřinášejí lepší výsledky než mikro sběrače využívající pouze jeden z principů přeměny. Jejich výhodnost může být pouze v určitých specifických aplikacích, kterým se tato práce nevěnuje.

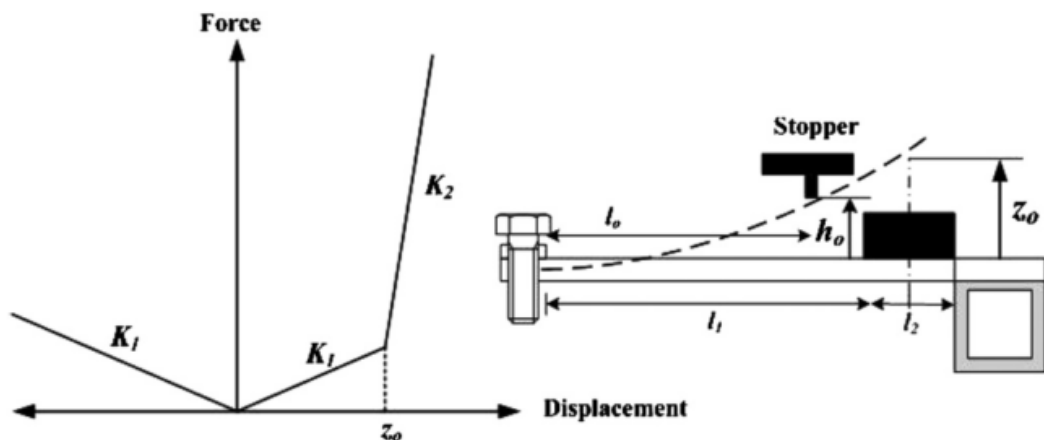
Naopak v rámci dizertačního studia vzniklo též srovnání, kdy je vhodné použít který princip přeměny, viz [V15]. Je však potřeba poznamenat, že tato studie přinesla mnoho zjednodušení a je třeba ji nebrat dogmaticky. Ve stručnosti lze říci, že piezoelektrický princip se hodí pro miniaturní zařízení a elektromagnetický naopak pro ty větší.

## 3.2 Používané druhy nelinearit

V posledních deseti letech vzniklo několik studií, které se zabývají využitím nelinearit pro zlepšení vlastností vibračních mikro sběračů energie. Přehled těch nejdůležitějších je obsahem této kapitoly, spolu se shrnutím klíčových poznatků a vyvozením závěrů pro tuto práci.

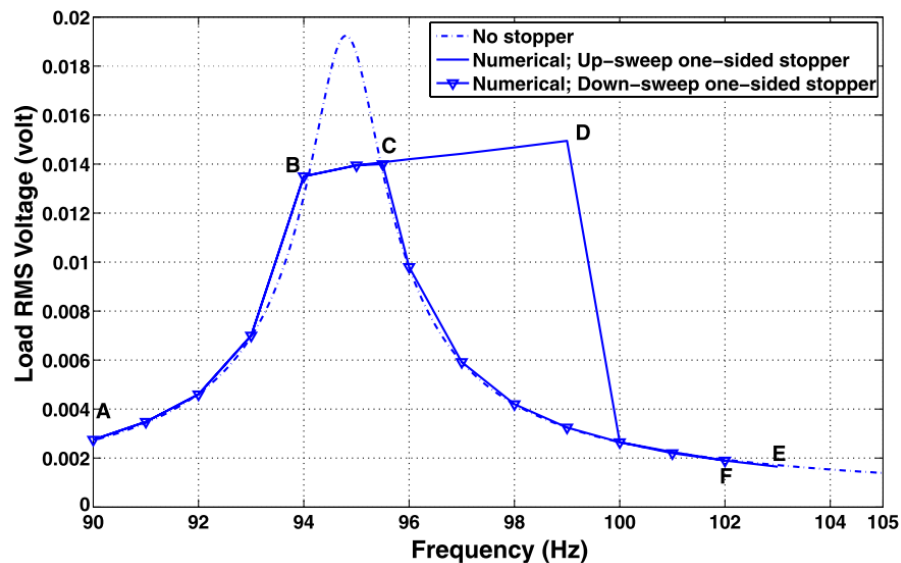
### 3.2.1 Mechanický doraz

Jedna z prvních studií pochází z roku 2008 a pojednává o mechanických dorazech, jakožto o skokové změně tuhosti [23]. K jednostranně vetknutému nosníku, který se sám chová lineárně, je přidán doraz, který po jeho dosažení způsobí skokovou změnu tuhosti. Umístění dorazu i průběh tuhost, respektive síly, je na Obr. 6.



Obr. 6 Schéma mechanického dorazu a graf výsledné tuhosti, respektive síly. Převzato z [23]

Výsledky ukázaly, že přidaná nelineární tuhost může rozšířit pásmo kolem rezonance, kde dochází k účinnému generování elektrické energie. Problém je však, že k rozšíření dojde jen za určitých podmínek. V případě nesplnění se mikro sběrač chová, jako by nelineární tuhost neměl. Na Obr. 7 je znázorněna závislost efektivní hodnoty napětí na budící frekvenci. Je zřejmé, že podmínkou stavu je směr změny frekvence vibrací. Při snižování frekvence z bodu F do bodu C nedochází ke zvýšení napětí a mikro sběrač se chová, jako by doraz neměl. Je zde dokonce negativní efekt a sice, že v úzké oblasti rezonance je napětí s přidanou nelinearitou nižší než bez ní. Lze tedy říct, že v určitém slova smyslu je nelineární verze horší než lineární, avšak jsou zde patrné i výhody. Obdobné realizace s mechanickými dorazy jsou dále publikovány například v [24–26].

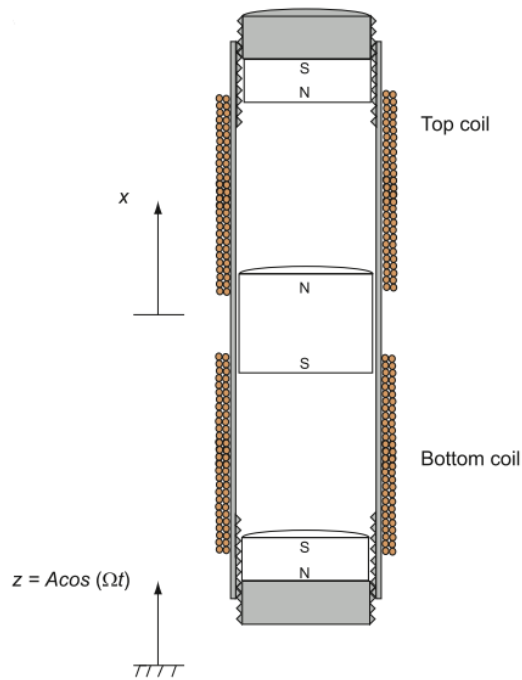


Obr. 7 Závislost efektivní hodnoty napětí mikro sběrače na budící frekvenci bez přidané nelinearity a s přidanou nelinearitou. Převzato z [23]

### 3.2.2 Magnetická levitace

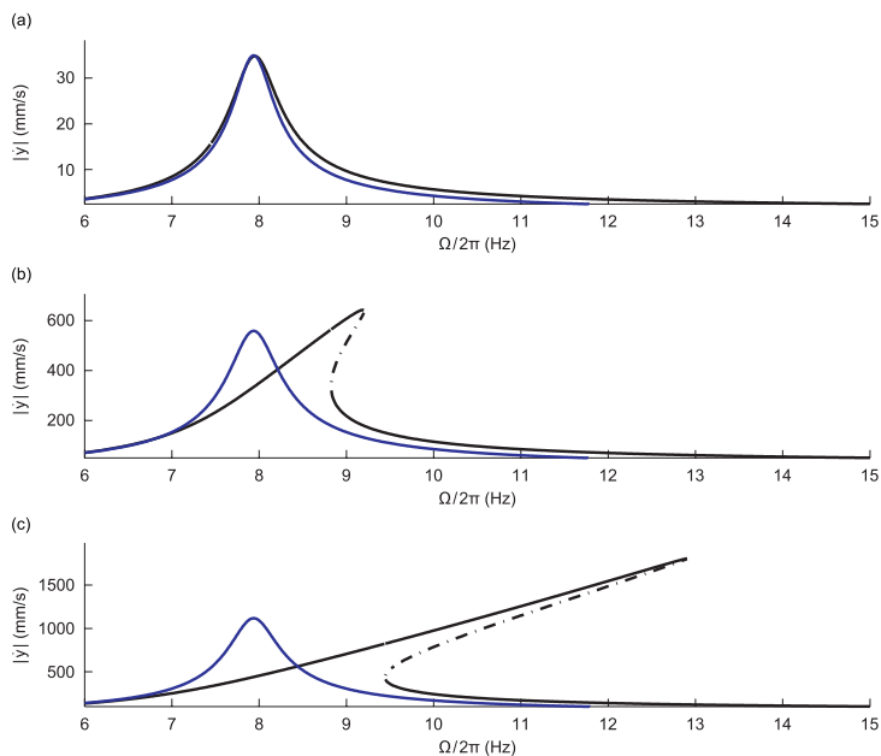
Následujícího roku 2009 se objevuje studie vibračního mikro sběrače [27], kdy mezi dvěma pevnými permanentními magnety levituje třetí pohyblivý. Je třeba dodat, že se nejedná o magnetickou levitaci v pravém slova smyslu, neboť je zde ještě přídavné vedení pohyblivého magnetu. Navržená topologie je vyobrazena na Obr. 8.





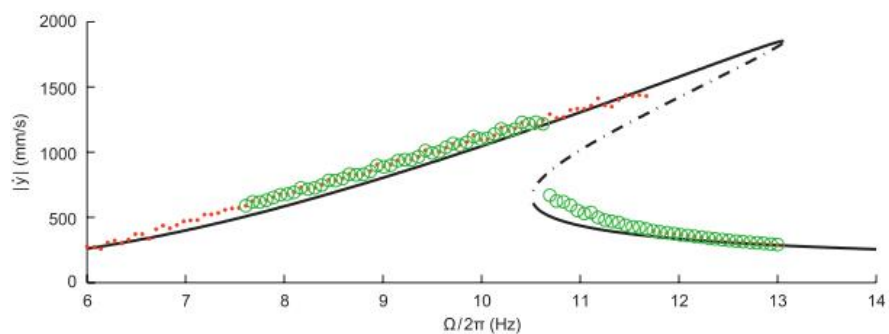
*Obr. 8 Schéma elektromagnetického vibračního mikro sběrače s nelineární tuhostí.  
Převzato z [27]*

Výsledky studie (Obr. 9) ukazují, že pro malé buzení, a tedy pro malé výchylky, je nelinearita téměř zanedbatelná, a naopak se zvyšující se výchylkou je vliv nelinearity stále vyšší. Z Obr. 9 je patrné, že pro případ s nejvyšším buzením (c) je rozšíření pásma markantní. Je zde však problém s dvěma možnými stavy kmitání v oblasti 9,5 – 13 Hz. V případě vyššího stavu je rozšíření pásma velké a přínosné, v případě nižšího stavu už nikoliv.



Obr. 9 Závislost amplitudy rychlosti na budící frekvenci pro tři různé velikosti buzení.  
Převzato z [27]

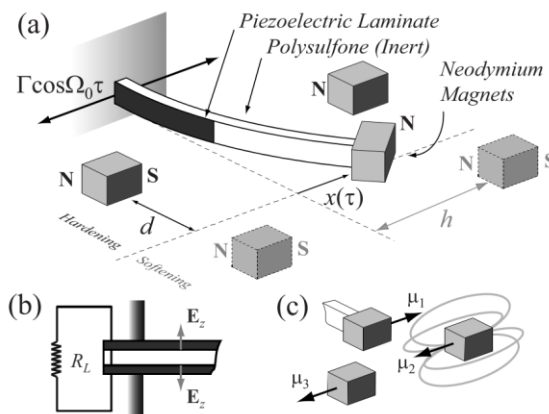
Teoretické výsledky studie je vhodné doplnit ještě o výsledky experimentální, kdy je měření provedeno pro nejvyšší amplitudu buzení. Tyto výsledky jsou na Obr. 10. Je z nich patrné, že kmitání na vyšší amplitudě je poměrně nepravděpodobné a že nejvyšších bodů ani nebylo dosaženo.



Obr. 10 Experimentálně změřená závislost amplitudy rychlosti na budící frekvenci.  
Převzato z [27]

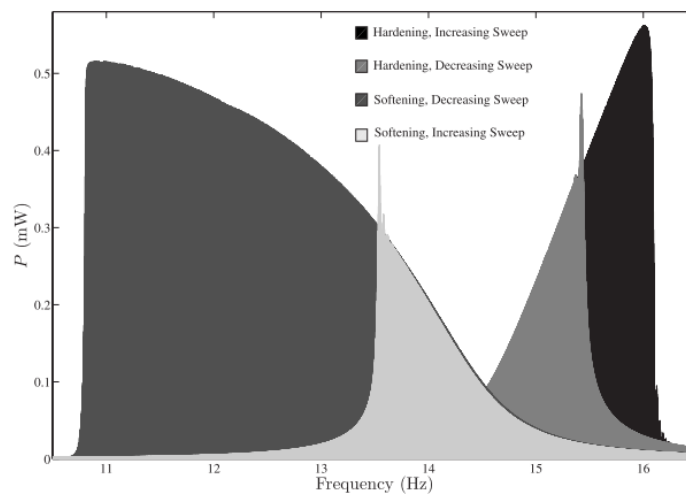
### 3.2.3 Přídavná magnetická tuhost

V následujících letech se objevovaly studie s magnety přidanými k vetknutému nosníku, které modifikují vlastní tuhost nosníku [28–30]. Jedná se o různé koncepce magnetů na konci nosníku a okolo něj. Magnety způsobují tvrdnutí nebo měknutí vlastní tuhosti. Jednu z možných konfigurací zobrazuje Obr. 11. Tato konfigurace má výhodu ve snadné změně parametrů, která umožňuje sadu zajímavých experimentů.



Obr. 11 (a) Schéma piezoelektrického vibračního mikro sběrače s přidáním magnetů, (b) detail připojení elektrické zátěže, (c) detail interakce magnetů. Převzato z [28]

Z výsledků autorského kolektivu [28] jsou zajímavé experimentálně naměřené závislosti výkonu na frekvenci buzení pro tvrdnoucí a měknoucí tuhost, viz. Obr. 12. Budící zrychlení má konstantní amplitudu a spojitě se mu mění frekvence. Na grafu je vidět, že na směr změny frekvence závisí, zda dojde ke kmitání na vyšší nebo na nižší amplitudě. Pro tvrdnoucí charakteristiku způsobí přejezd se zvyšující se frekvencí kmitání na vyšší amplitudě a přejezd se snižující se frekvencí kmitání na nižší amplitudě. U měknoucí charakteristiky je tomu logicky opačně.

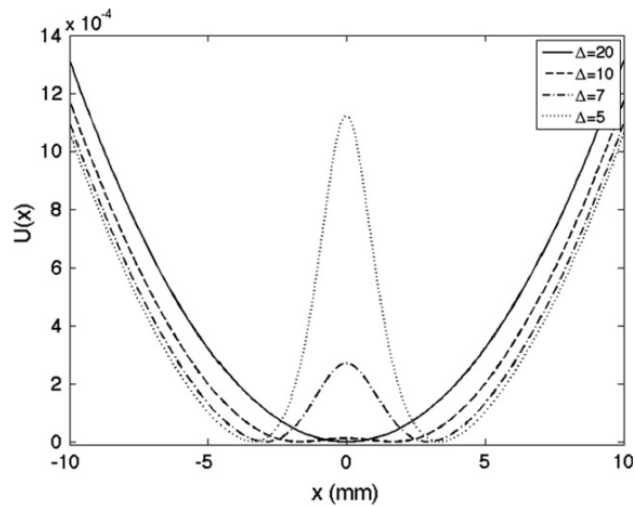


Obr. 12 Experimentálně změřená závislost výkonu piezoelektrického vibračního mikro sběrače na budící frekvenci s tvrdnoucí a měknoucí tuhostí. Převzato z [28]

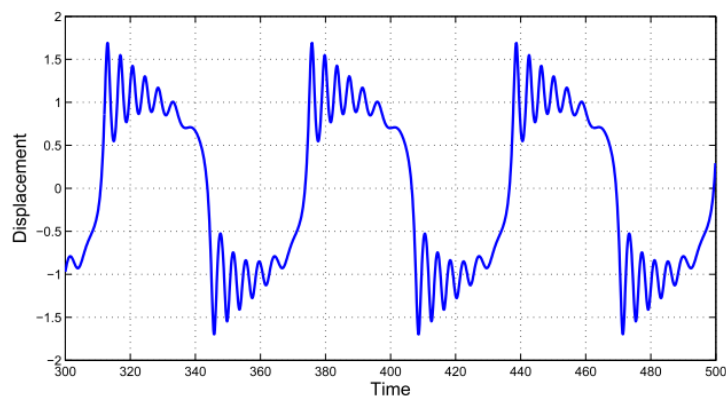
Je tedy patrné, že nelineární verze může přinést možnost rozšíření pásma, avšak je zde problém s dvěma možnými stavy kmitání, kdy ten nižší stav přináší z hlediska generování energie velice špatné výsledky, respektive špatné v porovnání s lineární variantou. Problém těchto studií může být také viděn v tom, že k buzení používají čistě sinusové buzení s plynulou změnou frekvence, což je v praxi buzení poměrně neobvyklé. Tyto studie lze však využít pro prvotní vhled do problematiky a pro jakousi inspiraci pro další práci.

### 3.2.4 Varianty s bistabilním chováním

V určité konfiguraci mohou přidané magnety způsobit bistabilitu oscilátoru [31–35]. Ta nastává v případě, že potenciální energie pružiny má dvě minima, viz Obr. 13. Je patrné, že parametry magnetů lze dosáhnout jak nelineárního stabilního chování, tak lineárního bistabilního chování. Pro bistabilní mikro sběrač je typické, že kmitá jednak kolem stabilních poloh a jednak dochází k překmitům mezi stabilními polohami, jak je zobrazeno na průběhu v Obr. 14.

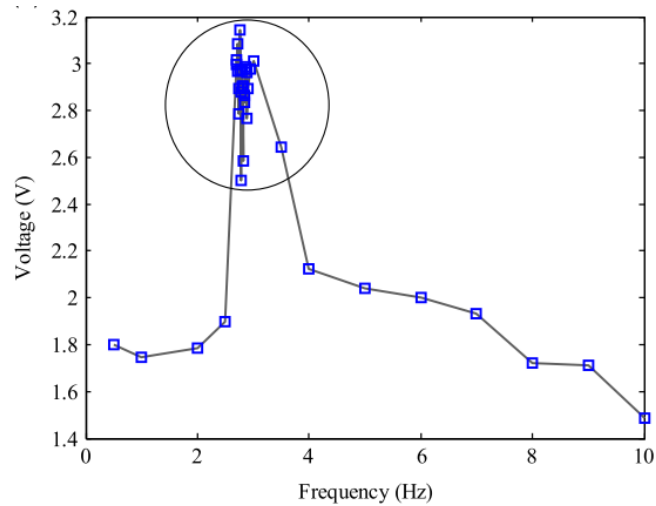


Obr. 13 Graf potenciální energie oscilátoru v závislosti na výchylce pro různý parametr nastavení magnetů. Převzato z [32]



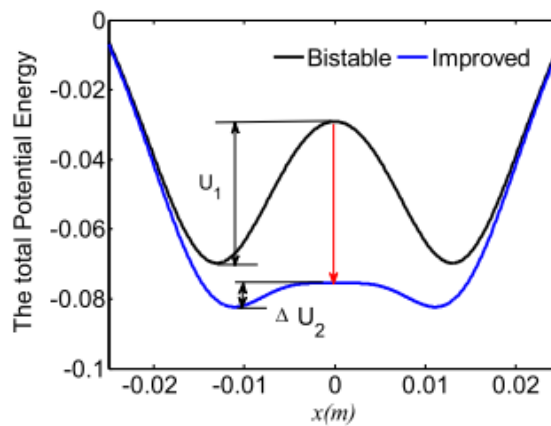
Obr. 14 Průběh výchylky v čase nelineárního vibračního mikro sběrače. Převzato z [33]

Chování bistabilních vibračních mikro sběračů bývá často složité klasifikovat, neboť klasická závislost napětí nebo výkonu na budicí frekvenci je poměrně chaotická, viz Obr. 15. Mnoho publikací se tak spokojí s výsledky prezentovanými pomocí desítek grafů časových závislostí, které jsou téměř nic neříkající.

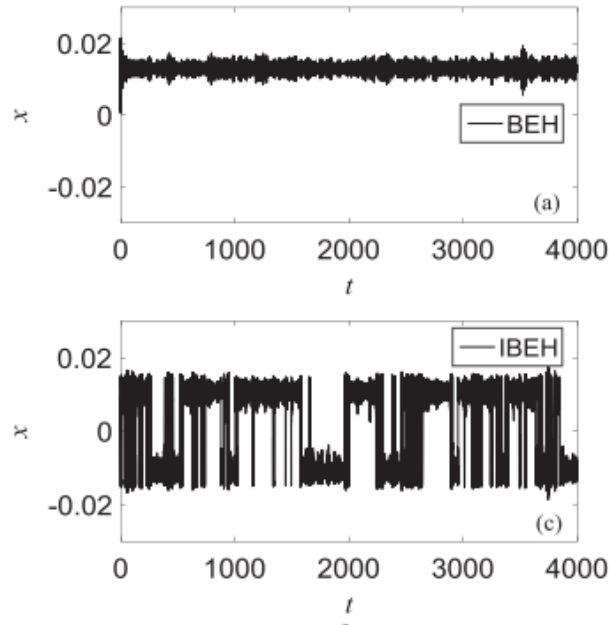


Obr. 15 Závislost výstupního napětí bistabilního vibračního mikro sběrače na budící frekvenci. Převzato z [35]

Vhodným způsobem je možné snížit lokální maximum potenciální energie mezi minimy, a tak usnadnit překmitávání mezi stabilními polohami. Takové řešení přináší [36], kdy je pomocí dalšího magnetu snížena bariéra mezi stabilními polohami, viz Obr. 16. Výsledkem, jak ukazuje Obr. 17, je častější překmitávání mezi stabilními polohami, a tedy i vyšší výkon. Otázkou je však chování s různými druhy buzení.

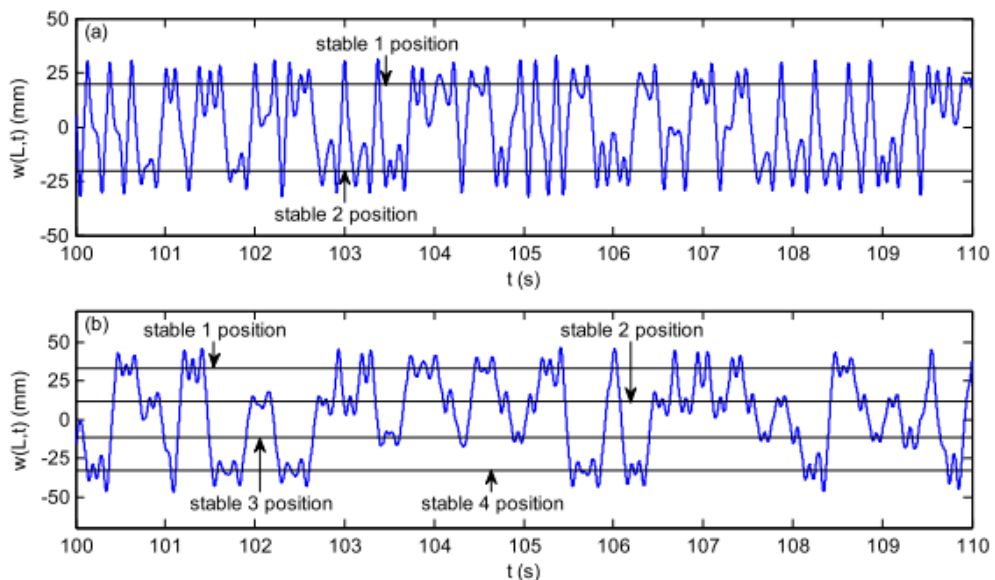


Obr. 16 Graf potenciální energie oscilátoru v závislosti na výchylce. Převzato z [36]



Obr. 17 Průběh výchylky se stejným buzením původního a zlepšeného bistabilního mikro sběrače. Převzato z [36]

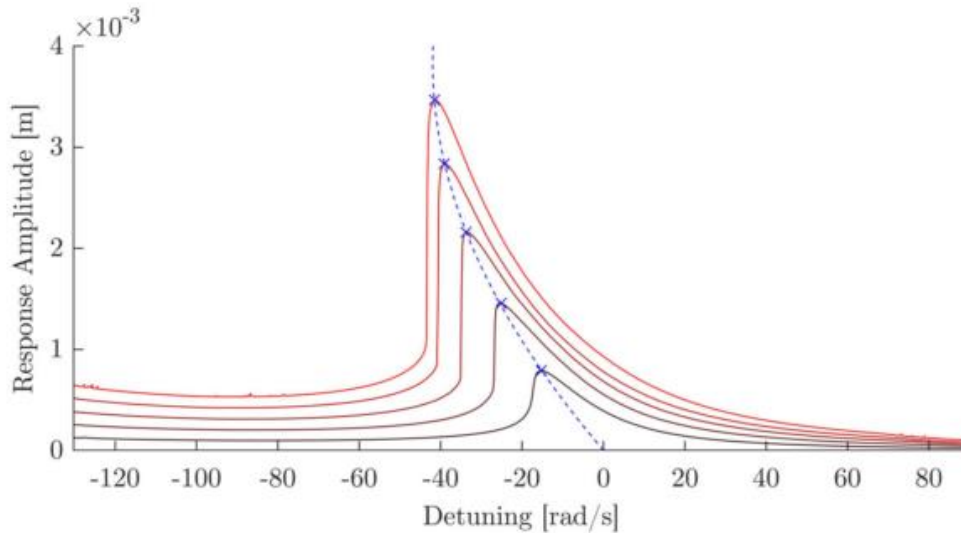
Poslední významnou modifikací bistabilního vibračního mikro sběrače je multistabilní verze, která má tři a více stabilních poloh [37–42]. U takové verze dochází k překmitávání mezi více stabilními polohami, jak ukazuje Obr. 18. Za určitých podmínek tedy takový mikro sběrač může poskytovat vyšší výstupní výkon v celém průřezu spektra buzení.



Obr. 18 Srovnání bistabilního a kvadrastabilního vibračního mikro sběrače. Převzato z [38]

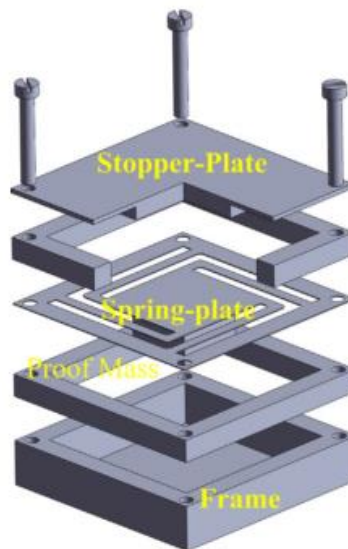
### 3.2.5 Vlastní nelineární tuhost mikro sběrače

Studie [43] ukazuje, že i samotný jednostranně vetknutý nosník vykazuje známky nelineární tuhosti. Z amplitudo-frekvenční charakteristiky (Obr. 19) je patrná měkcnoucí tuhost. Vliv je poměrně malý a spíše, než o rozšíření pásma zde hovoříme o posunutí rezonanční frekvence. Nejedná se tedy o jev vyloženě přínosný, ale spíše o jev, se kterým je potřeba u vibračních mikro sběračů počítat. Stejné chování bylo pozorováno i při vlastních pokusech provedených v rámci práce [V14].



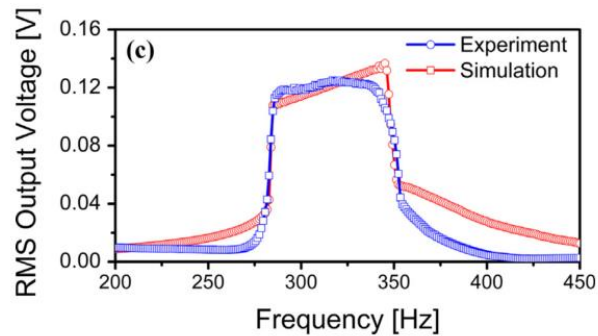
Obr. 19 Amplitudu frekvenční charakteristika jednostranně vetknutého piezoseníku.  
Převzato z [43]

Další studie [44] ukazuje již konstrukci s cíleně nelineární vlastní tuhostí. Konstrukce (Obr. 20) umožňuje určité změny vlastní tuhosti, a tedy modifikace šířky pásma.



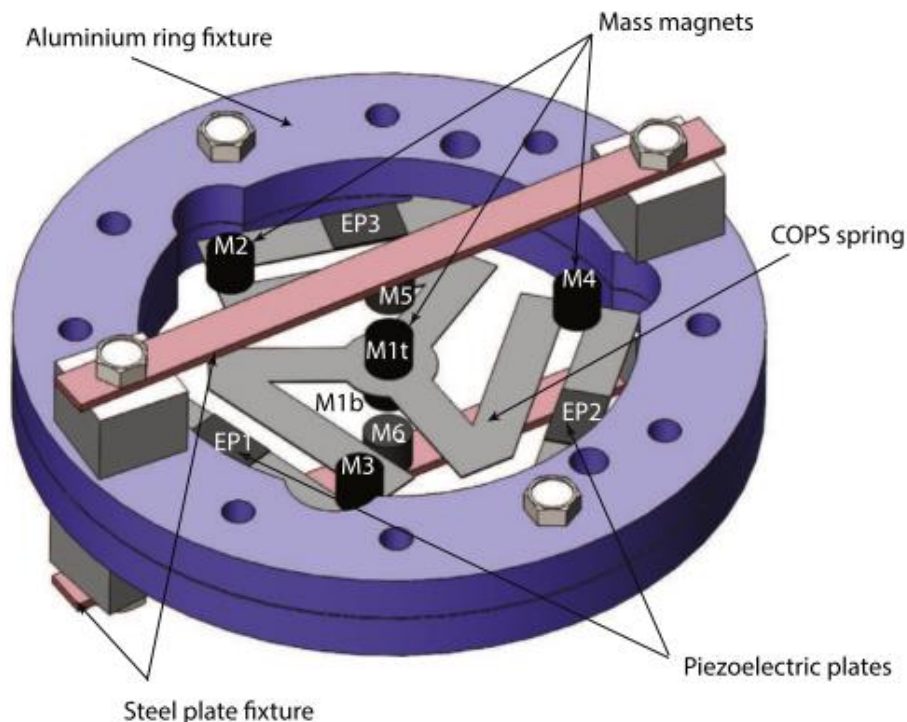
Obr. 20 Piezoelektrický vibrační mikro sběrač s vlastní nelineární tuhostí.  
Převzato z [44]

Výsledné chování této konstrukce je na Obr. 21. Je patrné, že šířka pásma je zde velká, avšak výstupní napětí je prakticky nulové. Lze tedy říct, že taková konstrukce není příliš vhodná pro praktické použití.



Obr. 21 Závislost efektivní hodnoty napětí na budící frekvenci vibračního mikro sběrače s vlastní nelineární tuhostí. Převzato z [44]

Další konstrukcí zmíněnou v této kapitole je konstrukce ze studie [45] rozšířená o přidané magnety [46], zobrazená na Obr. 22. Jedná se složitý geometrický tvar doplněný o magnet v jeho středu a další magnety v ostrých zlomech geometrie.

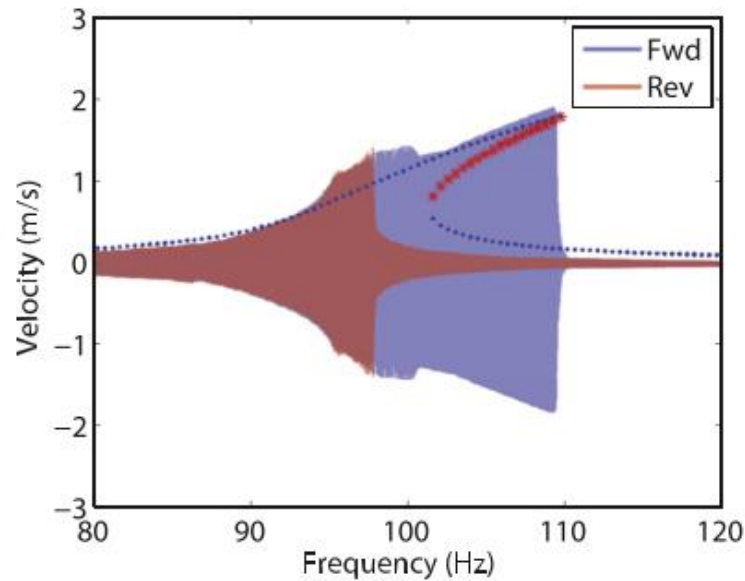


Obr. 22 Piezoelektrický vibrační mikro sběrač s vlastní nelineární tuhostí a přidanou magnetickou vazbou. Převzato z [46]

Simulační i experimentální výsledky (Obr. 23) opět ukazují závislost kmitání na vyšší nebo nižší amplitudě na směru změny frekvence. Je zde výrazný rozdíl v šířce pásma pro

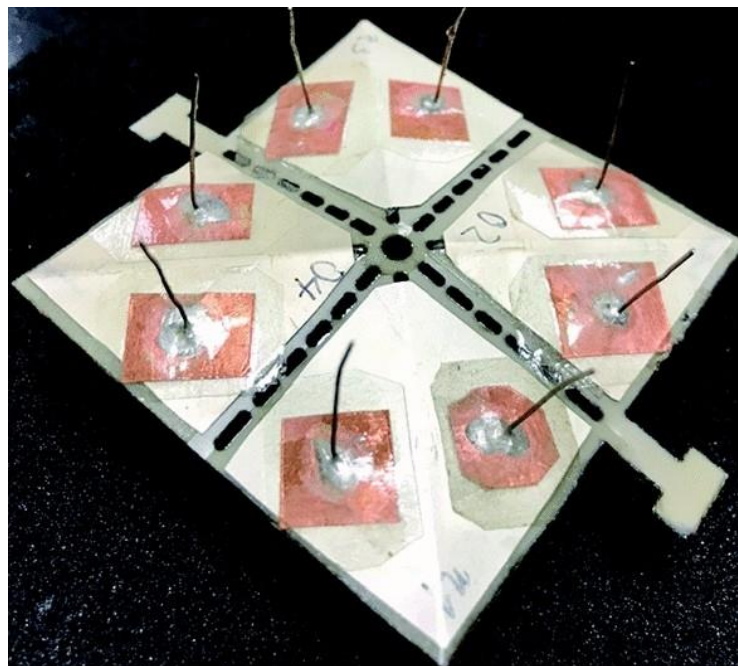


tyto dva stavy s tím že opět není řešeno reálné buzení. S podobnou myšlenkou pracuje například publikace [47].



Obr. 23 Závislost amplitudy rychlosti na budící frekvenci. Převzato z [46]

Poslední zde zmíněná konstrukce [48] využívá origami mechanismus pomocí něhož dosahuje bistabilního chování. Výsledky této práce jsou poměrně úsměvné, neboť výstupný výkon je v řádu jednotek mikrowattů při buzení o amplitudě 0,4 g, což je opravdu málo. S přihlédnutím k tomu, že se jedná o aktuální výzkum je to opravdu zarážející.

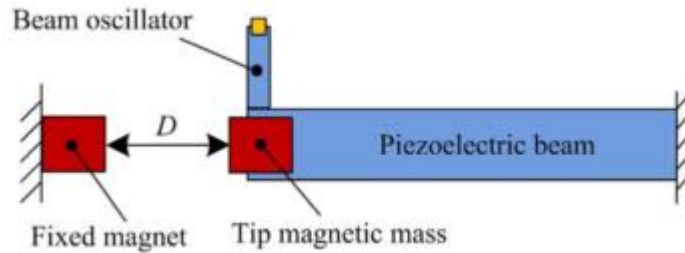


Obr. 24 Bistabilní origami mechanismus. Převzato z [48]

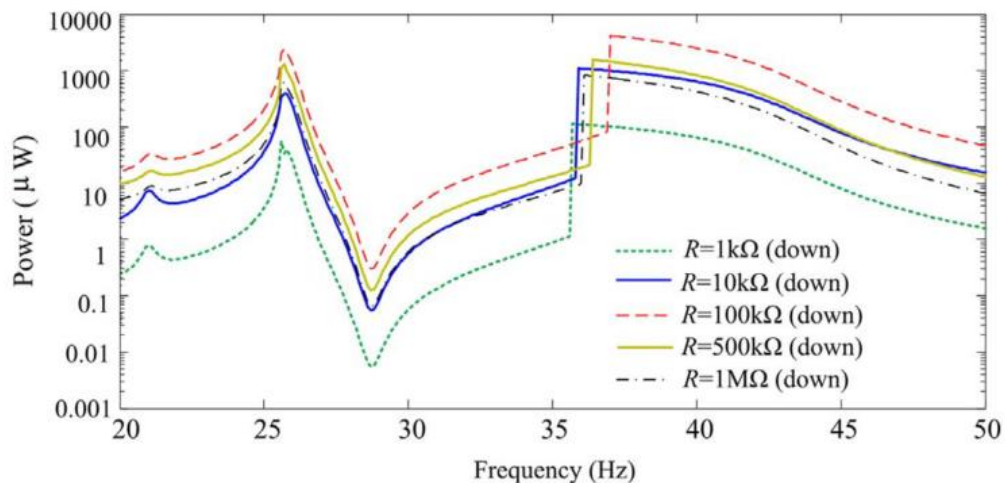
### 3.2.6 Další atypická řešení

Ve vědeckých databázích se lze potkat také s neobvyklými studii různých konstrukcí přinášejících nelineární tuhost. Jejich výhodnost oproti dříve uvedeným je sice přinejmenším diskutabilní, avšak pro komplexnost této kapitoly jsou zde uvedeny.

Jednou z variant je vetknutý piezoelektrický nosník s magnetem na konci a k němu přidáný druhý menší nosník [49]. Topologie je zobrazena na Obr. 25. Přidáný nosník přidává druhou rezonanční frekvenci, a tak je kromě rozšíření pásma přidána ještě jedna špička výkonu vedle. Výsledný průběh výkonu je v grafu na Obr. 26

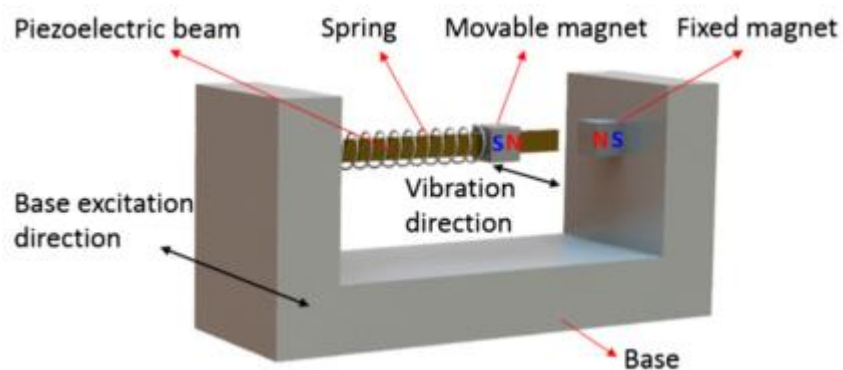


Obr. 25 Nelineární piezoelektrický vibrační mikro sběrač s dvěma stupni volnosti. Převzato z [49]



Obr. 26 Závislost výkonu na budící frekvenci piezoelektrického vibračního mikro sběrače s dvěma stupni volnosti. Převzato z [49]

Další řešení s dvěma stupni volnosti [50] obsahuje posuvný magnet na nosníku. Koncepte je zobrazena na Obr. 27. Při bližším studiu článku může čtenář nabýt dojmu, že se jedná pouze o jakési matematické zápasení s nejistým koncem. Tuto cestu tak lze označit jako hledání slepých uliček a podobnou koncepcí se dále nezabývat.



Obr. 27 Nelineární piezoelektrický vibrační mikro sběrač s posuvným magnetem na nosníku. Převzato z [50].

Dále se objevují řešení, kdy je různým způsobem uchycen i druhý konec nosníku [51–53]. Tyto koncepce už budou ponechány případnému vlastnímu nahlédnutí čtenáři. Tato řešení jsou vhodná pro velice specifické aplikace, pokud vůbec.

## 4 Základní srovnání lineárního a nelineárního oscilátoru

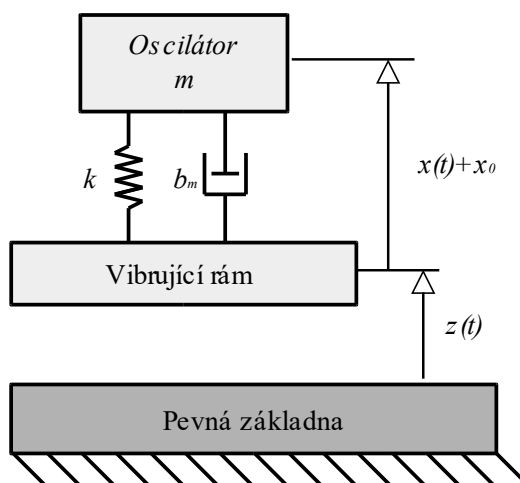
Ještě před detailním rozбором chování nelineárního mikro sběrače je vhodné zařadit tuto kapitolu obsahující základní chování lineárního a nelineárního oscilátoru. Tyto jednoduché skutečnosti jsou totiž důležité pro pochopení další problematiky.

Ač příroda sama o sobě často není lineární, člověk je na lineární chování poměrně dost zvyklý. Každý v sobě máme představu, že když budeme něco dělat větší silou, můžeme očekávat silnější odezvu. V tomto vnímání se pravda často objevuje logaritmické vnímání člověka, ale je stále vzdáleno problematice kmitání oscilátoru s nelineární tuhostí, který tyto obvyklé zvyklosti zcela převrací.

Pro účely tohoto základního srovnání jsou použity lineární oscilátor a Duffingův oscilátor, které jsou oba analyticky řešitelné. Buzeny jsou kinematically zrychlením o konstantní amplitudě s proměnnou frekvencí. Výstupem je potom srovnání amplitudo-frekvenčních charakteristik. Některé další simulace nelineárního oscilátoru k kontextu této práce byly publikovány v [V17].

Lineární oscilátor, schéma na Obr. 28, je popsán rovnicí (7). Tato rovnice je snadno analyticky řešitelná. Parametry oscilátoru jsou v Tab. 1

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (7)$$



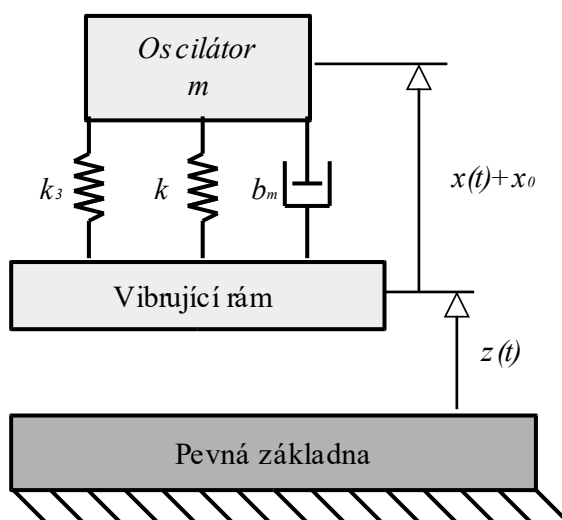
Obr. 28 Lineární oscilátor s kinematicallym buzením

m	100 g	$f_{v1}$	20 Hz
b	0,2513 Ns/m	Q	50
k	1,579 kN/m	$\xi$	0,01
k3 (pouze Duffing)	10 MN/m <sup>3</sup>		

Tab. 1 Parametry srovnávaných oscilátorů

Duffingův oscilátor je v tomto případě doplněn pouze o nelineární tuhost  $k_3$ . Ostatní parametry jsou shodné s lineárním, viz Tab. 1. Je popsán rovnicí (8). Pro přehlednost opět uveďme schéma na Obr. 29. Přibližné analytické řešení využitě k vykreslení grafů v této práci je dobře popsáno v [54].

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx + k_3x^3 = -m\ddot{z} \quad (8)$$



Obr. 29 Duffingův oscilátor s kinematickým buzením

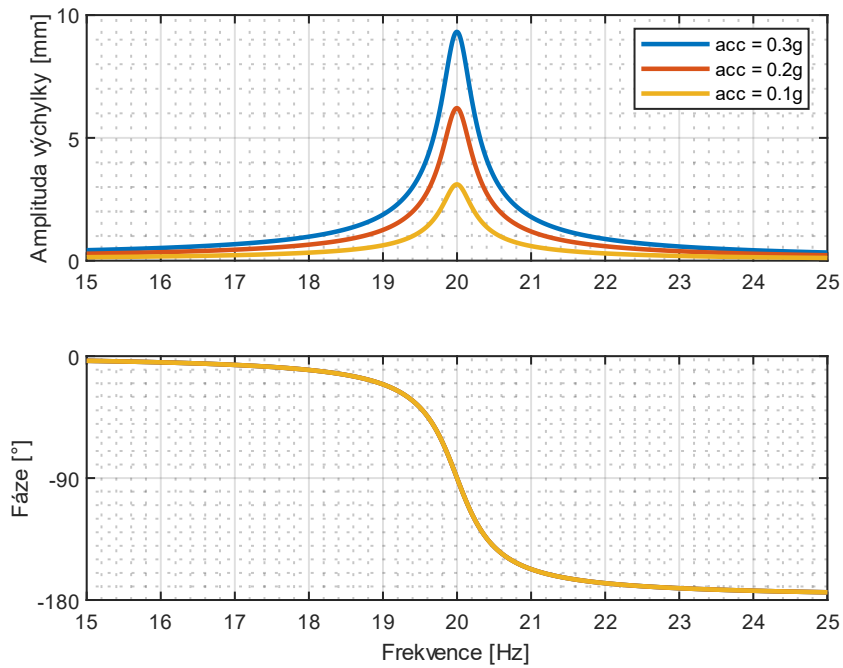
## 4.1 Změna amplitudy buzení

Jedním z jevů, který nás při řešení sklízění energie z vibrací zajímá, je změna chování při změně amplitudy buzení. U lineárního oscilátoru platí princip superpozice a tedy platí, že na dvojnásobné buzení reaguje oscilátor dvojnásobnou amplitudou výchylky a nemění se fáze, viz Obr. 30. To stejné samozřejmě platí pro libovolný násobek amplitudy a bez ohledu na frekvenci.

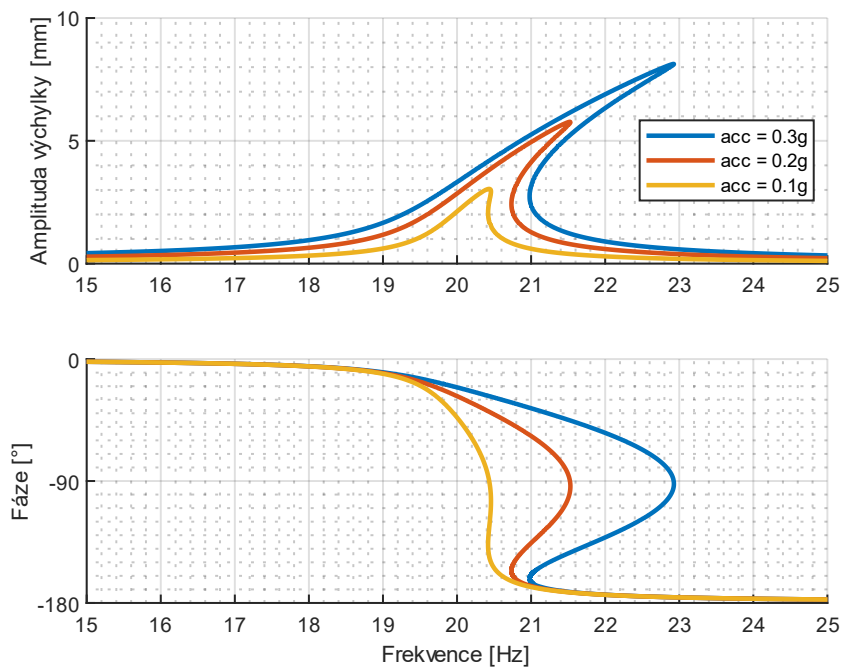
U Duffingova oscilátoru, Obr. 31, tomu už tak není. Se zesílením buzení se zvýší mírně výchylka, avšak neplatí přímá úměra mezi zvýšením buzení a zvýšením amplitudy. Co se však oproti lineárnímu oscilátoru mění, je fáze při dané frekvenci. Se zvyšujícím buzením se při dané frekvenci snižuje fázový posun. Lze říct, že je to proto, že odebíraný výkon z budící síly musí být podobný. Pokud se tedy zvýší budící síla a nezvýší se úměrně tomu amplituda, sníží se odebíraný výkon zmenšením fázového posunu.

Se zvyšující se frekvencí se zvyšuje fáze až k  $-90^\circ$ , což je rezonance, a za ní dochází k pádu na výrazně nižší amplitudu kmitání s fází blízkou  $-180^\circ$ . Je dobře známo, že pro nelineární oscilátor je rezonanční frekvence závislá na budící síle a že u ní existuje oblast, kde může oscilátor kmitat s více možnými amplitudami.

Se zvyšujícím se buzením se tedy u rezonance mění frekvence a zvyšuje se i amplituda, avšak opět ne přímo úměrně zvýšení buzení. Tohoto jevu může být s výhodou využito v mikro sběračích energie, jak bude uvedeno dále.



Obr. 30 Amplitudová a fázová charakteristika lineárního oscilátoru pro různou amplitudu buzení



Obr. 31 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různou amplitudu buzení

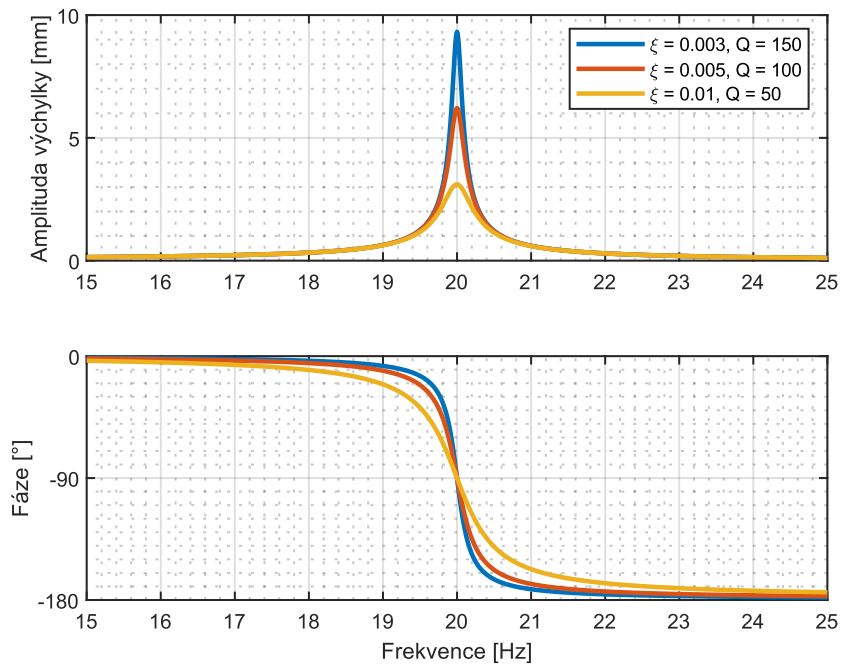
## 4.2 Změna tlumení

Dalším důležitým rysem je reakce na změnu tlumení, nebo chceme-li na změnu kvality oscilátoru, a to ze dvou důvodů. Jedním důvodem je fakt, že tlumení je při návrhu vibračního mikro sběrače jen stěží odhadnutelné, avšak změnou konstrukce je možné ho do určité míry měnit. Je tedy vhodné znát vliv jeho změny na charakter kmitání. Druhým důvodem je skutečnost, že elektrická zátěž způsobuje další složku tlumení, a tedy snižuje celkovou kvalitu. a tak se tato změna projevuje i při zachování konstrukce, avšak při provozní změně elektrické zátěže. Simulace jsou prováděny s budícím zrychlením o amplitudě 0,1 g.

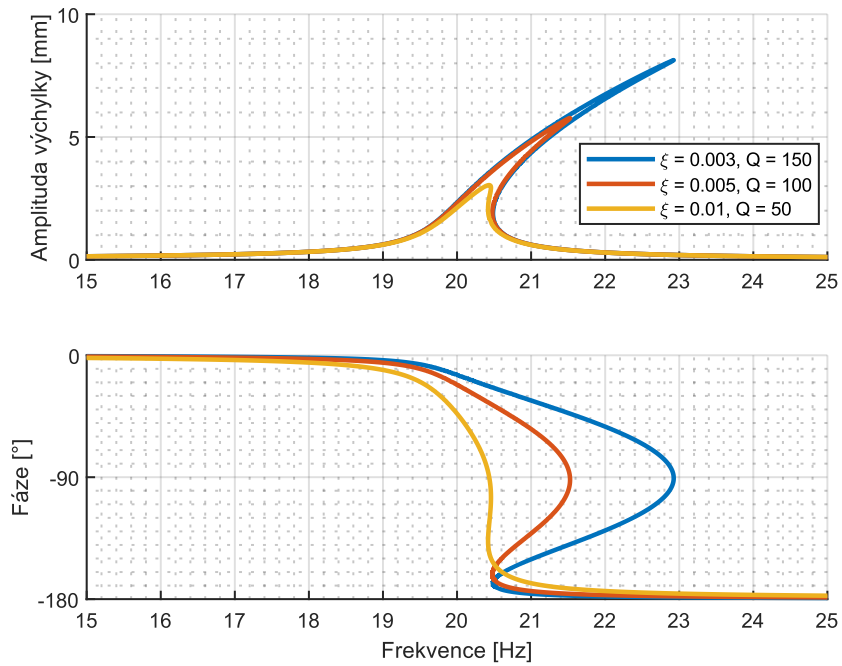
U lineárního oscilátoru, Obr. 32, vede snížení tlumení ke zvýšení amplitudy prakticky pouze v úzké oblasti rezonance. Rezonanční frekvence se nemění. Ve fázi je patrné zostření zlomu fáze z  $0^\circ$  na  $-180^\circ$  při nižším tlumení.

U Duffingova oscilátoru, Obr. 33, má snížení tlumení za důsledek také zvětšení amplitudy, avšak tato amplituda se zvyšuje spolu s nutností zvýšení budicí frekvence. Rezonance má potom vyšší amplitudu pro vyšší frekvenci buzení. Tento jev je potřeba mít na paměti při návrhu nelinearity, kterou navrhujeme s cílem rozšíření oblasti kmitání s vyšší amplitudou. Je totiž zřejmé, že vliv na šíři této oblasti má nejen nelineární tuhost, ale taktéž tlumení.

Vhodné je si všimnout co se děje s fází, pokud je při konstantním buzení sníženo tlumení. Zatímco amplituda se prakticky nemění, fáze se snižuje k  $0^\circ$  v oblasti vyšší amplitudy, která je pro nás podstatná. Naopak při zvyšování tlumení se fáze zvyšuje až k  $-90^\circ$ , kdy dojde k pádu do dolního stavu, kdy je amplituda výrazně nižší a fáze je zde poté blízká  $-180^\circ$ . Tento jev lze použít k dalším úvahám o elektrickém zatěžování vibračního mikro sběrače, jak bude ukázáno v další kapitole.



Obr. 32 Amplitudová a fázová charakteristika lineárního oscilátoru pro různé tlumení



Obr. 33 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různé tlumení



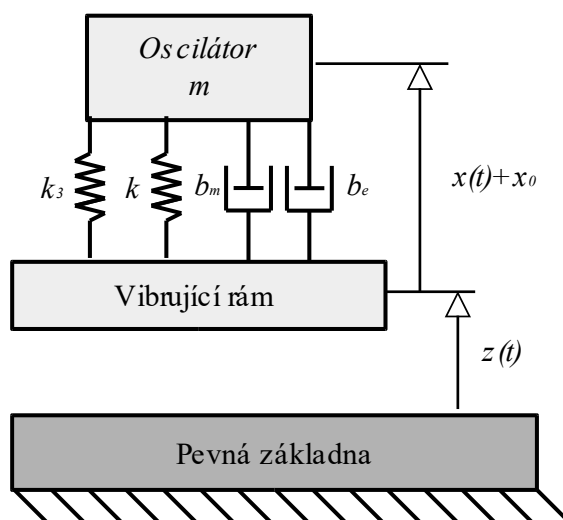
## 5 Vliv elektrického tlumení na obecný nelineární mikro sběrač

V předchozí kapitole byl rozebrán nejjednodušší případ lineárního oscilátoru a nelineárního s kubickou tuhostí, tedy Duffingův oscilátor. V této kapitole se už budeme zabývat pouze nelineárním Duffingovým oscilátorem. Rozšíříme ho však o člen elektrického tlumení, čímž dostaneme základní model nelineárního vibračního mikro sběrače.

### 5.1 Model obecného nelineárního vibračního mikro sběrače

Duffingův oscilátor s elektrickým tlumením (Obr. 34) a je popsán rovnicí (9), která vychází ze základní rovnice obecného vibračního mikro sběrače [12] doplněné o kubickou tuhost.

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + b_e\dot{x} + kx + k_3x^3 = -m\ddot{z} \quad (9)$$



Obr. 34 Duffingův oscilátor s doplněným elektrickým tlumením

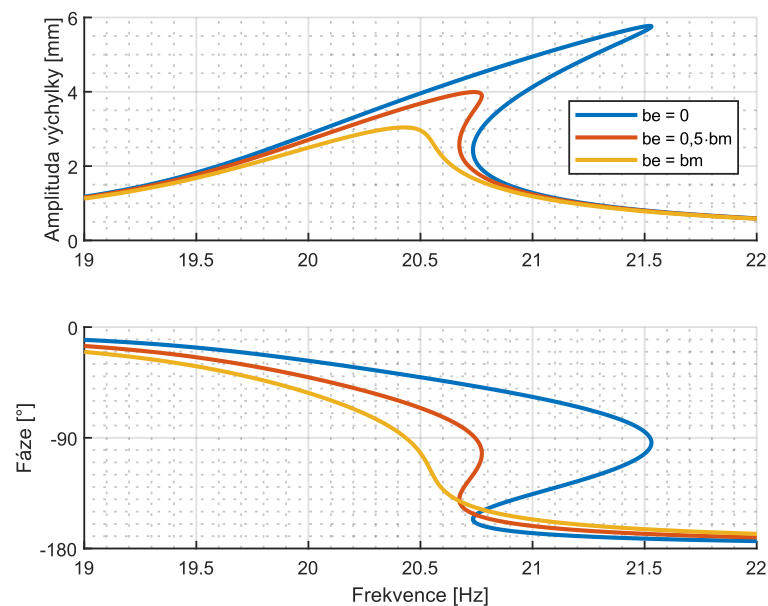
Jak ukazuje již název kapitoly, bude zde rozebrán vliv elektrického tlumení na tento mikro sběrač. Především to bude vliv na výstupní výkon. U lineárního vibračního mikro sběrače je ukázáno, že optimální hodnota elektrické zátěže je shodná s hodnotou vlastního mechanického tlumení [55]. Toto tvrzení platí zcela v rezonanci a velice přesně i v úzkém pásmu okolo rezonance. Ve větší vzdálenosti od rezonance je výkon již tak malý, že je zcela zbytečné se zabývat jeho optimalizací.

U nelineárního mikro sběrače tento vztah platí taktéž, avšak opět pouze v rezonanci. Oproti lineárnímu je však pásmo, kde pracuje mikro sběrač s využitelným výkonem širší,

a tedy je třeba se zabývat otázkou změny elektrické zátěže za účelem optimalizace výkonu.

První snadná úvaha nás přivede k myšlence, že změna elektrické zátěže má přímo vliv na šířku pásma, ve kterém kmitá oscilátor s vyšší amplitudou a kde tedy bude vyšší výkon. Pokud bychom vzali v úvahu hodnotu elektrického tlumení shodného s mechanickým, znamená to poloviční výchylku při shodné frekvenci v případě lineárního oscilátoru. V případě nelineárního to znamená přibližně poloviční výchylku a zároveň snížení frekvence. Je tedy zřejmé, že pokud by bylo nižší elektrické tlumení, byla by vyšší dosažitelná frekvence, a tedy širší využitelné pásmo buzení. Tuto úvahu ilustruje Obr. 35. Je to obdobný graf jako v minulé kapitole. Změna je pouze ve velikosti buzení. Amplituda zrychlení je zde 0,2 g, aby se více projevila nelineární povaha i při vyšším zatlumení.

V grafu vidíme zmíněný vliv změny elektrického tlumení na výšku rezonance a na zmiňovanou zlomovou frekvenci. Je tedy zřejmé, že pokud by se buzení blížilo zlomu, který nastává při fázi  $-90^\circ$ , bylo by vhodné snížit elektrické tlumení tak, aby mohla amplituda dále růst. Zde si můžeme položit otázku, zda není vhodné elektrické tlumení snížit rovnou. Odpověď musíme hledat ve výpočtu výkonu, který bude ukázán dále.



Obr. 35 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různé elektrické tlumení s buzením o amplitudě 0,2 g

## 5.2 Elektrický výkon vibračního mikro sběrače

Vztah pro výkon je v tomto základním modelu velice jednoduchý. Vychází z definice výkonu jakožto součinu rychlosti a síly, tedy:

$$p = b_e \dot{x} \cdot \dot{x} = b_e \dot{x}^2 \quad (10)$$

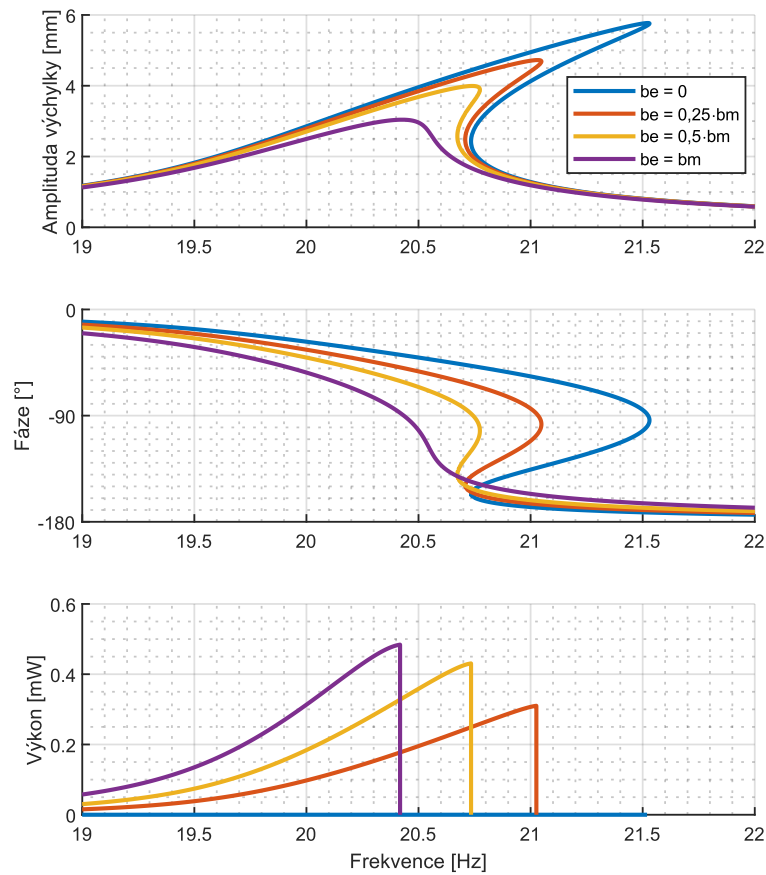
Tento vztah platí samozřejmě pro okamžitý výkon. Pro účely vyhodnocení je nevhodnější využít střední výkon. Pokud budeme uvažovat dominantní první harmonickou frekvenci, tak vztah pro výpočet středního výkonu z amplitudy vychází z řešení diferenciální rovnice a má prostý tvar:

$$P_{stř} = \frac{1}{2} p_A = \frac{1}{2} b_e \dot{x}_A^2 \quad (11)$$

Pomocí tohoto vztahu lze snadno rozšířit graf o závislost výkonu. Tento rozšířený graf je na Obr. 36. Zde je už jasně patrné, že snižování elektrického tlumení oproti hodnotě shodné s hodnotou mechanického tlumení vede k rozšíření oblasti pracovní frekvence, avšak zároveň vede ke snížení výkonu v původní užší oblasti. Je tak zřejmé, že by bylo vhodné elektrické tlumení měnit jakožto funkci budicí frekvence, tak bychom se vždy pohybovali na maximu.

Zde je vhodné upozornit na skutečnost, že maximální výkon pro dané tlumení je vždy současně při fázovém posunu  $-90^\circ$ . Této skutečnosti by bylo možné využít pro řízení proměnného elektrického tlumení. Zároveň je pro pochopení problematiky na místě provést krátkou myšlenkovou zastávku nad důvodem. Fázový posun  $-90^\circ$  mezi budicí silou a výchylkou znamená vlastně fázový posun  $0^\circ$  mezi budicí silou a rychlostí oscilátoru. Je tedy zcela logické, že v této situaci je výkon maximální, neboť výkon odpovídá součinu rychlosti a síly a posun mezi nimi vždy vede ke zmenšení jeho střední hodnoty.

Jen pro kompletnost doplníme zřejmou skutečnost a sice, že zisk rozumného výkonu je podmíněn kmitáním na vyšší amplitudě v oblasti s více možnými amplitudami. Toto lze právě ovlivnit změnou elektrického tlumení.

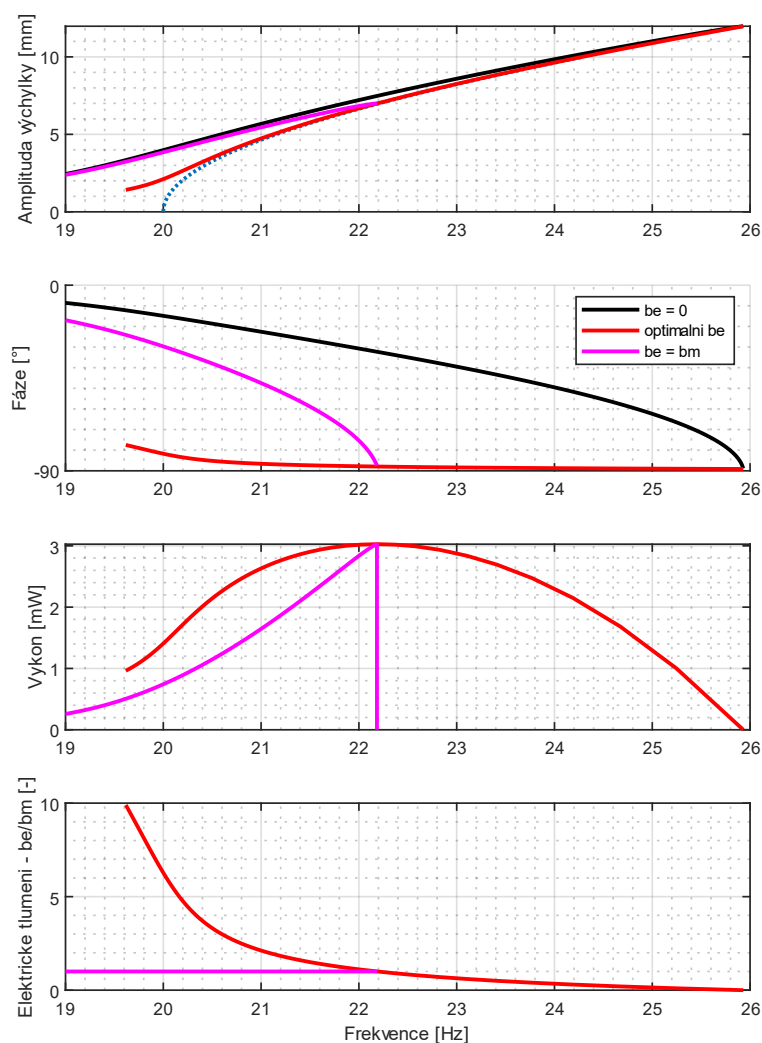


Obr. 36 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různé elektrické tlumení doplněná o elektrický výkon sběrače s buzením o amplitudě 0,2 g

### 5.3 Optimální elektrické tlumení

Na místě je otázka, co způsobí zvyšování elektrického tlumení nad hodnotu tlumení mechanického. Z předchozího je zřejmé, že dojde k zúžení oblasti využitelných frekvencí, avšak se zvýšením výkonu. Také je už zjevné, že vhodným laděním elektrického tlumení je možné dosáhnout optimálního výkonu v celém pásmu buzení. Tento optimální stav je zobrazen na Obr. 37 ve srovnání s tradiční a nulovou elektrickou zátěží. Buzení je v tomto případě zrychlením o amplitudě 0,5 g.

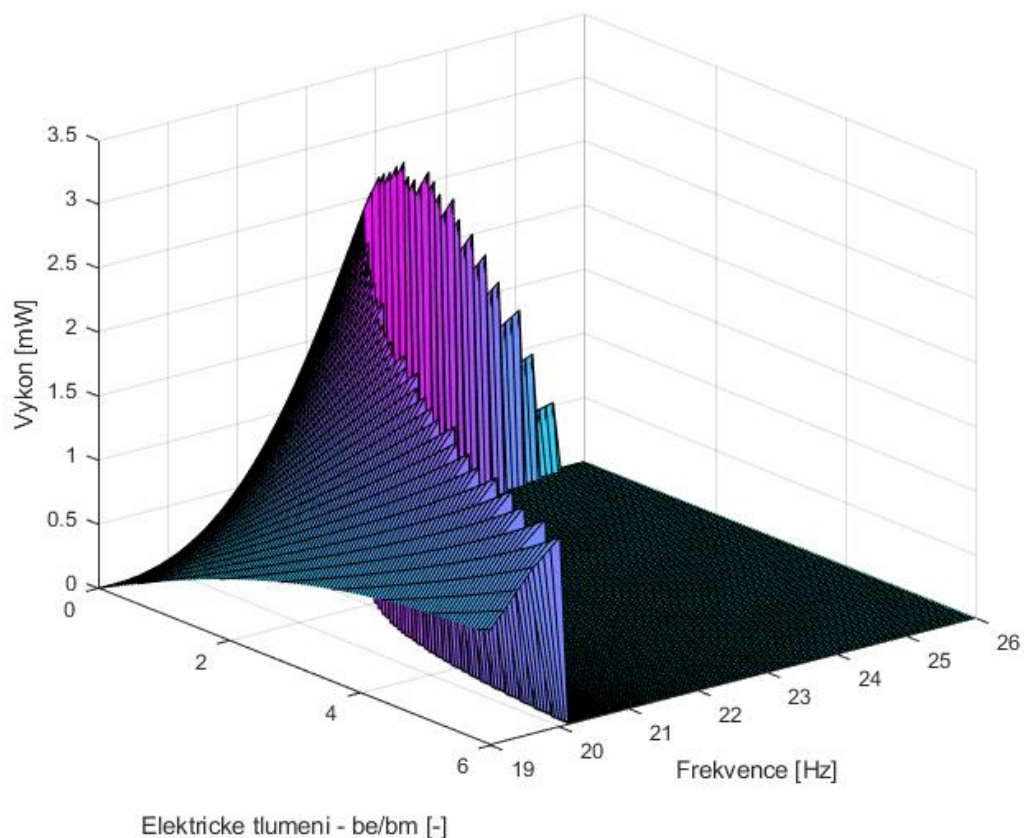
Z grafu je patrné, že pro  $b_e = b_m$  je výkon maximální, avšak pouze pro jednu danou frekvenci. Pro vyšší frekvence je výkon nulový a pro nižší frekvence strmě klesá. Naopak s optimalizovanou elektrickou zátěží je využitelná frekvence výrazně vyšší. Je to sice na úkor klesajícího výkonu, avšak stále zde je výkon využitelný. Pro klesající frekvenci se výkon také snižuje, ale ne tak rychle jako s konstatní elektrickou zátěží.



Obr. 37 Optimalizovaná elektrická zátěž ve srovnání s tradiční a nulovou elektrickou zátěží s buzením o amplitudě 0,5 g

V grafu je také vidět, že fáze s optimální elektrickou zátěží je blízká  $-90^\circ$ . Pro výrazně vyšší tlumení při nízké frekvenci je zřejmě patrný odklon fáze a také zrychlení růstu tlumení. Jedná se o oblast, kde už by nebylo výhodné dále zvyšovat tlumení vzhledem k reálným parametrům. Taktéž si lze všimnout, že amplituda při optimální elektrické zátěži sleduje skeletovou křivku, avšak v nízkých hodnotách frekvence a výchylky se od ní odpojí. Je to v podobném místě, kde se výrazně začíná zvyšovat elektrické tlumení.

Závislost výkonu na budicí frekvenci a proměnném elektrickém tlumení je zobrazena na Obr. 38. Optimum prezentované na Obr. 37 je vlastně hrana z tohoto trojrozměrného grafu. Je zde patrná jednostranně nestabilní charakteristika problému hledání optima a sice nebezpečí pádu z hrany, odkud už není snadné se vrátit zpět na vysoký výkon.



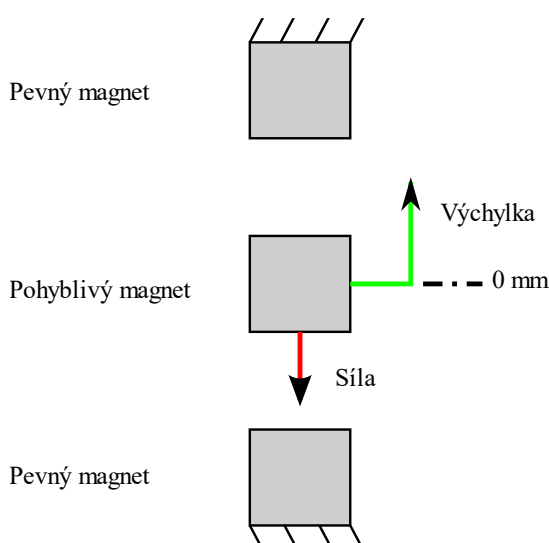
*Obr. 38 Závislost výkonu na budicí frekvenci a proměnném elektrickém tlumení s buzením o amplitudě 0,5 g*

## 5.4 Závěry z vlivu elektrického tlumení na výkon

Závěrem z této kapitoly je důležitý poznatek. Při návrhu nelinearity je možné uvažovat vibrační mikro sběrač pouze s vlastním tlumením. Po doplnění optimalizované elektrické zátěže bude využita celá šířka frekvenčního pásma s maximálním výkonem zhruba uprostřed rozsahu. To vše však za určité amplitudy buzení, viz předchozí kapitola 4.

## 6 Obecný návrh magnetů pro nelineární tuhost oscilátoru

Jak bylo ukázáno v kapitole 3, pro realizaci nelineární tuhosti vibračního mikro sběrače je užíváno zpravidla odpuzujících se magnetů. Konkrétní hodnoty síly v závislosti na výchylce je možné získat prakticky jen experimentálně nebo pomocí výpočtového modelu magnetického pole. Druhý způsob je samozřejmě jednodušší a rychlejší. Může být využito různých výpočtových programů, ale pro tyto účely je zcela postačující open source program FEMM 4.2 [56]. Základní schéma je na Obr. 39. Krajní magnety jsou upevněny k rámu, zatímco prostřední magnet kmitá spolu s pohyblivým ramenem.



Obr. 39 Základní schéma magnetů vytvářejících magnetickou tuhost

Pro vhodný návrh magnetů však nestačí pouze počítat síly mezi magnety daných rozměrů, ale je třeba také znát určité zákonitosti a vlivy volených rozměrů na průběh síly. Jinak by bylo hledání vhodných magnetů spíše jakýmsi chaosem než systémovým návrhem.

Pro účely stanovení těchto vlivů bylo rozhodnuto provést sadu výpočtů pro měnící se rozměry magnetů tak, aby byl zřetelný základní vliv těchto parametrů na výslednou tuhost. Jako konstantní byla stanovena mezera mezi magnety, což odpovídá návrhu pro předem danou maximální výchylku, což je často požadovaný způsob. Protože je program FEMM 4.2 2D, je stanovena pouze hloubka v třetím rozměru a ta byla pro účely simulací 20 mm, což je častý parametr u vyvíjených vibračních mikro sběračů. Ostatní rozměry byly vždy v základu 1 mm, tedy magnety v průřezu 1x1 mm a s mezerou 1 mm. Vždy jeden nebo více parametrů byly měněny na obě strany, tak aby byla dobře ukázána závislost.

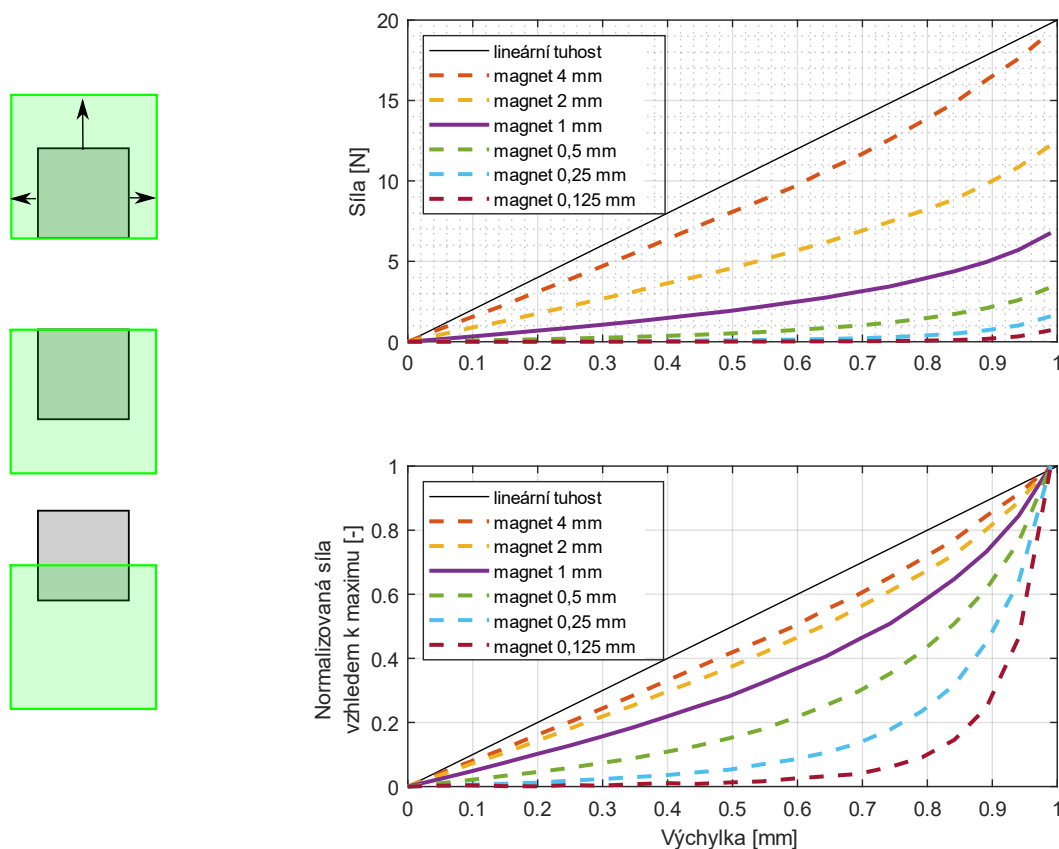
## 6.1 Shodná velikost všech tří magnetů

Již první myšlenka vede k otázce, zda by měly být pohyblivý magnet a vnější magnety stejně nebo různě veliké. V tomto duchu je veden i postup simulací, kdy v první části budou ukázány vlivy při stejně velkých magnetech a v druhé bude naopak vliv různé velikosti magnetů

### 6.1.1 Změna velikosti magnetů při zachování čtvercového průřezu

První závislostí je závislost na změně velikosti magnetů při zachování čtvercového průřezu pro konstantní mezeru. Změna velikosti magnetů je schematicky zobrazena na Obr. 40, kde je též graf s výslednou silou. Výsledná síla je zobrazena ve dvou různých grafech. První z nich ukazuje absolutní hodnotu síly jako funkci výchylky pro různé magnety. Druhý graf zobrazuje sílu normalizovanou vzhledem k maximální síle při maximální výchylce. V tomto druhém grafu jde tedy síla vždy pro daný magnet od hodnoty 0 do hodnoty 1. Je to vhodné nikoliv pro posouzení absolutní hodnoty síly, ale pro porovnání nelineárního průběhu mezi různými magnety.

Z průběhů je patrné, že zvětšováním magnetů dostáváme výrazně vyšší sílu, avšak také je patrné, že její průběh je více lineární. Velikost magnetu 4 mm už svým průběhem velice blízce dosahuje lineárního průběhu. Naopak velikost 0,5 mm už vykazuje silnou nelinearitu. Tento fakt je velice podstatný při návrhu magnetů pro nelineární vibrační mikro sběrače, neboť je jasné patrné, že pro nelineární chování budou zřejmě vhodné menší magnety.



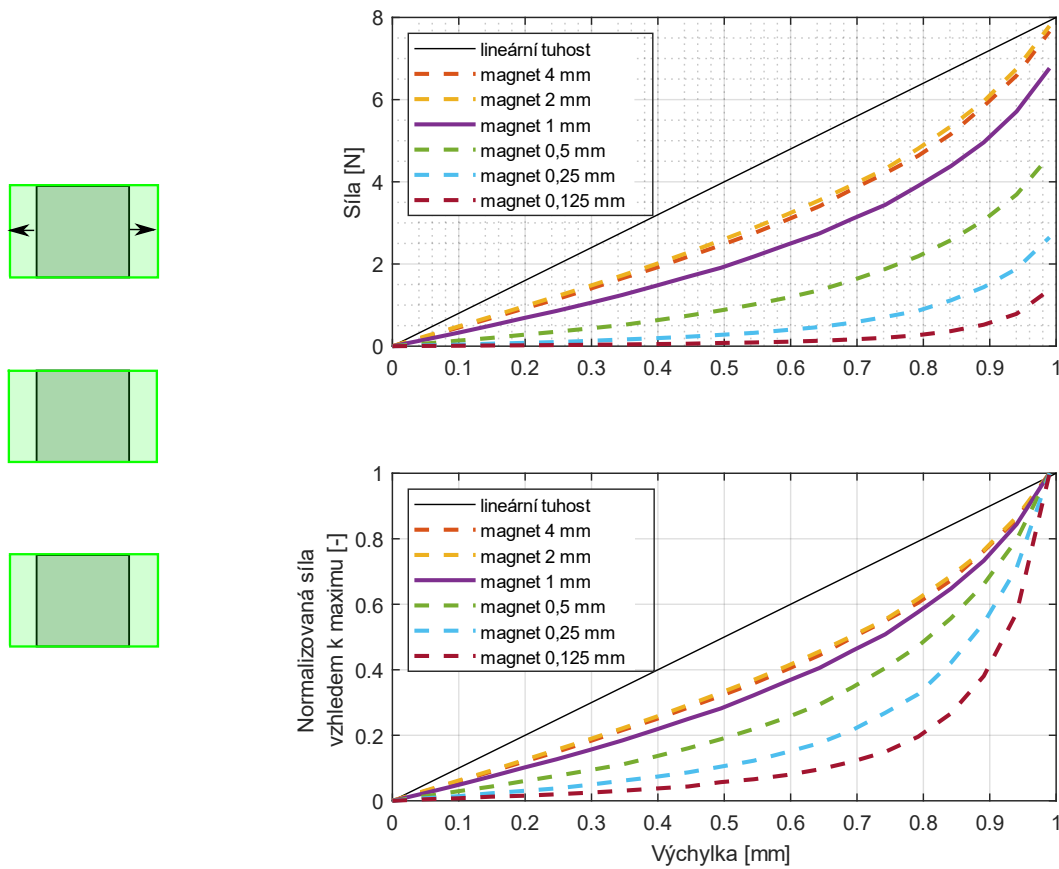
Obr. 40 Závislost síly na výchylce pro různou velikost magnetů



## 6.1.2 Změna šířky magnetů

Další závislost je při změně šířky magnetů a zachování konstantní výšky a mezery. Změna je opět schematicky zobrazena na Obr. 41 i s příslušnými průběhy.

Při změně šířky je zajímavé si všimnout, že při jejím zvětšování dochází k jakési saturaci síly a další rozšiřování magnetů už nemá prakticky žádný vliv. Tento fakt je pro návrh magnetů nelineární pružiny též velice podstatný, protože vede k poznatku, že výrazně široké magnety jsou vlastně zcela zbytečné a nelze pomocí nich dosáhnout větší síly než s magnety úzkými. Naopak při zužování magnetů se síla ztlačně snižuje a její průběh je více nelineární, což může být vhodný stav.

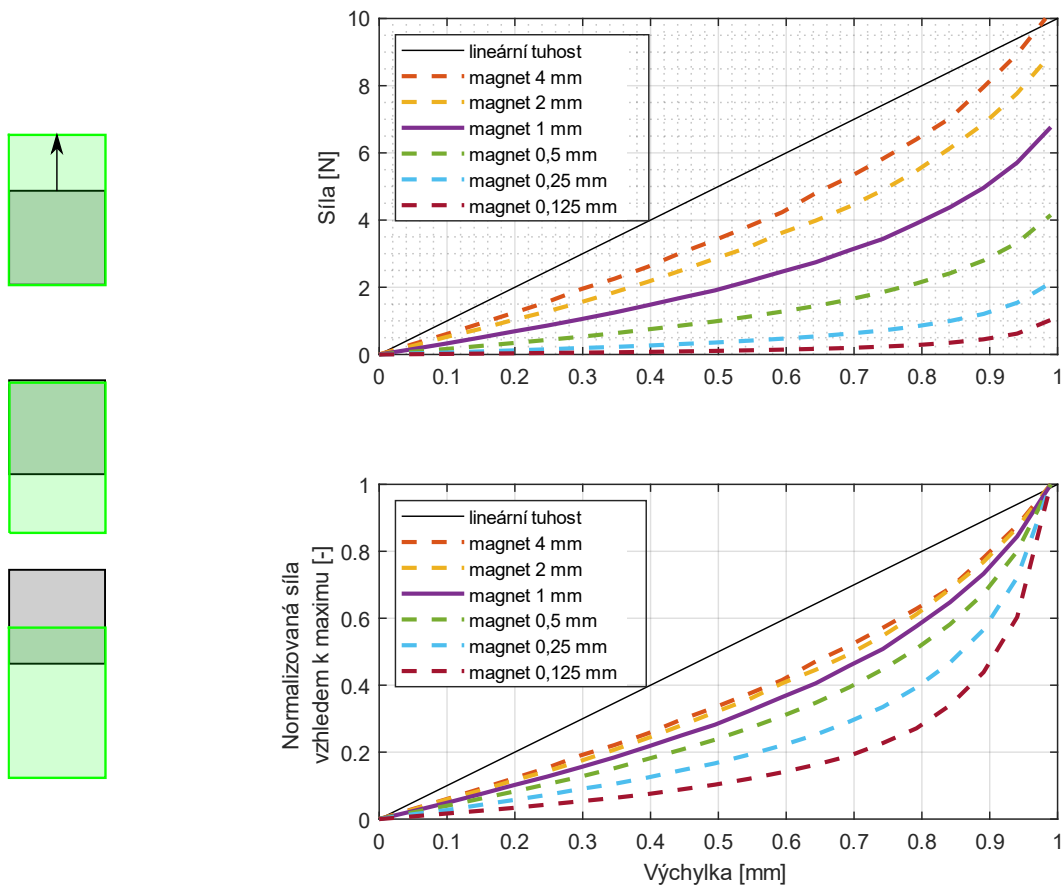


Obr. 41 Závislost síly na výchylce pro různou šířku magnetů

### 6.1.3 Změna výšky magnetů

Poslední závislost, při které se mění pevné a pohyblivý magnet společně, je závislost na výšce magnetů. Ta je opět zobrazena na Obr. 42, kde je jednak schematicky naznačena změna velikosti magnetů a jednak jsou zde patřičné průběhy.

Na rozdíl od zvětšování šířky vede zvětšování výšky ke zvýšení síly. Oproti celkovému zvětšení magnetů však nedochází k tak silnému narovnání průběhu k lineárnímu, ale zůstává více nelineární. Při snižování výšky magnetů se samozřejmě síla snižuje a též začíná být průběh více nelineární. Ve srovnání se zmenšováním obou stran magnetu však není zvětšení nelinearity tak patrné. Z poznatků simulací změny šířky je navíc zřejmé, že při změně výšky k nízkým hodnotám se přibližujeme stavu širokých magnetů, které vlastně nepřinášejí žádné výrazné výhody oproti malým čtvercovým magnetům, a tak lze tento směr změny při návrhu magnetů označit za ne zcela vhodný.



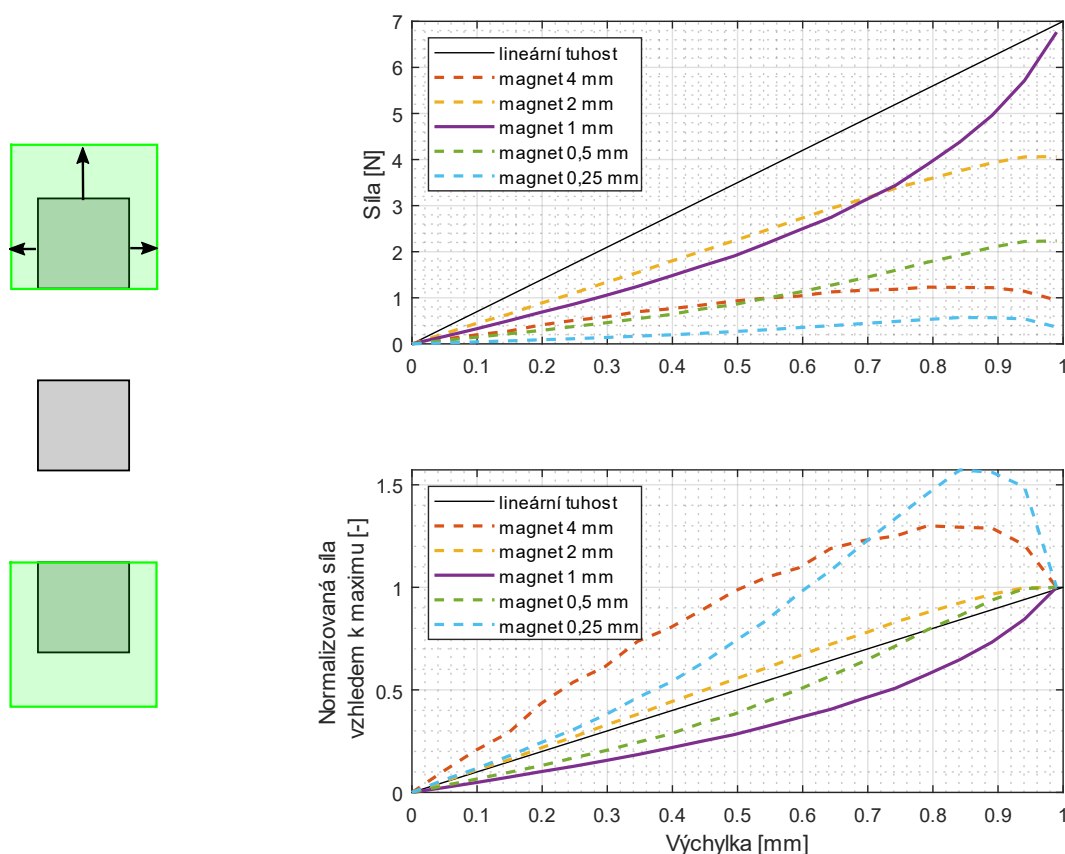
Obr. 42 Závislost síly na výchylce pro různou výšku magnetů

## 6.2 Různá velikost magnetů

V předchozích případech byly měněny pevné magnety spolu s magnetem pohyblivým. Další logickou variantou je změna pouze jedné z těchto skupin. Z předchozího dále vyplynulo, že největší vliv má změna celkové velikosti magnetu při zachování čtvercového průřezu. Proto zde bude uvažována především tato změna velikosti bez změny v poměru stran. Taktéž se ukázalo, že použitelným parametrem je změna výšky magnetů, a tak zde bude také uvažován vliv změny výšky pouze vnitřního nebo pouze vnějších magnetů.

### 6.2.1 Změna velikosti pevných magnetů

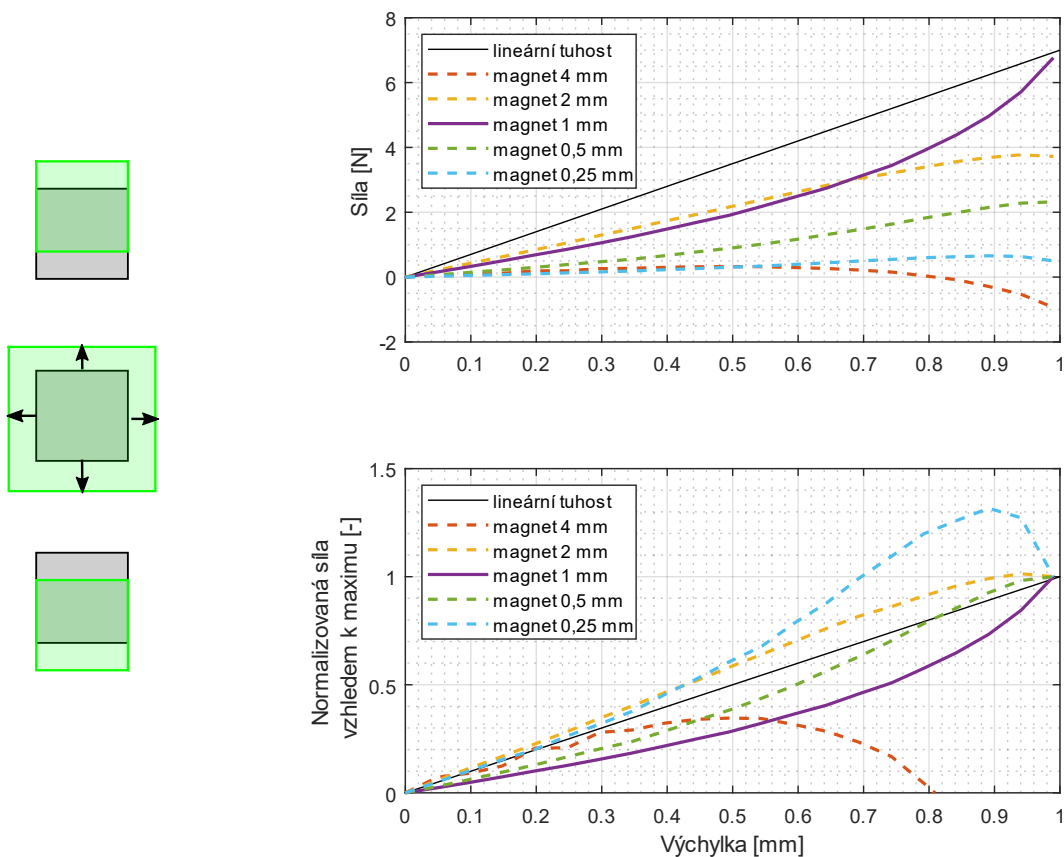
Jednou z variant je zvětšování pevných, tedy vnějších magnetů. Schéma je zobrazeno na Obr. 43 spolu s průběhy síly. Jak zvětšování, tak zmenšování vnějších magnetů vede ke zmenšení síly, tak k především ke změně jejího průběhu. Malá změna rozměru vede k lineárnímu průběhu a výrazná změna průběhu vede dokonce k měkcnoucí charakteristice. Zároveň je však třeba upozornit, že zde již dochází opravdu výraznému poklesu hodnoty síly.



Obr. 43 Závislost síly na výchylce pro různou velikost pevných magnetů

## 6.2.2 Změna velikosti pohyblivého magnetu

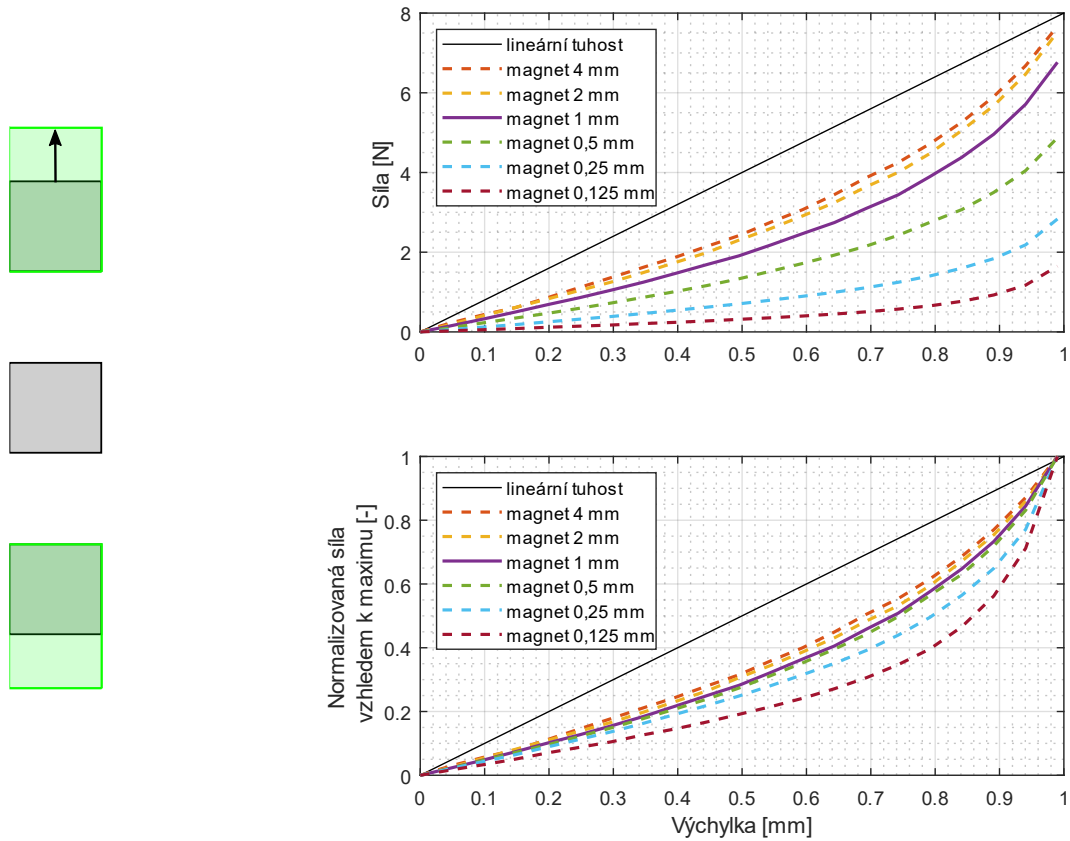
Další možnost je zvětšování pouze vnitřního magnetu. Schematicky je toto zvětšení naznačeno na Obr. 44 spolu s výslednými průběhy síly. Stejně jako v předchozím vede změna rozměru vnitřního magnetu ke zmenšování síly a ke změně průběhu směrem k měkčouní charakteristice. V případě velikosti vnitřního magnetu 4 mm už dokonce dochází k obrácení znaménka síly při velké výchylce, což by znamenalo, že by se rameno vychýlilo do krajní polohy a v ní zůstalo přitažené magnetickou silou, což by rozhodně nebylo žádoucí.



Obr. 44 Závislost síly na výchylce pro různou velikost pohyblivého magnetu

### 6.2.3 Změna výšky pevných magnetů

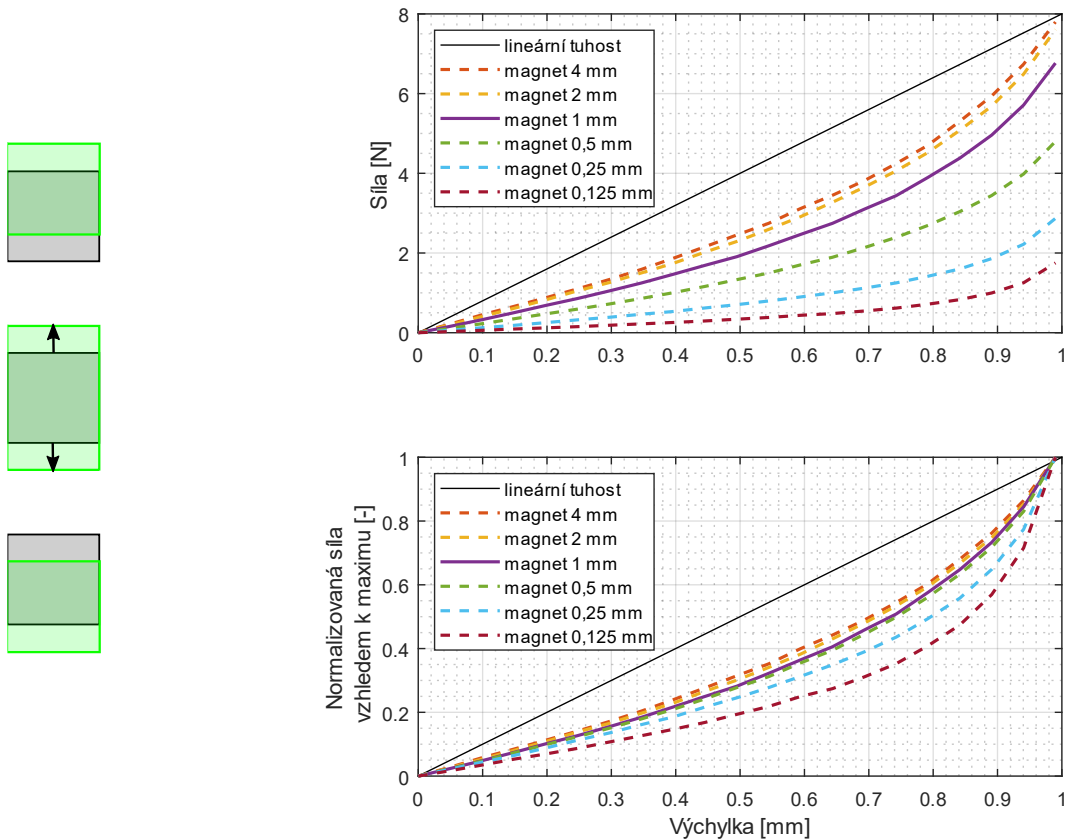
Změna výšky pevných magnetů přináší chování velice podobné jako v případě změny výšky všech magnetů, jak ukazuje Obr. 45. Zatímco vyšší výška přináší vyšší sílu a nelinearitu, u nižších magnetů je tomu naopak. V případě současné změny výšky všech magnetů je však tento vliv silnější.



Obr. 45 Závislost síly na výchylce pro různou výšku pevných magnetů

## 6.2.4 Změna výšky pohyblivého magnetu

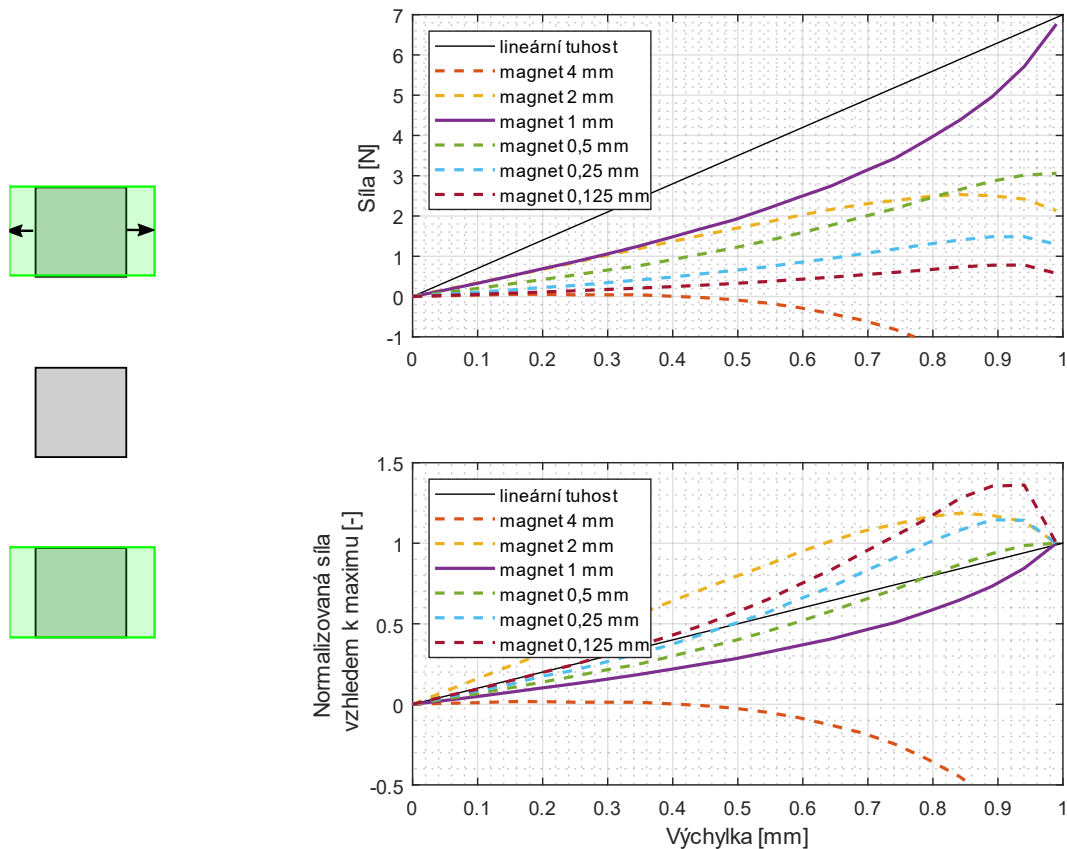
Změna výšky pohyblivého magnetu přináší prakticky shodné chování jako předchozí případ, jen můžeme říct, že je změna síly mírně vyšší, viz Obr. 46. Oproti změně výšky pevných magnetů je tedy změna pohyblivého magnetu jaksí ekonomičtěji výhodnější. Neboť stejného zvýšení síly dosáhneme zvětšením pouze jednoho magnetu oproti dvěma magnetům.



Obr. 46 Závislost síly na výchylce pro různou výšku pohyblivého magnetu

## 6.2.5 Změna šířky pevných magnetů

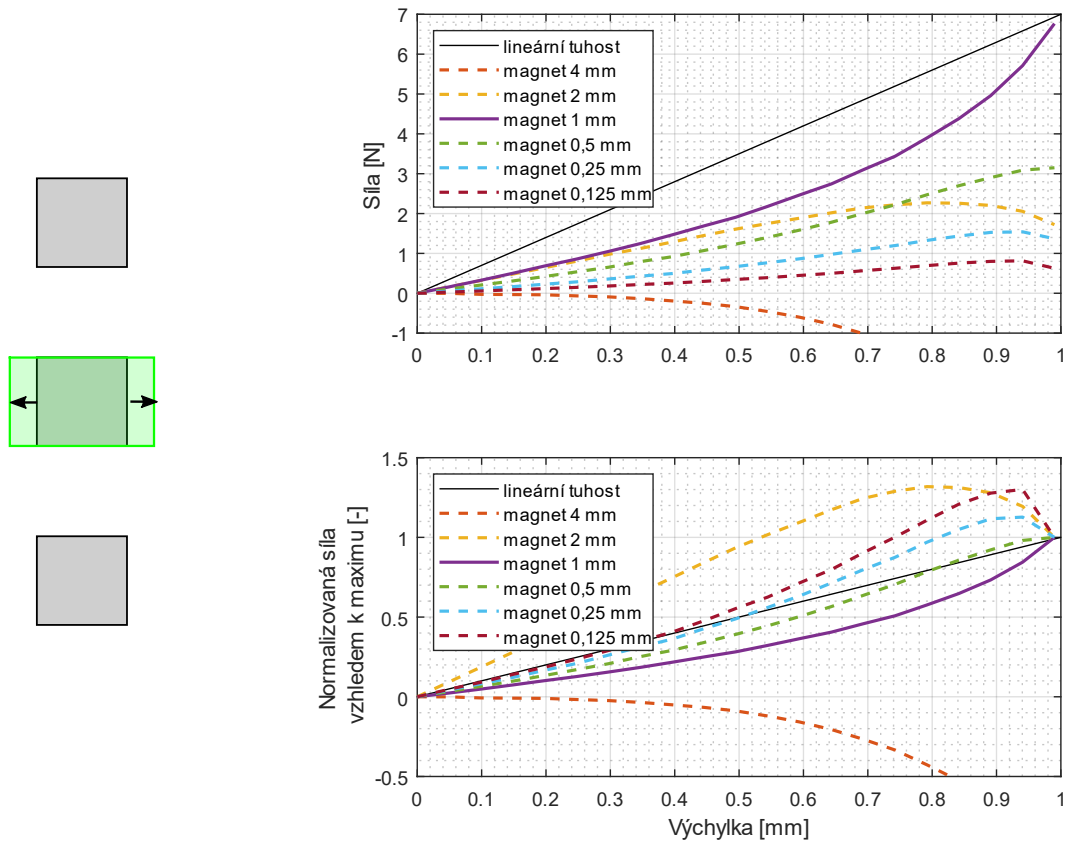
Změna šířky pevných magnetů způsobuje potom zcela nevhodné chování, viz Obr. 47. Jak rozšíření, tak zúžení magnetu způsobí snížení síly a pro velký rozdíl šířky vede až k obrácení znaménka síly. Pro malý rozdíl šířky magnetů můžeme říct, že se změní charakter tuhosti na měkknoucí, což by v určité situaci mohlo být výhodné. Avšak problémem zde bude nízká hodnota síly.



Obr. 47 Závislost síly na výchylce pro různou šířku pevných magnetů

## 6.2.6 Změna šířky pohyblivého magnetu

Při změně šířky pohyblivého magnetu jsou opět výsledky velice podobné jako pro pevné magnety, viz Obr. 48. Stejně jako v případě změny výšky můžeme říci, že je vhodnější měnit výšku pohyblivého magnetu do vyšších hodnot, protože je to ekonomičtější.



Obr. 48 Závislost síly na výchylce pro různou šířku pohyblivého magnetu



### 6.3 Shrnutí poznatků potřebných k návrhu magnetů pro nelineární tuhost

Nyní je třeba poznatky uvedené v kapitolách 6.1 a 6.2 jaksí ucelit, aby bylo možné se v nich rychle zorientovat a vyvodit z nich závěry pro návrh magnetů pro nelineární mikro sběrač energie.

Z kapitoly 6.2 vyplývá poměrně jasně, že různá šířka magnetů není příliš vhodná. V určitém rozsahu může vést k měkcnoucí charakteristice, avšak pro tvrdnoucí je zcela nevhodná. Tento fakt se projeví jak při současné změně výšky, tak při změně pouze šířky. Změna výšky pouze jednoho magnetu může být využita, avšak nepřináší žádné zvláštní výhody.

Naopak z kapitoly 6.1 se jeví jako vhodné používat magnety shodných rozměrů. Je zde vhodné zdůraznit, že samotné zvyšování šířky nebo výšky magnetů nevede příliš k růstu síly ani změně nelinearity. Největší vliv má současná změna velikosti magnetů při zachování celkového průřezu, kdy zvětšení rozměru vede jak k výraznému zvýšení síly, tak ke snížení nelinearity. Pro nelineární charakteristiku se tedy jeví použít magnety čtvercového průřezu s dostatečně malými rozměry oproti mezeře, aby byla silná nelinearita.

Na tomto místě je potřeba podotknout, že v případě potřeby silné nelinearity a zároveň vysoké hodnotě síly se jedná o prakticky nereálnou kombinaci. Zvětšením magnetů je totiž zvětšena síla, ale snížena nelinearita. Sílu lze samozřejmě zvyšovat zvětšením hloubky magnetů beze změny nelinearity, avšak to je možné jen v omezené míře. V případě nutné potřeby vysoké síly a zároveň silné nelinearity by bylo zapotřebí použít řešení s jinou topologií magnetů, ve které by bylo nejspíše zapotřebí magnetů více.

## 7 Model, realizace a měření piezoelektrického vibračního mikro sběrače

Jedním ze dvou častých způsobů realizace vibračního mikro sběrače je využití jednostranně vetknutého piezoelektrického nosníku, respektive vícevrstvého jednostranně vetknutého nosníku, kde alespoň jednu vrstvu tvoří piezoelektrický materiál. Takový nosník je velice snadno vyrobitelný nebo ho lze přímo koupit. O konkrétních případech bude pojednáno dále. Zde jen uveďme že se jedná o variantu, která je snadná na realizaci v lineární variantě. Pro nelineární variantu prakticky pouze stačí doplnit vhodné magnety. Pro návrh je třeba mít k dispozici model, o kterém bude pojednávat následující kapitola.

### 7.1 Model piezoelektrického vibračního mikro sběrače

Pro návrh piezoelektrického vibračního mikro sběrače je třeba vhodně upravit základní rovnice, abychom z nich získali alespoň přibližnou hodnotu elektrického tlumení, které je zásadní pro posouzení návrhu. Základní matematický popis pomocí diferenciálních rovnic totiž dává na první pohled pouze představu o mechanickém tlumení a není možné snadno odhadnout hodnotu tlumení způsobeného elektromechanickou přeměnou energie. V této kapitole bude ukázána vhodná metoda úpravy základních rovnic do podoby, ze které bude možno poměrně dobře odhadnout tlumení způsobené piezoelektrickou vrstvou.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1.2, piezoelektrický vibrační mikro sběrač lze popsat následujícími rovnicemi. Rovnice (12) je vlastně rovnice mechanického kmitání s přidaným členem ovlivnění piezoelektrickým materiálem. Jedná se o člen  $\theta u$ , který můžeme interpretovat jako tlumící sílu vzniklou piezoelektrickou přeměnou energie. Rovnice (13) je potom rovnicí elektrickou popisující nabíjení a současné vybíjení kapacity piezoelektrické vrstvy.

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx + \theta u = F_{ext} \quad (12)$$

$$\dot{u} = \frac{1}{C} \left( \theta \dot{x} - \frac{u}{R} \right) \quad (13)$$

Pro další matematický popis je vhodné přejít do Laplaceovy transformace. Následující vztahy (14) a (15) pro přehled ukazují zápis napětí a výchylky v Laplaceově transformaci tak, jak s nimi bude dále pracováno.

$$U(s) = L\{u(t)\}(s) \quad (14)$$

$$X(s) = L\{x(t)\}(s) \quad (15)$$

Na rovnice (12) a (13) můžeme tedy aplikovat Laplaceovu transformaci a pro nulové počáteční podmínky dostaneme rovnice ve tvaru:

$$mX(s)s^2 + b_m X(s)s + kX(s) + \theta U(s) = F_{ext}(s) \quad (16)$$

$$U(s)s = \frac{1}{C} \left( \theta X(s)s - \frac{U(s)}{R} \right) \quad (17)$$

Z elektrické rovnice v Laplaceově tvaru (17) je možné poměrně snadno vyjádřit napětí jako funkci polohy:

$$U(s) = \frac{\theta}{C \left( s + \frac{1}{RC} \right)} X(s)s = \frac{\theta R}{1 + RCs} X(s)s \quad (18)$$

Upravený vztah (18) je možno využít jak pro určení výstupního napětí při sběru energie, tak pro účely využití piezoelektrického materiálu jakožto čidla. Zde pro další úpravy dosadíme tento vztah (18) do mechanické rovnice kmitání (16) a dostáváme jedinou obecnou obyčejnou rovnici kmitání popisující pouze polohu a její derivace, tedy nikoliv elektrické veličiny.

$$mX(s)s^2 + b_m X(s)s + kX(s) + \frac{\theta^2 R}{1 + RCs} X(s)s = F_{ext}(s) \quad (19)$$

Člen představující vliv piezoelektrické přeměny energie nám tuto rovnici činí obecnou, a tedy ne triviálně řešitelnou. Vhodným postupem je nyní přejít z Laplaceovy transformace do transformace Fourierovy. Rovnice (19) se poté změní do tvaru:

$$mX(\omega)(i\omega)^2 + b_m X(\omega)i\omega + kX(\omega) + \frac{\theta^2 R}{1 + RCi\omega} X(\omega)i\omega = F_{ext}(\omega) \quad (20)$$

Nyní po přechodu do Fourierovy transformace lze upravit poslední člen levé strany představující vliv piezoelektrické vrstvy. Úpravu tohoto členu provedme samostatně bez přepisování zbylé části rovnice.

$$\begin{aligned} \frac{\theta^2 R}{1 + RCi\omega} &= \frac{\theta^2 R}{1 + RCi\omega} \frac{1 - RCi\omega}{1 - RCi\omega} = \theta^2 \frac{R - R^2 Ci\omega}{1 - (RCi\omega)^2} = \theta^2 \frac{R - R^2 Ci\omega}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \\ &= \theta^2 \left( \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} - \frac{R^2 Ci\omega}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \frac{i\omega}{i\omega} \right) \\ &= \theta^2 \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} + \theta^2 \frac{R^2 C \omega^2}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \frac{1}{i\omega} \end{aligned} \quad (21)$$

A výsledný upravený tvar opět dosadíme do rovnice (20):

$$\begin{aligned} &mX(\omega)(i\omega)^2 + b_m X(\omega)i\omega + kX(\omega) \\ &+ \left( \theta^2 \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} + \theta^2 \frac{R^2 C \omega^2}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \frac{1}{i\omega} \right) X(\omega)i\omega = F_{ext}(\omega) \end{aligned} \quad (22)$$

Dosazený výraz můžeme roznásobit a dostáváme tvar, ze kterého můžeme již vidět člen odpovídající přidané elektrické tuhosti a přidanému elektrickému tlumení.

$$mX(\omega)(i\omega)^2 + b_m X(\omega)i\omega + kX(\omega) + \theta^2 \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} X(\omega)i\omega + \theta^2 \frac{R^2 C \omega^2}{1 + R^2 C^2 \omega^2} X(\omega) = F_{ext}(\omega) \quad (23)$$

Člen odpovídající elektrickému tlumení, tedy tlumení způsobenému elektromechanickou přeměnou energie na piezoelektrické vrstvě je člen násobený výrazem  $X(\omega)i\omega$ , stejně jako tlumení mechanické:

$$b_e = \theta^2 \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \quad (24)$$

A stejně tak člen odpovídající elektrické tuhosti, tedy tuhosti způsobené elektromechanickou přeměnou energie na piezoelektrické vrstvě je člen násobený výrazem  $X(\omega)$ , stejně jako mechanická tuhost:

$$k_e = \theta^2 \frac{R^2 C \omega^2}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \quad (25)$$

Z odvozených výrazů je patrné, že vypočtené elektrické tlumení a tuhost jsou závislé nejen na parametrech pieza, tedy na kapacitě, elektromechanickém koeficientu a na odporu připojené zátěže, ale také na frekvenci  $\omega$ , se kterou vibrační mikro sběrač aktuálně kmitá. Pro různé frekvence se budou tyto hodnoty lišit.

Z výsledku je též patrné, proč bylo zapotřebí přejít do Fourierovy transformace. Vzhledem k tomu, že hodnoty platí vždy pro jednu frekvenci, je jasné že se musí jednat o ustálený stav. A právě Fourierova transformace oproti Laplaceově transformaci je vhodná pro řešení ustálených stavů, kdy oproti Laplaceově transformaci postrádá reálnou část operátoru, která postihuje právě přechodovou část kmitání.

Dále je vhodné odvodit, jaká je optimální hodnota odporu zátěže, při které je maximální elektrické tlumení. Toto zjistíme jednoduše pomocí derivace elektrického tlumení dle odporu a položení této derivace rovno nule:

$$\begin{aligned} \frac{\partial b_e}{\partial R} &= \frac{\partial}{\partial R} \left( \theta^2 \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \right) = \theta^2 \cdot \frac{1 + R^2 C^2 \omega^2 - R 2R C^2 \omega^2}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)^2} \\ &= \theta^2 \frac{1 - R^2 C^2 \omega^2}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

Výslednou derivaci položíme rovno nule:

$$\frac{\partial b_e}{\partial R} = \theta^2 \frac{1 - R^2 C^2 \omega^2}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)^2} = 0 \quad (27)$$

Dále zjednodušíme se znalostí skutečnosti, že výraz bude nulový, pokud bude čitatel nulový:

$$1 - R_{OPT}^2 C^2 \omega^2 = 0 \quad (28)$$

$$R_{OPT}^2 C^2 \omega^2 = 1 \quad (29)$$

$$R_{OPT}^2 = \frac{1}{C^2 \omega^2} \quad (30)$$

$$R_{OPT} = \frac{1}{C\omega} \quad (31)$$

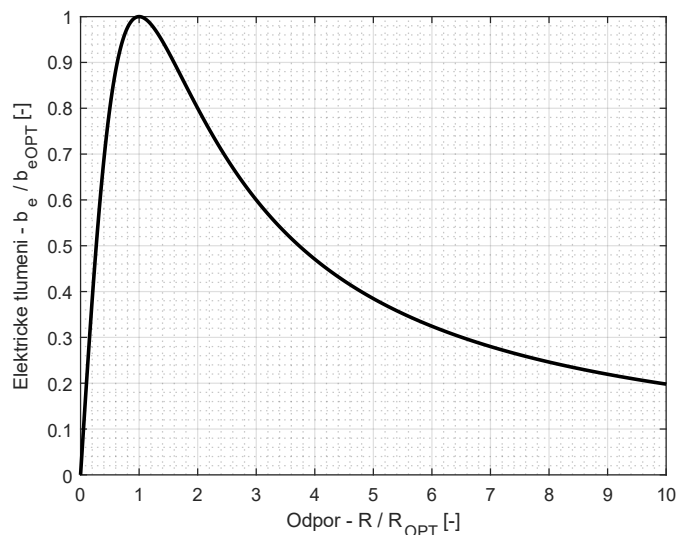
Výsledný vztah pro hodnotu optimálního odporu zátěže (31) je velice triviální a snadno aplikovatelný na jakýkoliv piezoelektrický vibrační mikro sběrač. Stačí změřit kapacitu piezoelektrické vrstvy, znát frekvenci kmitání a snadným výpočtem lze určit, jaký zvolit odpor zátěže.

Tento vztah můžeme dále využít pro výpočet velikosti optimálního elektrického tlumení tak, že vztah (31) dosadíme do vztahu (24) a dostáváme vztah pro výpočet maximálního elektrického tlumení:

$$b_{eOPT} = \theta^2 \frac{\frac{1}{C\omega}}{1 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2 C^2 \omega^2} = \theta^2 \frac{1}{2C\omega} \quad (32)$$

Toto maximální tlumení už je funkcí nejen kapacity a frekvence, ale také elektromechanického koeficientu  $\theta$ .

Na závěr této kapitoly ještě uvedme graf závislosti elektrického tlumení na odporu připojené zátěže. Tato závislost na Obr. 49 ukazuje, že pro optimální odpor je tlumení maximální a na obě strany od této hodnoty se tlumení snižuje.



Obr. 49 Závislost elektrického tlumení na hodnotě zátěžného odporu

## 7.2 Způsoby určení parametrů piezoelektrického vibračního mikro sběrače

V předchozí kapitole byl popsán matematický model piezoelektrického vibračního mikro sběrače a jeho úpravy. Nyní je potřeba pojednat o způsobech určení konkrétní hodnoty parametrů modelu. Pro jednoduché topologie nosníku je možné určit parametry analyticky, viz [V8]. Ve složitějších případech je nutno vycházet z numerického modelu nebo z již vyrobeného zařízení. Zde by bylo možno namítnout, že u vyrobeného zařízení není nutné dělat zpětně model. Je to však vhodné například kvůli výpočtu optimálního zátěžného odporu. Popsané metody lze využít jak v případě numerického modelu, tak v případě experimentálního vzorku.

Určení mechanických parametrů je triviální a není třeba se jím na tomto místě zabývat. Stejně tak určení vlastní elektrické kapacity pieza, které je možné provést jednoduchým měřením pomocí multimetru. Podstatným parametrem, který je třeba určit je elektromechanický koeficient  $\theta$ . Jeho možné způsoby určení budou popsány v následujících podkapitolách.

### 7.2.1 Určení elektromechanického koeficientu z elektrického napětí a mechanické výchylky

Teoreticky nejsnazším způsobem je určení elektromechanického koeficientu  $\theta$  z elektrického napětí a mechanické výchylky. V tomto případě vyjdeme z rovnice (13), avšak budeme uvažovat nekonečný zátěžný odpor. V takovém případě se rovnice zjednoduší:

$$\dot{u} = \frac{1}{C} \left( \theta \dot{x} - \frac{u}{\infty} \right) = \frac{1}{C} \theta \dot{x} \quad (33)$$

A po integraci můžeme napsat snadný vztah:

$$u = \frac{\theta}{C} x \quad (34)$$

Tento vztah platí jak pro okamžité hodnoty, tak samozřejmě pro amplitudy. Pokud tedy dokážeme změřit amplitudu výchylky a amplitudu napětí při libovolné frekvenci a známe kapacitu pieza, můžeme snadno určit elektromechanický koeficient:

$$\theta = \frac{uC}{x} \quad (35)$$

V případě MKP modelu lze toto snadno určit například z harmonické analýzy, a to pouze z jednoho bodu pro jednu frekvenci. V případě experimentu se jedná opět o měření při buzení jednou konstantní frekvencí. Měření výchylky je možné laserovým snímačem. Zde je měření zcela přesné a bezproblémové. Měření napětí je třeba provést s dostatečně vysokým zátěžným odporem, který se však nikdy nebude blížit potřebnému nekonečnu. Je tak vždy otázkou, jaké přesnosti lze dosáhnout a obecně se tato metoda nejeví pro experiment zcela vhodná.

## 7.2.2 Určení elektromechanického koeficientu z vlastní frekvence při různých elektrických zátěžích

Dalším způsobem určení je využít skutečnosti, že změnou elektrické zátěže měníme přidanou elektrickou tuhost systému, a tedy i vlastní frekvenci, viz rovnice (25). Pro zatížení nulovým odporem, tedy vlastně zkratem (měření nakrátko), je elektrická tuhost nulová. Při zvyšování odporu se mění elektrická tuhost i elektrické tlumení, a to vše navíc v závislosti na frekvenci. Je tedy vhodné pro tento účel využít zatížení nekonečným odporem, tedy nechat elektrody naprázdno. Potom se totiž vztah (25) výrazně zjednoduší:

$$k_e(R = \infty) = \frac{\theta^2}{C} \quad (36)$$

Postup je tedy takový, že změříme vlastní frekvenci s nulovou zátěží, tedy ve zkratu, a s nekonečnou zátěží, tedy naprázdno. Z těchto dvou hodnot a ze znalosti kmitající hmotnosti a kapacity pieza můžeme určit elektromechanický koeficient piezo elektrického vibračního mikro sběrače. Pro určení vyjdeme ze vztahu pro vlastní frekvenci:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (37)$$

Tento obecný vztah přímo platí při zatížení nulovým odporem. V případě zatížení nekonečným odporem do něj přibude elektrická tuhost:

$$\Omega_\infty = \sqrt{\frac{k + k_e}{m}} \quad (38)$$

Ze vztahů (37) a (38) potom můžeme vyjádřit elektrickou tuhost:

$$k_e = \frac{\Omega_\infty^2 - \Omega_0^2}{m} \quad (39)$$

S užitím vztahu (36) můžeme vyjádřit elektromechanický koeficient:

$$\theta = \sqrt{Ck_e} \quad (40)$$

A po dosazení dostaneme finální vztah:

$$\theta = \sqrt{C \frac{\Omega_\infty^2 - \Omega_0^2}{m}} \quad (41)$$

Tato metoda je vhodná v případě, kdy jsme schopni poměrně přesně určit vlastní frekvenci, a pokud vlastní frekvence naprázdno a nakrátko se znatelně liší. Taktéž je zapotřebí, aby byl systém málo tlumený, a mohlo být uvažováno, že vlastní tlumená frekvence je shodná s netlumenou. Pokud tomu tak není, je potřeba využití jiné metody.

### 7.2.3 Určení elektromechanického koeficientu z tlumení při různých elektrických zátěžích

V předcházející kapitole jsme využívali vlivu změny elektrické zátěže na vlastní frekvenci. Stejně tak můžeme využít vlivu na změnu tlumení. Vztah (24) ukazuje vliv odporu na přidané elektrické tlumení. Oproti tuhosti je odpor nulový jak pro zatížení na krátko, tak pro zatížení naprázdno. Jeho maximum je pro optimální hodnotu odporu, která byla odvozena v kapitole 7.1. Připomeňme na tomto místě jak hodnotu optimálního odporu, tak následný vztah pro výpočet elektrického tlumení:

$$R_{OPT} = \frac{1}{C\omega} \quad (42)$$

$$b_{e_{OPT}} = \theta^2 \frac{1}{2C\omega} \quad (43)$$

Vzhledem k tomu, že se nejedná o měření s nulovým nebo nekonečným odporem, nachází se ve vztazích již také frekvence. Určení tlumení je zpravidla realizováno pomocí volné odezvy, a tedy při kmitání s vlastní frekvencí. Do vztahů je tedy potřeba dosazovat vlastní frekvenci. Pro výpočty zde lze uvažovat, že vlastní frekvence se vzhledem k měnící se elektrické zátěži mění pouze tak nepatrně, že ji můžeme brát v potaz jako konstantní.

Postup při měření je takový, že změříme poměrný útlum (lze vycházet i ze součinitele dozívání) při zatížení nulovým odporem a při zatížení optimálním odporem. Můžeme také zvolit měření s nekonečným odporem a optimálním odporem. Z těchto hodnot a dále ze znalosti mechanických parametrů mikro sběrače a kapacity pieza určíme elektromechanický koeficient. Vyjdeme ze vztahu pro poměrný útlum:

$$\xi_0 = \frac{b}{2m\Omega_0} \quad (44)$$

Tento obecný vztah platí přímo pro měření s nulovým odporem. Pro měření s optimálním odporem vztah upravíme:

$$\xi_{OPT} = \frac{b + b_{e_{OPT}}}{2m\Omega_0} \quad (45)$$

Ze vztahů (44) a (45) vyjádříme vztah pro výpočet elektrického tlumení pro dané měření:

$$b_{e_{OPT}} = (\xi_{OPT} - \xi_0)2m\Omega_0 \quad (46)$$

A po dosazení do vztahu (43) a upravení dostáváme výsledný vztah pro elektromechanický koeficient:

$$\theta = 2\Omega_0\sqrt{(\xi_{OPT} - \xi_0)mC} \quad (47)$$

V této metodě je potřeba určit s dostatečnou přesností tlumení systému s různými zátěžemi a stejně jako v minulém se od sebe musí toto tlumení znatelně lišit, aby bylo možné vypočítat uvěřitelné hodnoty.



### 7.2.4 Prosté posouzení dostatečné hodnoty elektrického koeficientu z maximálního elektrického tlumení.

Postup z předchozí kapitoly lze použít zjednodušeně pro zhodnocení maximálního tlumení vibračního mikro sběrače. Z předchozího totiž víme, že pro lineární oscilátor je optimální elektrické tlumení rovno tlumení mechanickému. Pro nelineární je vhodné, aby elektrické tlumení bylo i vyšší. Zda je splněna alespoň první podmínka, lze snadno ověřit pouhým porovnáním naměřeného poměrného útlumu. Pokud má totiž platit podmínka rovnosti elektrického a mechanického tlumení, musí platit:

$$\xi_{OPT} = 2\xi_0 \quad (48)$$

Pokud je poměrný útlum s optimální zátěží dvojnásobný než s nulovou zátěží, je elektromechanický koeficient vhodný pro optimální operaci v lineárním mikro sběrači. Připomeňme zde, že to platí pro danou frekvenci a hmotnost. Pokud bude mikro sběrač dále doplněn o konstrukční prvky měnící tyto parametry, bude se při nezměněném elektromechanickém koeficientu měnit jeho dostatečnost pro elektrické zatlumení systému.

## 7.3 Realizace a měření vzorků piezoelektrických vibračních mikro sběračů

V této kapitole bude pojednáno o vzorcích piezoelektrických vibračních mikro sběračů, které byly v rámci této práce použity. Především zde jde o změření jejich parametrů a vyhodnocení.

### 7.3.1 Komerční mikro sběrač Midé

Prvním testovaným vzorkem byl komerčně dostupný piezoelektrický mikro sběrač Midé V21BL, který už byl dříve používán v jiných projektech. Byl měřen se závažím na volném konci, jak je ukázáno na Obr. 50. Z volné odezvy byla určena vlastní frekvence a poměrný útlum pro různé zatížení.



Obr. 50 Piezoelektrický mikro sběrač Midé V21BL při měření

m	4,4 g
f <sub>0</sub>	34,6 Hz
C	19 nF
ξ <sub>0</sub>	0,008
ξ <sub>OPT</sub>	0,016

Tab. 2 Parametry Midé V21BL v použité konfiguraci

Změřené parametry jsou v Tab. 2 a již na první pohled je zřejmé, že mikro sběrač je navržen pro optimální elektrické tlumení v lineárním režimu. Při volbě optimálního odporu je totiž poměrný útlum dvojnásobkem poměrného útlumu s nulovou zátěží tak, jak o tom bylo pojednáno v kapitole 7.2.4. Ze změřených hodnot lze snadno vypočítat elektromechanický koeficient použitím vztahu (47):

$$\theta = 4\pi 34,6 \sqrt{(0,016 - 0,008) 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 19 \cdot 10^{-9}} = 0,36 \text{ mN/V} \quad (49)$$

### 7.3.2 Vlastní mikro sběrač s piezo vrstvami v módu 33

Druhým měřeným vzorkem byl mikro sběrač vlastní konstrukce. Nosným jádrem byl ocelový nosník tloušťky 0,3 mm, šířky 15 mm a délky 42 mm. Na něm byly oboustranně nalepeny pásy piezoelektrického materiálu od firmy Smart materials [57] s označením MFC, konkrétně typ M2814-P1 o rozměrech 28x14 mm pracující v módu 33. Bližší podrobnosti byly publikovány v [V10].

Na volném konci nosníku bylo závaží obdobně jako u předchozího vzorku. Foto měřeného mikro sběrače je na Obr. 51. Stejně jako v předchozím byla z volné odezvy určena vlastní frekvence a poměrný útlum pro různé zatížení.



Obr. 51 Piezoelektrický mikro sběrač vlastní konstrukce při měření

m	7,6 g
f <sub>0</sub>	48 Hz
C	3 nF
ξ <sub>0</sub>	0,033
ξ <sub>OPT</sub>	0,042

Tab. 3 Parametry vlastního mikro sběrače v módu 33 v použité konfiguraci

Změřené parametry jsou v Tab. 3 a na rozdíl od předchozího vzorku je zde zřejmé, že elektrické tlumení ani při optimální elektrické zátěži neposkytuje dostatečné tlumení ani pro lineární mikro sběrač. Elektrické tlumení dosahuje pouze cca 30% tlumení mechanického. Ze změřených hodnot lze opět snadno vypočítat elektromechanický koeficient použitím vztahu (47):

$$\theta = 4\pi 48 \sqrt{(0,042 - 0,033) 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-9}} = 0,28 \text{ mN/V} \quad (50)$$

### 7.3.3 Vlastní mikro sběrač s piezo vrstvami v módu 31

Třetí vzorek byl velice obdobný jako druhý vzorek. Rozdíl byl v piezoelektrické vrstvě, která byla opět od Firmy Smart materials se stejnými rozměry, avšak jednalo se o typ M2814-P2 pracující v módu 31. Ostatní rozměry jsou shodné a ani fotografie zde není třeba, neboť na první pohled vypadá tento mikro sběrač stejně a měření bylo taktéž na stejné konstrukci.

U tohoto vzorku byly však měřeny natolik malé rozdíly v tlumení s optimální elektrickou zátěží a bez ní, že muselo být využito jiné metody. Bylo využito určení elektromechanického koeficientu z výchylky a napětí, jak je to popsáno v kapitole 7.2.1.

Zde se však objevil problém s vysokým výstupním napětím pieza. K řešení lze použít snadného způsobu, kdy je k piezu paralelně připojen kondenzátor dostatečné kapacity. Tento kondenzátor způsobí, že měřené napětí je nižší, a zároveň nezpůsobí zkreslení měření, jako by to bylo při připojení rezistoru. K výpočtu je poté třeba uvažovat celkovou kapacitu pieza a připojeného kondenzátoru.

m	7,6 g	ξ <sub>0</sub>	0,033
f <sub>0</sub>	48 Hz	x <sub>A</sub>	2 mm
C	67 nF	u <sub>A</sub>	0,15 V
C <sub>EXT</sub>	10 μF		

Tab. 4 Parametry vlastního mikro sběrače v módu 31 v použité konfiguraci

Naměřené hodnoty jsou obsaženy v Tab. 4. S pomocí vztahu (35) je možné snadno vypočítat elektromechanický koeficient.

$$\theta = \frac{0,15 \cdot 10,067 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,75 \text{ mN/V} \quad (51)$$

### 7.3.4 Závěry z měření použitých vzorků

V této části přichází na řadu zhodnocení určených parametrů piezoelektrických vibračních mikro sběračů, které byly vzaty v potaz pro práci na nelineární variantě. Pouhé srovnání elektromechanického koeficientu je prakticky nevypovídající. Pro účely mikro sběrače nás zajímá maximální dosažitelné tlumení, na které má vedle elektromechanického koeficientu vliv ještě kapacita pieza a frekvence.

Nejdříve se zamysleme nad otázkou frekvence. V případě lineárního mikro sběrače by nás zajímalo samozřejmě chování při buzení vlastní frekvencí. Pro tuto vlastní frekvenci je možno si vyjádřit výpočet poměrného elektrického útlumu, kdy vyjdeme ze vztahu (43) pro koeficient elektrického tlumení:

$$b_{eOPT} = \theta^2 \frac{1}{2C\Omega_0} = \theta^2 \frac{1}{2C\sqrt{\frac{k}{m}}} \quad (52)$$

Ze kterého dále vyjádříme právě poměrný elektrický útlum:

$$\xi_{eOPT} = \frac{b_{eOPT}}{2m\Omega_0} = \frac{b_{eOPT}}{2\sqrt{km}} = \theta^2 \frac{1}{2C\sqrt{\frac{k}{m}}2\sqrt{km}} = \theta^2 \frac{1}{4Ck} \quad (53)$$

Z výsledného vztahu (53) je zřejmé, že pokud budeme měnit vlastní frekvenci přidáním hmotnosti na volný konec nosníku, bude se sice měnit elektrické tlumení, ale poměrný útlum zůstane nezměněn. Za předpokladu, že vlastní poměrný útlum nosníku zůstane taktéž nezměněn, bude i jejich poměr konstantní.

Pokud bude vlastní frekvence změněna zvýšením tuhosti, zejména zde lze přepokládat vliv magnetů na konci nosníku způsobujících dále také nelineární chování, poté se elektrický poměrný útlum snižuje.

Nosníky byly měřeny s různou přidanou hmotností, avšak přidaná tuhost zde nebyla, a proto je lze srovnávat bez zabývání se otázkou změny vlastní frekvence. Co však zanedbat nelze a co má podstatný vliv, je kapacita pieza. Je tedy vhodné použít metriku, která obsahuje nejen elektromechanický koeficient, ale také kapacitu pieza. A rovněž je vhodné vyjít ze vztahu pro výpočet elektrického tlumení (32). Je potom nasnadě, že tlumicí schopnosti piezoelektrické vrstvy (TSP) na daném nosníku vhodně reprezentuje vztah:

$$TSP = \frac{\theta^2}{C} \quad (54)$$

Obdobný vztah přímo pro piezo materiál lze často najít v literatuře [58], kdy ve vztahu nejsou koeficienty pro model s jedním stupněm volnosti daného nosníku, ale obecné materiálové konstanty. Tento vztah označující číselně kvalitu nebo spíše řekněme efektivitu pieza se nazývá figure of merit (FoM).

$$FoM = \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}} \quad (55)$$

Tlumičí schopnosti piezoelektrické vrstvy na daném vzorku nosníku vyjádřené kvantitativně pomocí vztahu (54) a označené zkratkou TSP jsou pro všechny 3 vzorky vypočítané v Tab. 5. V tomto směru vychází komerční vzorek Midé zcela nejhůře. Naproti tomu vlastní vzorky vyrobené za pomoci MFC vychází lépe. V případě MFC v módu 31 je to nepatrně vyšší hodnota, v případě módu 33 je to hodnota vyšší dokonce více než trojnásobně.

	$\Theta$ mN/V	C nF	TSP N <sup>2</sup> /V <sup>2</sup> F	$\xi_0$ -	$\xi_e$ -	$\xi_e/\xi_0$ %
Midé	0.36	19	6.8	0.008	0.008	100.0 %
mod 33	0.28	3	26.1	0.033	0.009	27.3 %
mod 31	0.75	67	8.4	0.033	0.003	9.2 %

Tab. 5 Srovnání testovaných vzorků piezoelektrických mikro sběračů

Pro účely sběru energie však není podstatná pouze hodnota TSP, ze které je určeno tlumení, ale také poměr elektrického tlumení a vlastního tlumení mechanického. Tento poměr je vyjádřen v posledním sloupci stejné tabulky. Z těchto hodnot je patrné, že komerční vzorek Midé je navržen pro optimální operaci v lineárním režimu, kdy je poměr elektrického a mechanického tlumení 100 %. V případě vzorků s MFC vrstvami už je tento poměr výrazně nižší. Hlavním důvodem je vysoké vlastní mechanické tlumení nosníků s MFC vrstvami. Oproti komerčnímu mikro sběrači Midé je vlastní mechanické tlumení více než čtyřnásobné.

V žádném případě tedy nebylo dosaženo poměru elektrického tlumení k mechanickému tlumení více než 100 %. Metody pro zvyšování výkonu nelineárního mikro sběrače představené v kapitole 5 jsou zde tak prakticky nepoužitelné. Ze vztahu (53) je navíc patrné, že dalším zvýšením tuhosti přidáním magnetů by se elektrické tlumení ještě více snížilo. Vzorky s MFC vrstvami jsou tak pro nelineární vibrační mikro sběrač prakticky nepoužitelné a ani pro lineární se nejeví příliš vhodné.

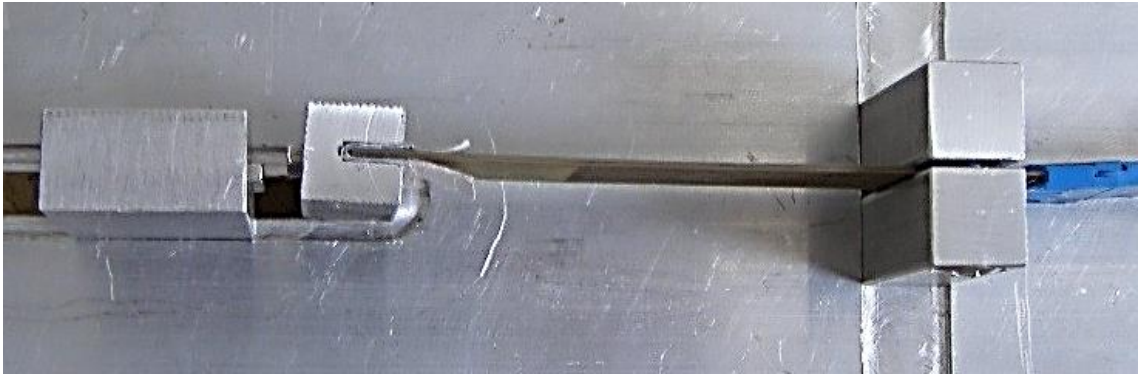
Komerční vzorek Midé má sice tento poměr 100 %, avšak je u něj výrazně omezena maximální výchylka volného konce na 2 mm. Vzhledem k tomu, že piezoelektrickým materiálem je zde keramika, hrozí při vyšších výchylkách křehký lom. Pro nelineární mikro sběrač se tak také příliš nehodí. Další experimenty s piezo keramikou byly publikovány v [V9].

Tuto nevýhodu měl odstranit mikro sběrač s MFC vrstvami, které snesou velké výchylky a mají taktéž dobré piezoelektrické vlastnosti, avšak zde je problém s vysokým mechanickým tlumením. Lze však říct, že MFC vrstvy by šly použít na jiný typ mikro sběrače, kdy je využíváno přímo dynamické přetvoření konstrukce, a nikoliv vibrace ve smyslu zrychlení. Taktéž se ukazuje jako vhodné využití jako senzory.

V širším kontextu této práce byl prováděn výzkum také na dalších typech piezoelektrických materiálů, např [V1], [V5] a [V6]. Žádné z výsledků však nepřinesly výrazně lepší výsledky než materiály zde uvedené.

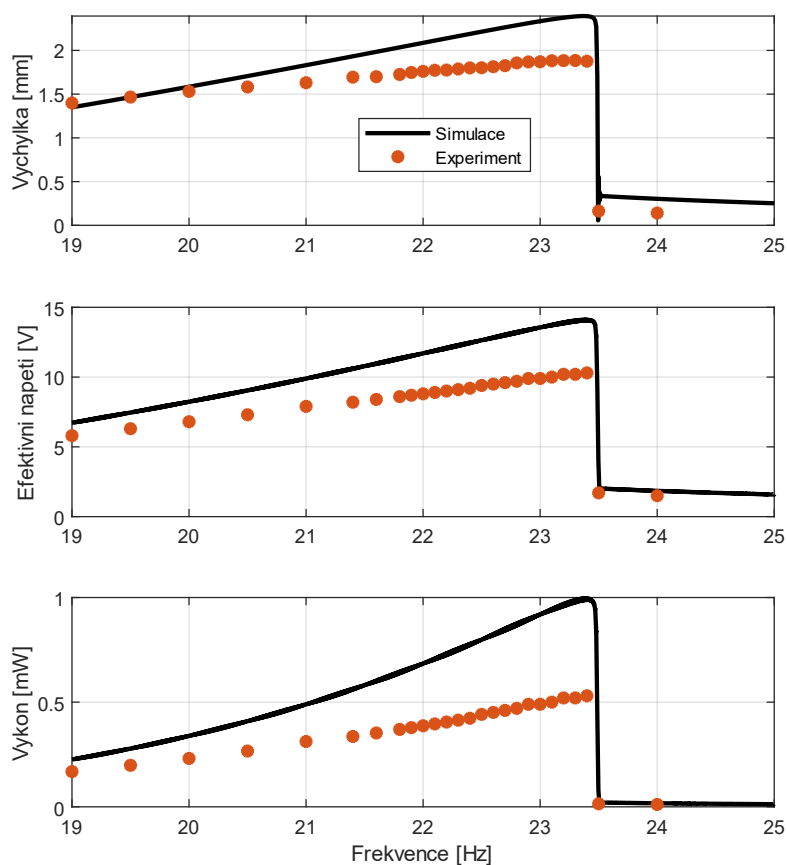
## 7.4 Monostabilní piezoelektrický vibrační mikro sběrač

Z minulé kapitoly vyplynulo, že jediným vhodným vzorkem pro využití pro realizaci sběru energie je vzorek Mide. V rámci výzkumu byl tento vzorek doplněn o magnety způsobující nelineární chování. Tento návrh je detailně popsán ve článku [V16]. Navržený monostabilní mikro sběrač je na Obr. 52.



*Obr. 52 Fotografie nelineárního vibračního mikro sběrače*

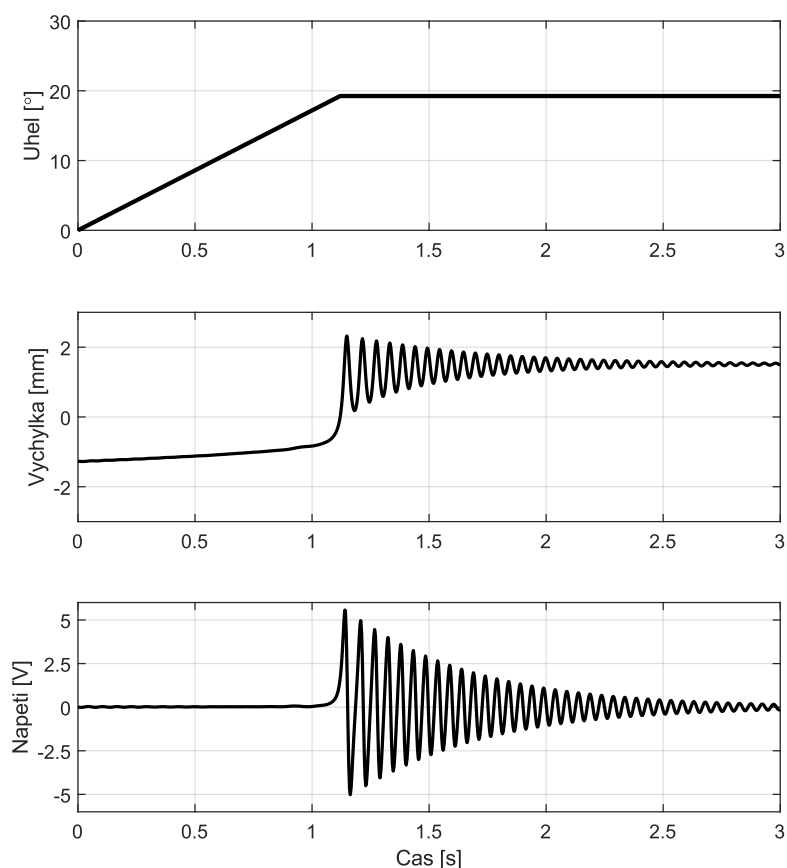
Jeho chování bylo detailně popsáno v publikaci [V13]. Zde uvedeme výsledek simulace experimentu s monostabilní nelineární charakteristikou. Buzení bylo sinusové s amplitudou 0,3 g. Závislost výchylky, napětí a výstupního výkonu na budící frekvenci je na Obr. 53. Nelinearita se zde uplatňuje v poměrně malém rozsahu. Z předchozí kapitoly je navíc zřejmé, že zvýšení elektrického tlumení a tím zvýšení výkonu v aktuálním pásmu není možné. Snížením tlumení by bylo možné pásmo mírně rozšířit za současného snížení výkonu, avšak výsledky jsou v tomto případě natolik slabé, že k tomuto kroku nebylo vůbec přistoupeno.



Obr. 53 Závislost výchylky, napětí a výstupního výkonu na budicí frekvenci

## 7.5 Bistabilní piezoelektrický vibrační mikro sběrač

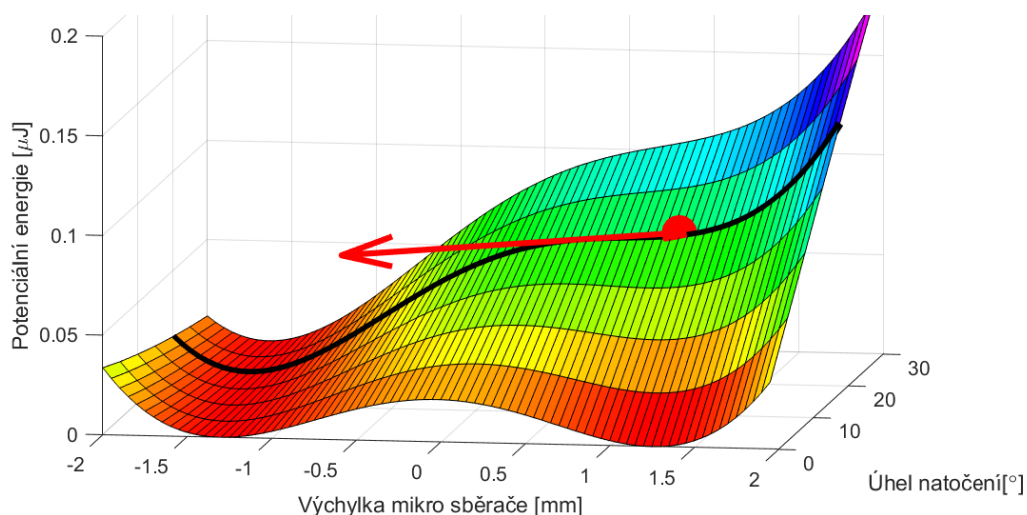
Další aplikací stejného vzorku piezoelektrického mikro sběrače Mide bylo upravení magnetů pro bistabilní charakteristiku. Detailní popis je obsažen v článku [V11]. Výhodou takového bistabilního uspořádání je možnost využití typicky houpavého pohybu ruky. Zatímco samotná frekvence pohybu je velice malá, lze využít natočení ruky v tíhovém poli země. Tíhová síla tak při každém pohybu ruky způsobí překlopení mikro sběrače do druhé stabilní polohy, přičemž dojde k jeho rozkmitání. Tento přechodový děj je na Obr. 54.



*Obr. 54 Přechodový děj při překlopení bistabilního mikro sběrače do druhé rovnovážné polohy*

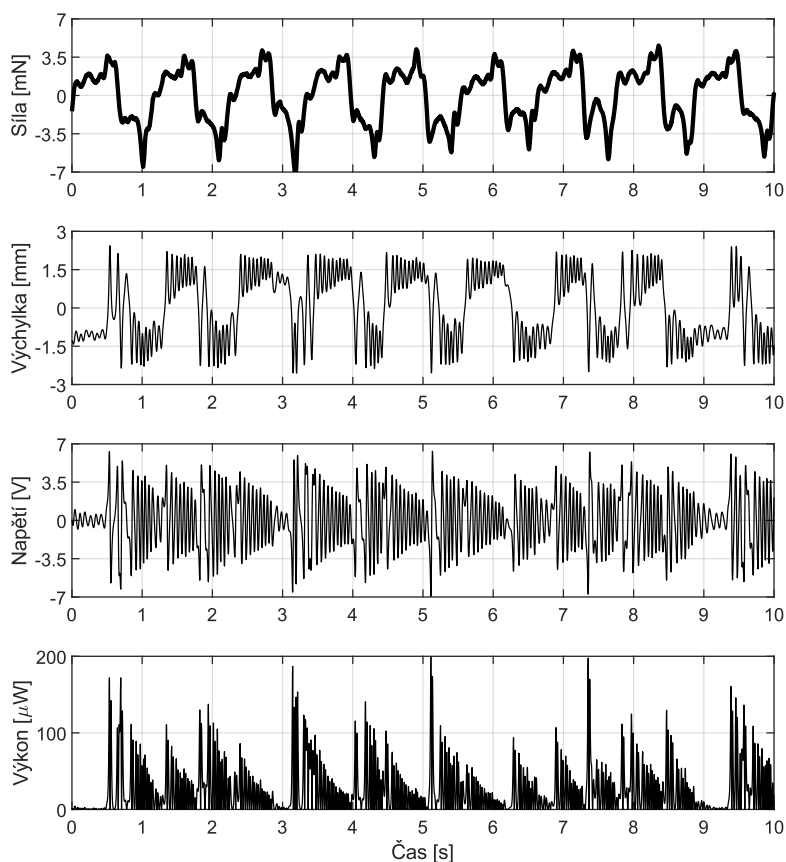
Pro lepší pochopení funkce lze vykreslit potenciální energii bistabilního vibračního mikro sběrače jako funkci výchylku a úhlu natočení. Potenciální energie je potom součtem potenciální energie magnetické pružiny a tíhového pole země. Tato závislost je na Obr. 55 a je z ní patrné, že zatímco pro nulový úhel jsou zde jasné dva stabilní body s minimální energií, při natáčení se energie jednoho z těchto bodů zvyšuje až do momentu, kdy zde přestane existovat lokální minimum, bod přestane být stabilní a vibrační mikro sběrač překmitne do druhé, tedy z určitého úhlu pohledu vlastně jediné stabilní polohy. Tento bod přechodu je v grafu vyznačen červeným bodem s šipkou.





Obr. 55 Potenciální energie bistabilního vibračního mikro sběrače

Pro ověření model bistabilního mikro sběrače byla provedena simulace, jejímž vstupem byla hodnota tíhové síly ve směru pohybu mikro sběrače změřená při chůzi. Výsledné chování je na Obr. 56. Pro tento případ dává využití bistabilního mikro sběrače smysl, ale i s touto bistabilní charakteristikou byl výstupný výkon ve střední hodnotě pouze  $25 \mu\text{W}$ , což je hodnota natolik nízká, že pro takový výkon není v současné době prakticky žádné využití, a proto nebylo ve výzkumu dále pokračováno.



Obr. 56 Složka tíhové síly ve směru pohybu mikro sběrače změřená na ruce a k ní patřící výsledky simulace

## 8 Model, realizace a měření elektromagnetického vibračního mikro sběrače

Elektromagnetický vibrační mikro sběrač je oproti piezoelektrickému náročnější na konstrukci, avšak přináší potenciál vyššího zatlumení. Pro účely zhodnocení tohoto potenciálu bude v následující kapitole rozebrán matematický model elektromagnetického vibračního mikro sběrače, ze kterého vyplynou důležité kroky v jeho návrhu.

### 8.1 Model elektromagnetického vibračního mikro sběrače

Základní matematický model elektromagnetického vibračního mikro sběrače je popsán v kapitole 3.1.1. Oproti piezoelektrickému je poměrně jednoduchý, popsatelný jednou diferenciální rovnicí druhého řádu, kdy elektromagnetická přeměna vystupuje pouze jako tlumicí člen, nikoliv jako člen s tuhostí, tak jak tomu je právě u piezoelektrického mikro sběrače. V případě elektromagnetického mikro sběrače není tedy nutné procházet tak detailním rozбором a úpravami jako v případě piezoelektrického, avšak i tak je vhodné zde uvést některé základní vztahy.

Zopakujme zde rovnice z kapitoly 3.1.1:

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + BNli + kx = -m\ddot{z} \quad (56)$$

$$L_C \frac{di}{dt} + (R_C + R_L)i = BNl\dot{x} \quad (57)$$

A také uveďme zjednodušenou rovnici, která sama o sobě popisuje elektromagnetický vibrační mikro sběrač:

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + b_e\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (58)$$

Je zde namístě alespoň krátce pohovořit o členu  $b_e$ , který reprezentuje elektrické tlumení způsobené elektromagnetickou indukcí. Vysvětlení je detailně popsáno v mnoha publikacích, např [59], a proto zde bude probráno pouze zevrubně.

V elektromagnetickém vibračním mikro sklízeči dochází k indukování elektrického napětí na cívce, která se pohybuje v magnetickém poli dle vztahu:

$$u_i = BNl \cdot \dot{x} \quad (59)$$

Kde  $u_i$  je indukované napětí,  $B$  je hodnota magnetické indukce v místě kde se pohybují vodiče cívky,  $N$  je počet závitů cívky a  $l$  je délka části jednoho závitu cívky, která se

nachází v magnetickém poli. Pokud je na výstupu připojen jako zátěž elektrický odpor a indukčnost cívky je zanedbatelně malá, platí poté rovnice pro proud:

$$i = \frac{u_i}{R_C + R_Z} \quad (60)$$

Kde  $i$  je proud protékající elektrickým obvodem,  $R_C$  je odpor cívky a  $R_Z$  je odpor připojené zátěže. Z tohoto proudu je poté možno vyjádřit sílu, kterou elektromagnetická indukce tlumí pohyb vibračního mikro sběrače:

$$F_{EM} = BNL \cdot i \quad (61)$$

Kde  $F_{EM}$  je tlumicí elektromagnetická síla. Dosazením rovnic (59) a (60) do (61) dostáváme vztah pro tlumicí elektromagnetickou sílu v závislosti na rychlosti:

$$F_{EM} = \frac{(BNL)^2}{R_C + R_Z} \cdot \dot{x} \quad (62)$$

Srovnáním s rovnicí (56) můžeme jasně vidět hodnotu členu reprezentujícího elektrické tlumení  $b_e$ :

$$b_e = \frac{(BNL)^2}{R_C + R_Z} \quad (63)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že hodnota elektrického tlumení může při vhodných parametrech být výrazně vysoká. Zátěžný odpor se může blížit nule a poté už je elektrické tlumení omezování jen vlastním odporem cívky. Při vhodném návrhu je však tento odpor poměrně malý, a naopak konstanty v čitateli značně vysoké. Z tohoto důvodu poskytuje elektromagnetický vibrační mikro sběrač značně lepší možnosti elektrického ztlumení, a tedy optimalizace získávané energie.

Pokud je elektromagnetický vibrační mikro sběrač vhodně navržen, je optimální odpor elektrické zátěže natolik vyšší oproti odporu cívky, že můžeme odpor cívky uvažovat jako nulový. V takovém případě je velice snadné určit optimální odpor elektrické zátěže, při které je výstupní elektrický výkon maximální. Platí totiž, že maximální elektrický výkon nastává tehdy, když je elektrické tlumení rovno mechanickému, a z této rovnosti lze vyjádřit hodnotu zátěžného odporu:

$$b_m = b_e = \frac{(BNL)^2}{R_Z} \quad (64)$$

$$R_Z = \frac{(BNL)^2}{b_m} \quad (65)$$

Dále je snadné vyjádřit elektrický výkon v rezonanci při této hodnotě elektrického odporu. Vyjdeme ze vztahu pro střední elektrický výkon při sinusové vibraci, pro který platí vztah:

$$P = \frac{1}{2} b_e \dot{x}_A^2 \quad (66)$$

Kde  $\dot{x}_A$  je amplituda rychlosti kmitání vibračního mikro sběrače. V rezonanci platí pro amplitudu výchylky vztah:

$$x_A = Q \cdot z = Q \cdot \frac{\ddot{z}}{\Omega_0^2} \quad (67)$$

Kde  $Q$  je celkový faktor kvality daný mechanickým a elektrickým tlumením dle vztahu:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{2 \frac{b_m + b_e}{2m\Omega_0}} \quad (68)$$

Pro optimální elektrický výkon musí platit rovnost elektrického a mechanického tlumení, a tedy lze vztah upravit:

$$Q = \frac{1}{2 \frac{2b_m}{2m\Omega_0}} = \frac{1}{2} Q_m \quad (69)$$

Kde  $Q_m$  je mechanický faktor kvality. Celková kvalita je tedy poloviční. Ze vztahu (67) můžeme vyjádřit amplitudu rychlosti:

$$\dot{x}_A = \frac{1}{2} Q_m \Omega \cdot \frac{\ddot{z}}{\Omega_0^2} \quad (70)$$

A dosadit do vztahu pro výpočet výkonu (66):

$$P = \frac{1}{2} b_e \left( \frac{1}{2} Q_m \cdot \frac{\ddot{z}}{\Omega_0} \right)^2 \quad (71)$$

Zde je ještě vhodně vyjádřit elektrické tlumení z faktoru kvality, kdy pro optimální výkon platí:

$$b_e = b_m = \frac{m\Omega_0}{Q_m} \quad (72)$$

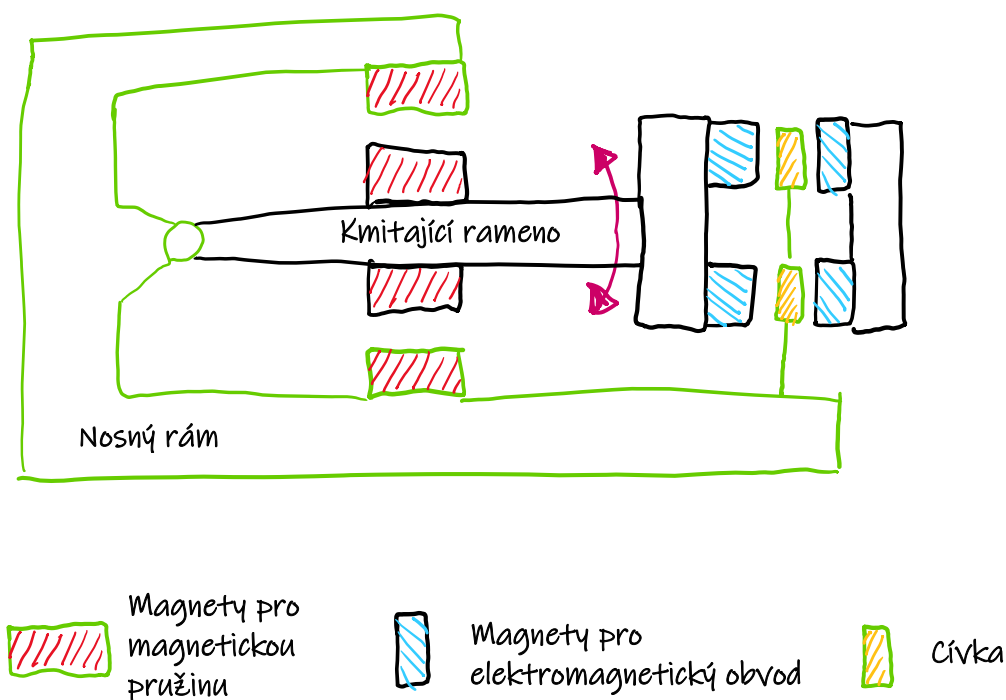
A po dosazení do (71):

$$P = \frac{1}{2} \frac{m\Omega_0}{Q_m} \left( \frac{1}{2} Q_m \cdot \frac{\ddot{z}}{\Omega_0} \right)^2 = \frac{1}{8} \frac{mQ_m}{\Omega_0} \cdot \ddot{z}^2 \quad (73)$$

Pomocí těchto vztahů lze velmi dobře určit chování lineárního elektromagnetického vibračního mikro sběrače a přibližně také jeho nelineární varianty. Zásadní je zde možnost výpočtu optimálního zátěžného odporu dle vztahu (65) a výpočet střední hodnoty výstupního výkonu dle vztahu (73).

## 8.2 Návrh a výroba testovacího vzorku

Základní konstrukce elektromagnetického vibračního mikro sběrače byla na pracovišti už dobře vyvinuta a byla popsána a zlepšována v mnoha studentských pracích i vědeckých člancích. Základem konstrukce je kyvné rameno uložené na rotační vazbě. Na tomto rameni jsou připevněny magnety vytvářející magnetické pole, ve kterém je uložena cívka, vůči které rameno kmitá, a tak dochází k elektromagnetické indukci. Na rameni jsou též magnety vytvářející magnetickou pružinu. Celá topologie je zobrazena na Obr. 57.



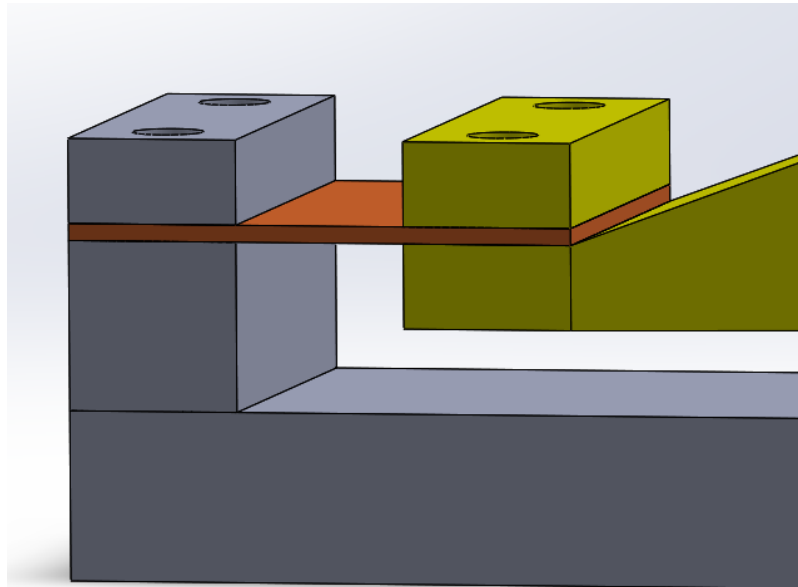
Obr. 57 Základní topologie elektromagnetického vibračního mikro sběrače

### 8.2.1 Uložení pohyblivého ramene

Stěžejním prvkem celé konstrukce je právě realizace rotační vazby, která jednak bývá konstrukčně složitá a jednak způsobuje nechtěné mechanické tlumení, které přímo omezuje výstupní výkon, viz vztahy v minulé kapitole. Naopak u piezoelektrického vibračního mikro sběrače tuto vazbu není nutné řešit, neboť je vlastně zajištěna samotným ohybem nosníku. Konstrukčně se tak jedná o velice jednoduchou záležitost, jejíž nevýhody však byly popsány v kapitole věnující se piezoelektrickému vibračnímu mikro sběrači.

Samotná přítomnost ocelového nosníku v piezoelektrickém vibračním mikro sběrači však vedla k myšlence jeho adaptace do elektromagnetického vibračního mikro sběrače. Mohlo by tak dojít ke zjednodušení konstrukce a také ke snížení mechanického tlumení. Dílčí pokusy byly provedeny v rámci jedné z bakalářských prací [60] a ukázaly, že se nejedná o slepou uličku.

Jasným inovačním prvkem konstrukce je tedy využití tenké ocelové planžety jakožto flexibilní vazby namísto klasické rotační vazby. Byla zvolena široká planžeta, aby se zabránilo torznímu kmitání. Zároveň byla planžeta zvolena tenká, aby způsobovala co možná nejnižší mechanické tlumení. 3D model je zobrazen na Obr. 58.



*Obr. 58 Flexibilní planžeta (červená) nahrazující rotační vazbu mezi rámem vibračního mikro sběrače (tmavě šedá) a kmitajícím ramenem (žlutá)*

## 8.2.2 Magnetický obvod pro cívku

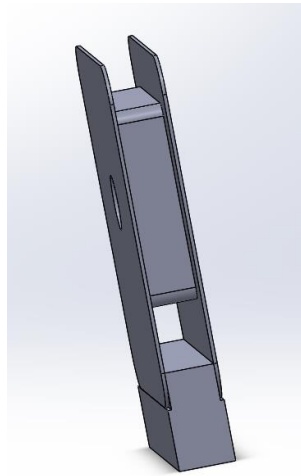
Dalším důležitým prvkem je magnetický obvod pro cívku indukující výstupní napětí. Zde bylo využito zkušeností z předešlých konstrukcí, jak bylo popsáno v článku [V18]. Hlavní změnou oproti konstrukci využitě ve zmíněném článku je pootočení magnetů a cívky do roviny kolmé na osu rotace, díky čemuž je cívka rovná a magnety jsou lepené na rovné ocelové nástavce. Konstrukce je tak výrazně jednodušší.

Magnety jsou shodné s magnety z článku, jedná se tedy o neodymové magnety o celkovém rozměru 20x10x2 mm vytvářející magnetické pole s hodnotou magnetické indukce ve vzduchové mezeře cca 0,5 T.

## 8.2.3 Cívka

Návrh cívky není v tomto případě nikterak sofistikovaný. Rozměry cívky byly zvoleny tak, aby se vešla mezi magnety s dostatečnou vůlí a aby při maximální výchylce zůstala většina vodičů v magnetickém poli. Z těchto požadavků byl odvozen průřez, ve kterém jsou uloženy vodiče cívky v magnetickém poli. Rozměry tohoto průřezu jsou 4x4 mm. Průměr drátu byl zvolen 0,118 mm, a to opět z důvodů velice prostých, a sice, že tenčím drátem se cívka navíjí poměrně špatně a hrozí její přetržení. Naopak při tlustším vodiči by se do průřezu vešlo méně závitů, a tedy by výstupní napětí bylo příliš nízké.

Konstrukce jádra cívky byla poměrně snadná díky otočení cívky do podélného směru. Díky tomu mohla být cívka zcela rovná a jádro cívky je tedy pouze v rovině vytištěné s plnou střední částí a tenkými bočnicemi. 3D model je zobrazen na Obr. 59.

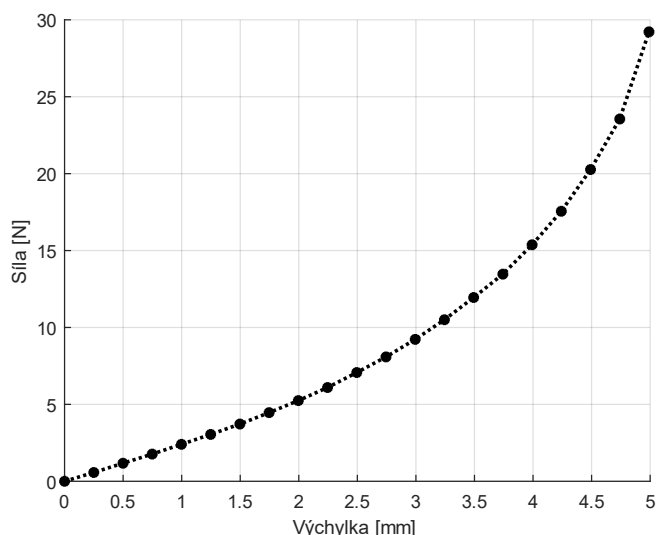


*Obr. 59 Jádro cívky i s jejím držákem*

Vyrobená cívka má 650 závitů. Délka aktivní části jednoho závitu, tedy části, která se pohybuje v magnetickém poli, je 40 mm a celkový odpor cívky je 105  $\Omega$ .

#### **8.2.4 Magnety vytvářející magnetickou pružinu**

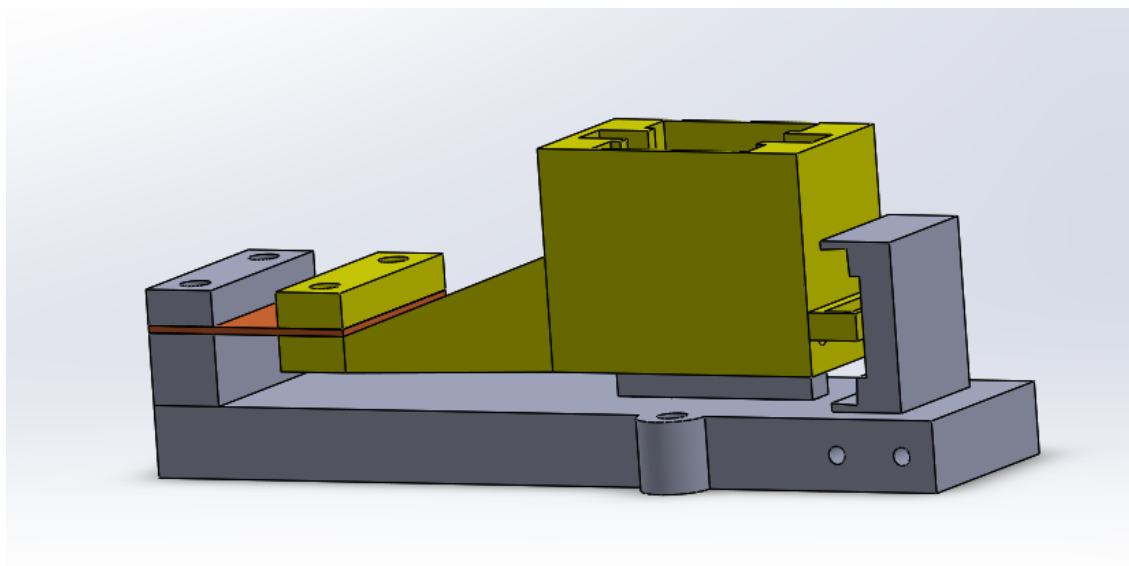
Magnety tvořící magnetickou tuhost byly navrženy dle poznatků z kapitoly 6 tak, aby tvořily poměrně silnou nelinearitu. Jedná se opět o neodymové magnety, tentokrát o rozměru 4x4x20 mm. Magnety jsou umístěny se symetrickým rozestupem 5 mm. Výsledná síla magnetické pružiny v závislosti na výchylce je na Obr. 60. Z grafu je patrný poměrně lineární průběh pro malé výchylky cca do 2 mm a dále výrazné tvrdnutí s výchylkami blízcími se maximální výchylce 5 mm.



Obr. 60 Závislost síly magnetické pružiny na výchylce

### 8.2.5 Nosný rám a pohyblivé rameno

Po vyřešení dílčích konstrukčních prvků již bylo nutné pouze dotvořit nosný rám celého zařízení a pohyblivé rameno. Tato konstrukce vycházela z navržených dílčích konstrukčních prvků a nejednalo se o nijak stěžejní část, kterou by bylo nutné do podrobností popisovat. Výsledný 3D model je zobrazen na Obr. 61, kde ji vidět nosný rám (tmavě šedá), kmitající rameno (žlutá) a flexibilní planžetu (červená). Magnety tvořící magnetickou pružinu jsou umístěny na nejvzdálenějším místě od planžety a magnetický obvod pro cívku včetně držáku cívky je v nejobemnější části.

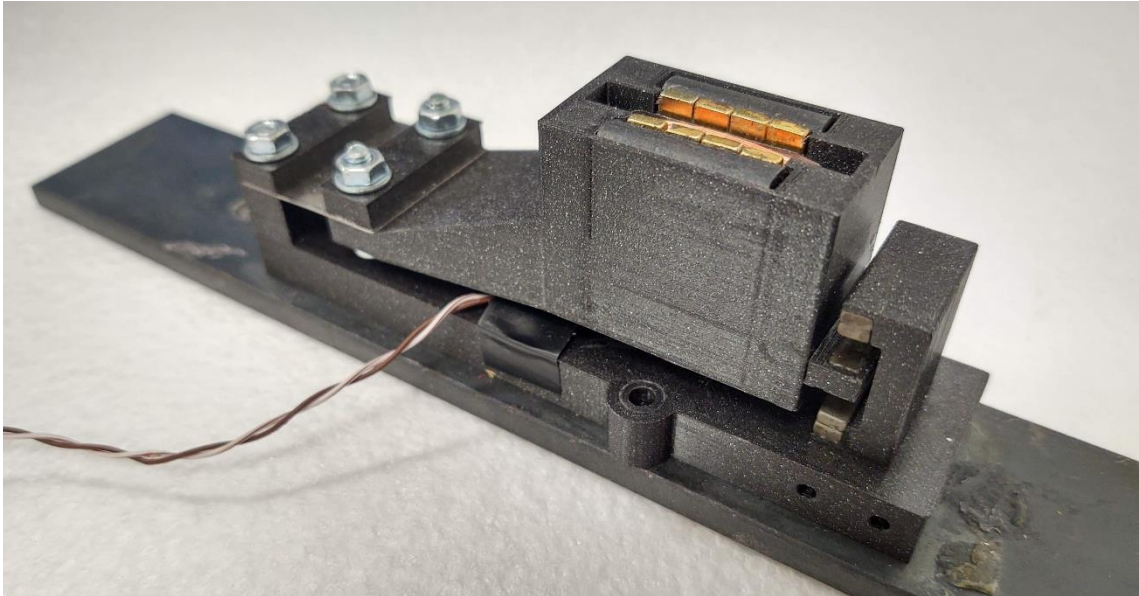


Obr. 61 Výsledný 3D model vibračního mikro sběrače bez magnetů

Celý vibrační mikro sběrač je vytisknutý na 3D tiskárně z materiálu PETG a jednotlivé části jsou smontovány pomocí šroubků. Netisknuté části jsou flexibilní planžeta, magnety



a jejich ocelové nástavce a ručně vinutá měděná cívka. Vyrobený vzorek elektromagnetického vibračního mikro sběrače je na Obr. 62.



*Obr. 62 Fotografie vyrobeného vzorku elektromagnetického vibračního mikro sběrače*

Celková hmotnost je 140 g a hmotnost kmitajícího ramene je 90 g. Celková hmotnost je uvedena bez ocelové příložky, na které je vibrační mikro sběrač upevněn kvůli snadnější montáži při měření.

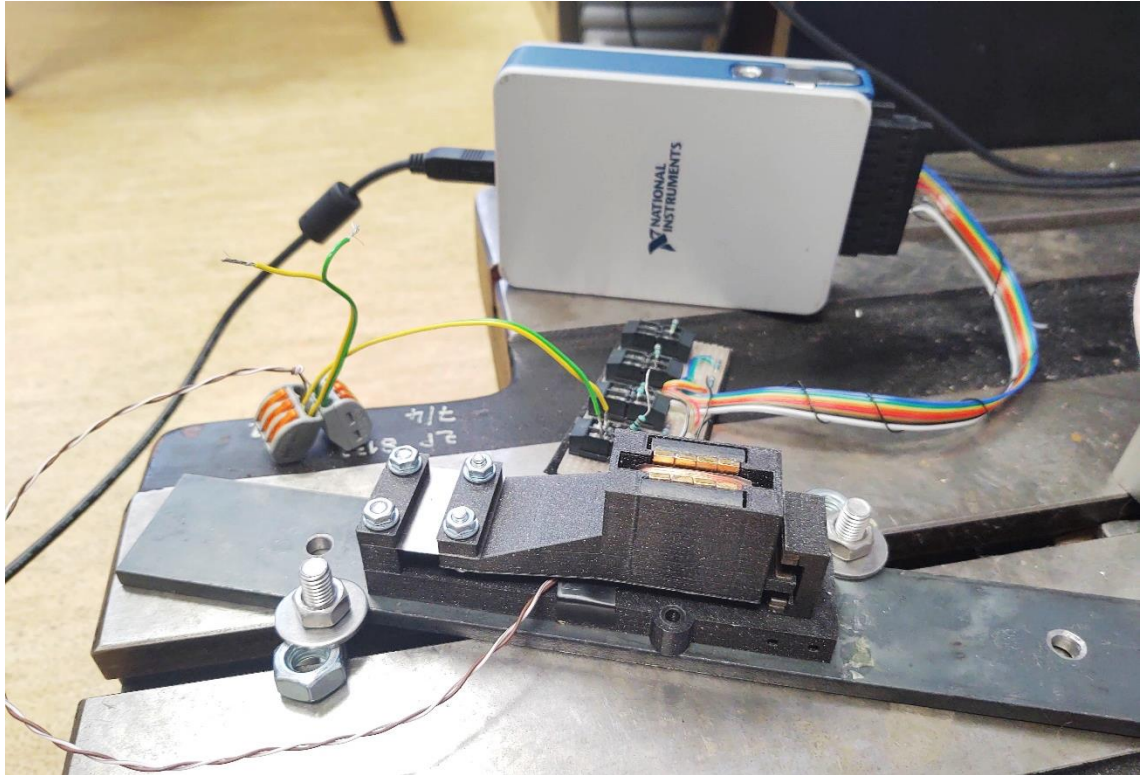
### **8.3 Testování vyrobeného funkčního vzorku**

Vyrobený funkční vzorek nelineárního elektromagnetického vibračního mikro sběrače bylo potřeba samozřejmě důkladně otestovat. V následujících podkapitolách budou popsány testy jak s volnou odezvou, tak při harmonickém buzení.

#### **8.3.1 Určení vlastní frekvence a vlastního tlumení z volné odezvy**

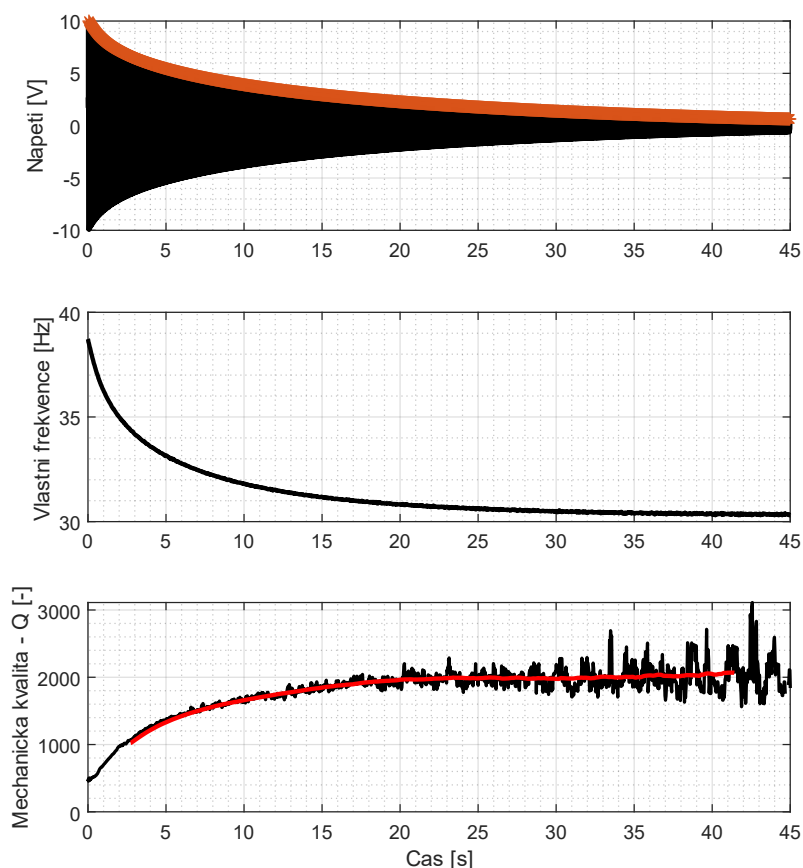
Základním měřením je měření volné odezvy vibračního mikro sběrače. Vzhledem k tomu, že výstupní napětí je přímo úměrné rychlosti, není třeba využívat žádného dalšího čidla a stačí měřit přímo výstupní napětí. Pro počáteční výchylku stačí mikro sběrač vychýlit rukou do krajní polohy a pustit, takže měření je velice snadné a rychlé.

První měření však ukázala, že největší obtíží v případě tohoto vibračního mikro sběrače je vhodné uložení. Při nesprávném uložení totiž docházelo k dodatečnému utlumení od konstrukce, a to výrazně snižovalo změřenou mechanickou kvalitu mikro sběrače. Nakonec bylo zvoleno přilepení vibračního mikro sběrače k ocelovému profilu, pomocí něž byl upevněn k masivní základně, viz Obr. 63.



*Obr. 63 Vibrační mikro sběrač při měření volné odezvy*

Ze změřené odezvy v časové oblasti byla izolována maxima a z nich byla určena vlastní frekvence pro každý kmit jako obrácená hodnota periody. Dále byl pro každý kmit určen poměrný útlum z poměru amplitud a jemu odpovídající faktor kvality. Změřená odezva s určenými parametry je na Obr. 64.

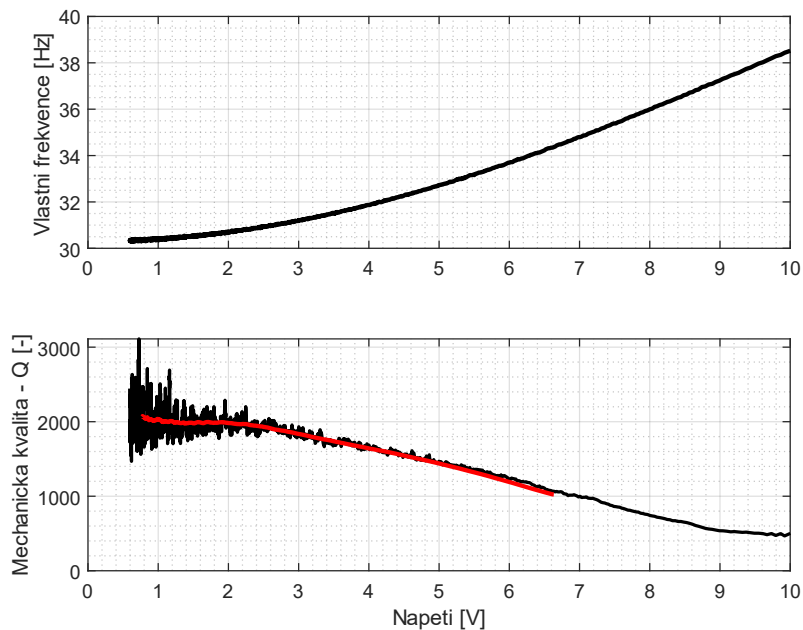


*Obr. 64 Volná odezva nelineárního vibračního mikro sběrače s vypočtenou vlastní frekvencí a faktorem kvality pro každý kmit*

Z grafu je patrné, že vlastní frekvence se snižuje se snižující se výchylkou, což je předpokládaný fakt, vzhledem k tomu, že se jedná o nelineární vibrační mikro sběrač. Pro maximální výchylku, které odpovídá napětí 10 V, je frekvence 39 Hz a snižuje se až na hodnotu 30 Hz.

Mechanická kvalita oscilátoru se naopak z hodnoty 500 při maximální výchylce zvyšuje až na hodnotu okolo 2000 pro nízké výchylky. Pro nízké výchylky je v grafu patrný vysoký šum, který je způsoben nízkou přesností měření při malých výchylkách a obecně také vyšší náchylností k rušení při malých výchylkách. Pouhým pohledem je však zřejmé, že střední hodnota se ustaluje na 2000.

Pro posouzení vlastní frekvence a kvality faktoru je vhodné vykreslit tyto hodnoty nikoliv jako funkci času, ale přímo jako funkci napětí, potažmo tedy amplitudy kmitání. Takovéto vykreslení je na Obr. 65.



*Obr. 65 Závislost vlastní frekvence a mechanické kvality na napětí, potažmo výchylce*

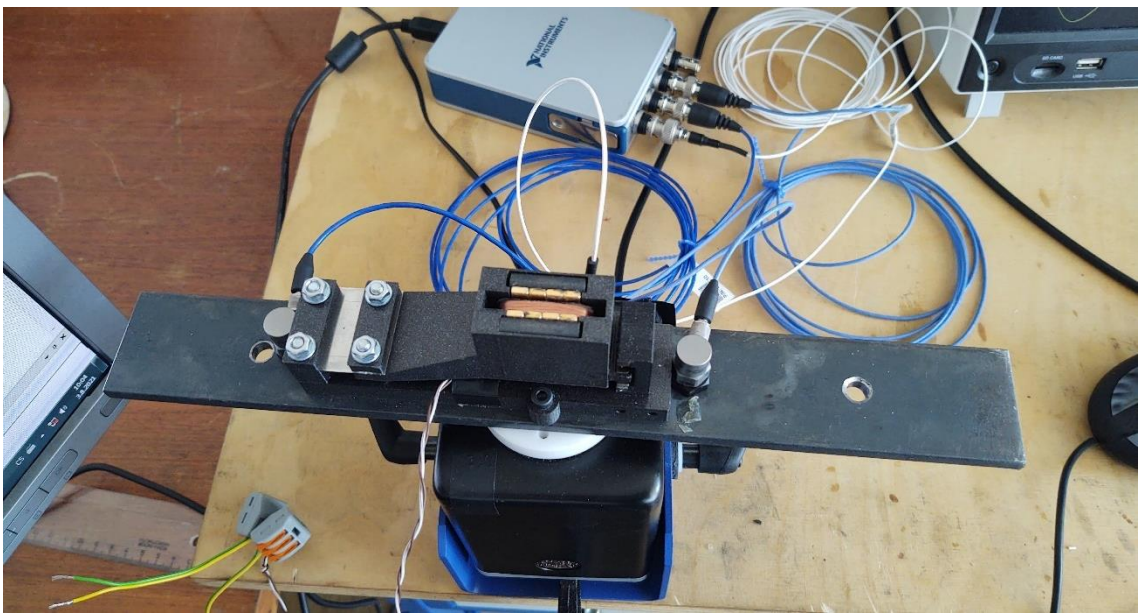
Závislost vlastní frekvence na napětí, potažmo výchylce, ukazuje tvrdnoucí charakter vibračního mikro sběrače. Pro výchylky generující napětí více než 2 V dochází téměř k lineárnímu zvyšování frekvence až na 39 Hz při napětí 10 V, které odpovídá maximální výchylce.

Mechanická kvalita oscilátoru se naopak se zvyšující se výchylkou snižuje. Zatímco pro malé výchylky, a tedy malé napětí se kvalita pohybuje okolo hodnoty 2000, se zvětšením výchylky prakticky lineárně klesá na hodnotu 500. Avšak i tato nejnižší hodnota 500 je hodnota dosti vysoká, převyšující hodnoty vibračních mikro sběračů vyvinutých na našem pracovišti.

### 8.3.2 Harmonické buzení slabým zdrojem vibrací

V první fázi testování bylo využito laboratorního zdroje vibrací, který je na pracovišti běžně užíván. Jedná se o produkt firmy The Modal Shop, konkrétně o model K2007E01. Z jeho základních parametrů zde uvedeme maximální budicí sílu 31 N a maximální buzenou hmotu 900 g. Uvedme také důležitý fakt, že se jedná o zdroj vibrací bez zpětnovazební regulace. Buzení je ovládáno bez zpětné vazby signálem ze signálového generátoru, kdy je měněna frekvence a amplituda sinusového signálu.

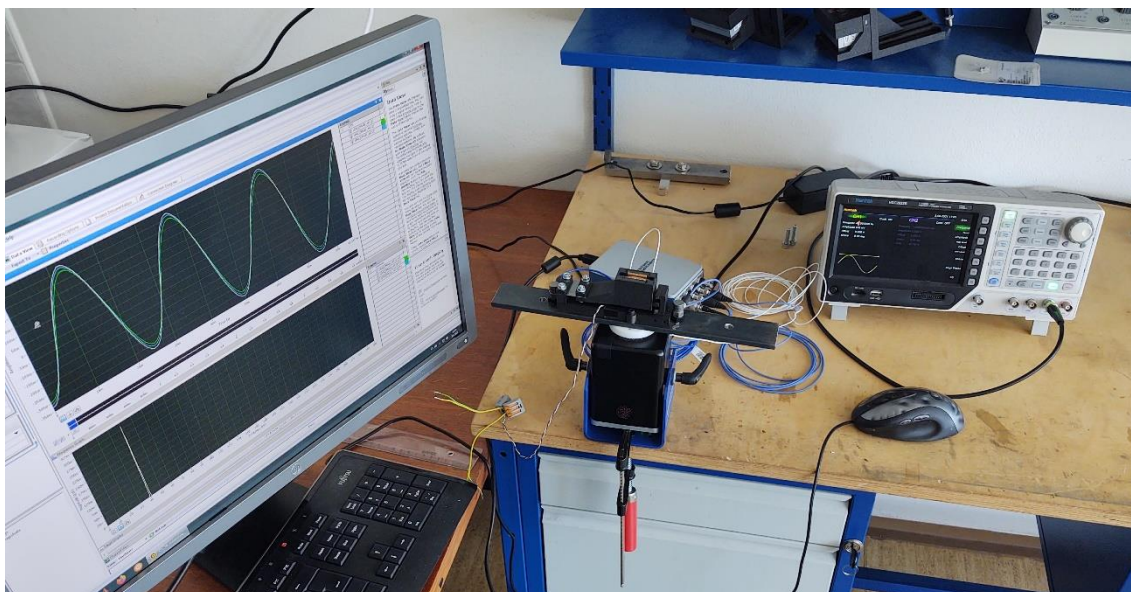
Na tomto zdroji vibrací byl připevněn testovaný vibrační mikro sběrač a také sada tří akcelerometrů. Jeden akcelerometr byl ve středu a další dva na krajích, viz Obr. 66. Důvodem je potřeba změřit nejen zrychlení budicí základny, ale také ověřit, že se základna pohybuje pouze translačním pohybem v daném směru a nedochází k jejímu rozkývání.



*Obr. 66 Laboratorní zdroj vibrací s připevněným vibračním mikro sběračem*

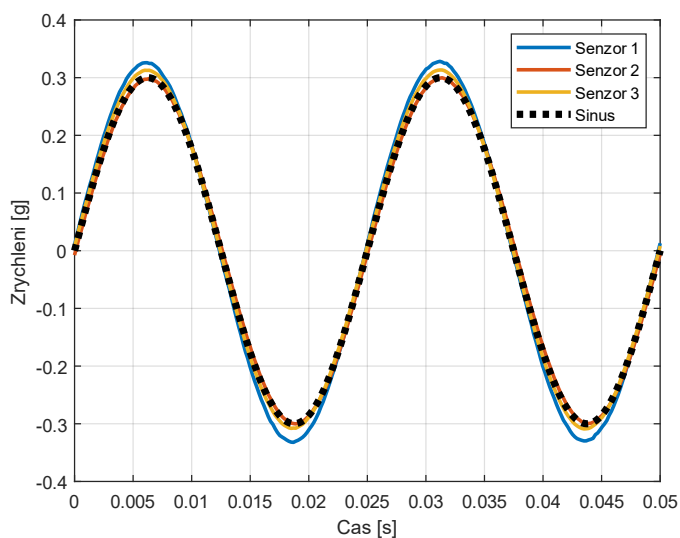
Měřené zrychlení bylo zobrazováno v průběhu měření na počítači. Při standardních měřeních jsou měněny parametry signálu na signálovém generátoru tak, aby měla základna potřebné zrychlení pro provedení experimentu. Celá experimentální sestava je na Obr. 67, kde je vidět celé pracoviště pro měření s harmonickým buzením.





*Obr. 67 Měřicí sestava pro měření s harmonickým buzením*

Tato sestava je dobře funkční při měření lineárních oscilátorů. V případě tohoto mikro sběrače fungovalo vše správně při buzení mimo oblast silné nelinearity. Naměřené zrychlení základny při buzení frekvencí 40 Hz, tedy za oblastní nelineární rezonance zobrazuje Obr. 68. Z průběhu je patrné, že buzení je velice blízké požadovanému sinusovému průběhu a že všechny senzory měří obdobné hodnoty zrychlení, takže lze říct, že základna kmitá správným způsobem.

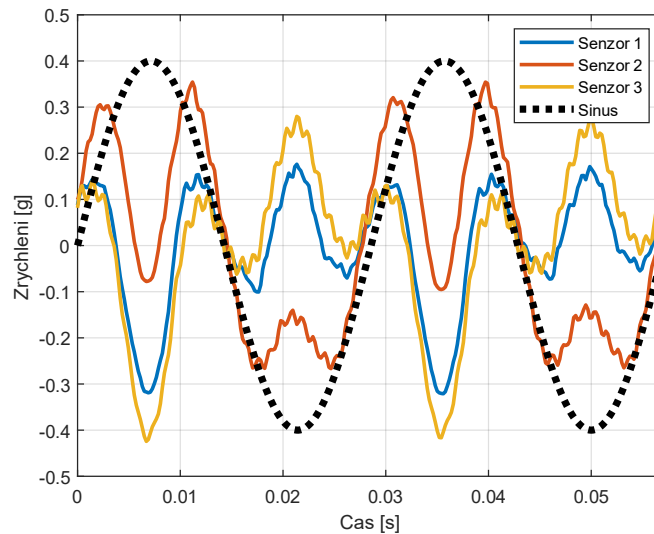


*Obr. 68 Průběh zrychlení za oblastní nelineární rezonance*

Problém však nastává při buzení v oblasti nelineární rezonance. Obr. 69 ukazuje zrychlení v této oblasti při frekvenci 35 Hz. Z grafu jsou patrné hned dva problémy. Prvním problémem je, že signály ze senzorů se vzájemně liší. Z toho lze usoudit, že základna se rozkmitává i v jiném směru a nejedná se o čistě translační pohyb v jedné ose. Už tento jev je pro testování nevhodný.

Druhým problémem je průběh jednotlivých zrychlení. Je patrné, že vlivem připevněného nelineárního mikro sběrače došlo k vybuzení vyšších harmonických složek v budicím signálu, kterých se nelze nijak zbavit. Měření s buzením čistým sinusovým signálem je tak s danou měřicí aparaturou zcela nemožné. Obdobný problém se objevil i v jiných experimentech, viz [61].

Můžeme říct, že použitý zdroj vibrací je pro daný mikro sběrač příliš slabý a je mikro sběračem natolik ovlivněn, že pro daný test je zcela nepoužitelný. Je tedy třeba využít silnější zdroj vibrací. Zároveň je třeba si uvědomit, že k takovému ovlivnění bude docházet nejen v laboratoři, ale také na reálných vibrujících konstrukcích.

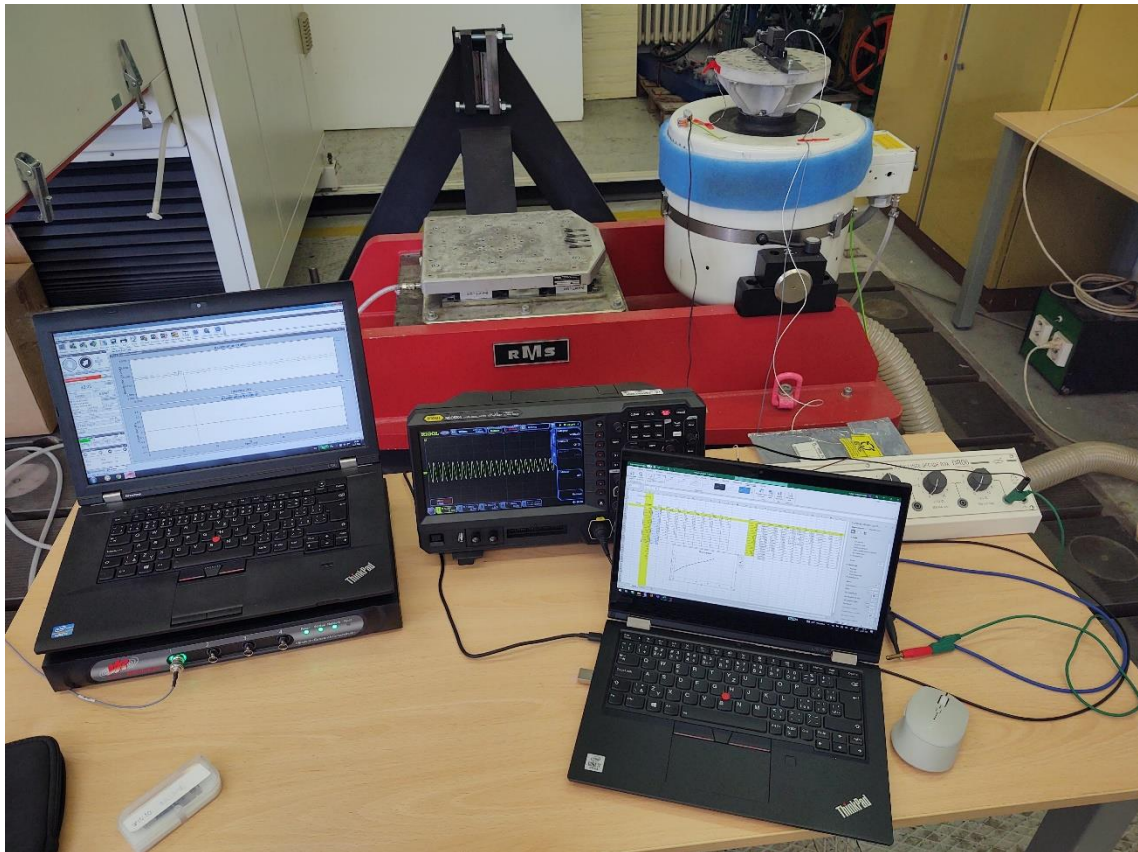


Obr. 69 Průběh zrychlení v oblasti nelineární rezonance

### 8.3.3 Harmonické buzení dostatečně silným zdrojem vibrací

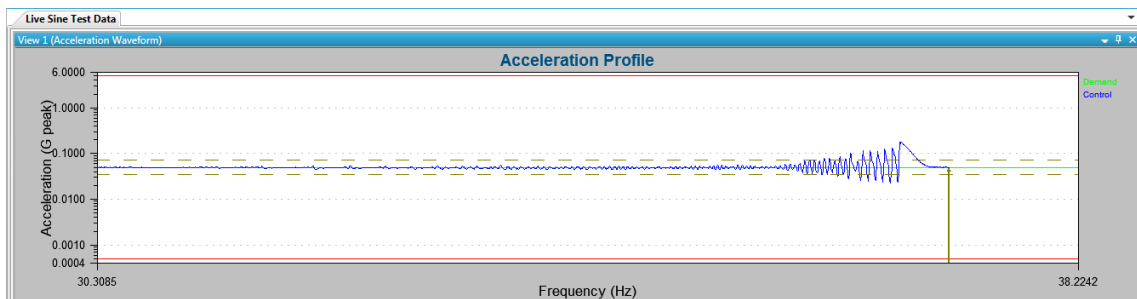
V dalším kroku tedy muselo být přistoupeno k testování na silnějším zdroji vibrací s regulací. Jednalo se o zdroj vibrací od firmy RMS, konkrétně o model RMS SW 1507. Tento zdroj vibrací má oproti předchozímu dvě výhody. Jedná se o silnější zdroj s vyšší hmotností kmitající armatury, takže připevněný vibrační mikro sběrač jej výrazně méně ovlivní. Druhou výhodou je, že tento zdroj vibrací má zpětnovazební regulaci, takže umí zpětný vliv připevněného mikro sběrače do značné míry eliminovat.

Měřicí sestava je zobrazena na Obr. 70. Už na první pohled je patrné, že zdroj vibrací je oproti předchozímu výrazně větší a také hmotnost jeho pohybující části je výrazně vyšší než hmotnost vibračního mikro sběrače. Oproti předchozímu měření už je zde vidět i osciloskop pro měření výstupního napětí a odporová dekáda pro změnu elektrické zátěže.



*Obr. 70 Měřicí sestava pro měření s harmonickým buzením s dostatečně silným zdrojem vibrací*

I s použitím tohoto silného zdroje vibrací bylo však obtížné dosáhnout požadovaných vibrací. Obr. 71 ukazuje průběh amplitudy zrychlení zdroje vibrací při plynulé změně frekvence. Na průběhu je vidět, že jak se zvyšující frekvencí zvyšuje vliv nelinearity vibračního mikro sběrače, začíná se amplituda vibrací rozkmitávat a po překročení pásma tolerance je test ukončen, případně dojde k utlumení mikro sběrače, který se dále začne chovat jako lineární s malými výchylkami a test pokračuje dál. Tento jev musel být korigován citlivým nastavením parametrů použitého zdroje vibrací a test se nakonec podařilo realizovat.



*Obr. 71 Průběh amplitudy zrychlení zdroje vibrací při plynulé změně frekvence*

Po odstranění všech těchto potíží mohlo být přistoupeno k hlavnímu měření a sice závislosti napětí a výkonu a budicí frekvenci pro různou hodnotu elektrické zátěže.



Měření byla provedena pro dvě různé amplitudy budicího zrychlení a sice 50 mg a 100 mg, tedy 0,5 a 1 ms<sup>-2</sup>.

Pro buzení 50 mg zobrazuje výsledky Obr. 72. Z průběhů je na první pohled patrná dobrá korelace s teoretickým průběhem určeným v kapitole 5. Maximální výkon je 4,5 mW při zátěži 3 kΩ a frekvenci 32,5 Hz. Pro vyšší frekvence je vhodný vyšší odpor, tedy nižší tlumení a pro nižší frekvence je tomu přesně opačně. Využitelná šířka pásma je 30–35 Hz, což je dvojnásobek ve srovnání s použitím pouze konstantní optimální elektrické zátěže 3 kΩ. Napětí potom se snižující se zátěží a zvyšující se frekvencí roste stále.

Pro buzení 100 mg jsou výsledky obdobné na Obr. 73. Maximální výkon je samozřejmě vyšší při vyšší frekvenci. Hodnota výkonu je 17 mW při frekvenci 36 Hz. Optimální odpor se mírně liší a sice je 2,5 kΩ. Zde je potřeba upozornit, že 0,5 kΩ byl krok změny zátěže a je tedy možné, že přesné hodnoty optimálního odporu jsou si mnohem blíže. Pro daný účel však není nutné mít zcela přesné hodnoty. Důležité je opět výrazné rozšíření pásma vlivem změny elektrické zátěže a sice na rozsah 30–39 Hz.

Ze závislosti výkonu můžeme také orientačně určit kvalitu vibračního mikro sběrače pro daný pracovní bod. Vyjdeme z předpokladu, že maximální výkon je zde právě pro hodnotu, kdy elektrické tlumení je rovné mechanickému. Pokud tedy určíme celkovou kvalitu včetně tohoto optimálního tlumení, bude mechanická kvalita dvojnásobná. Pro maximální výkon vibračního mikro sběrače platí vztah:

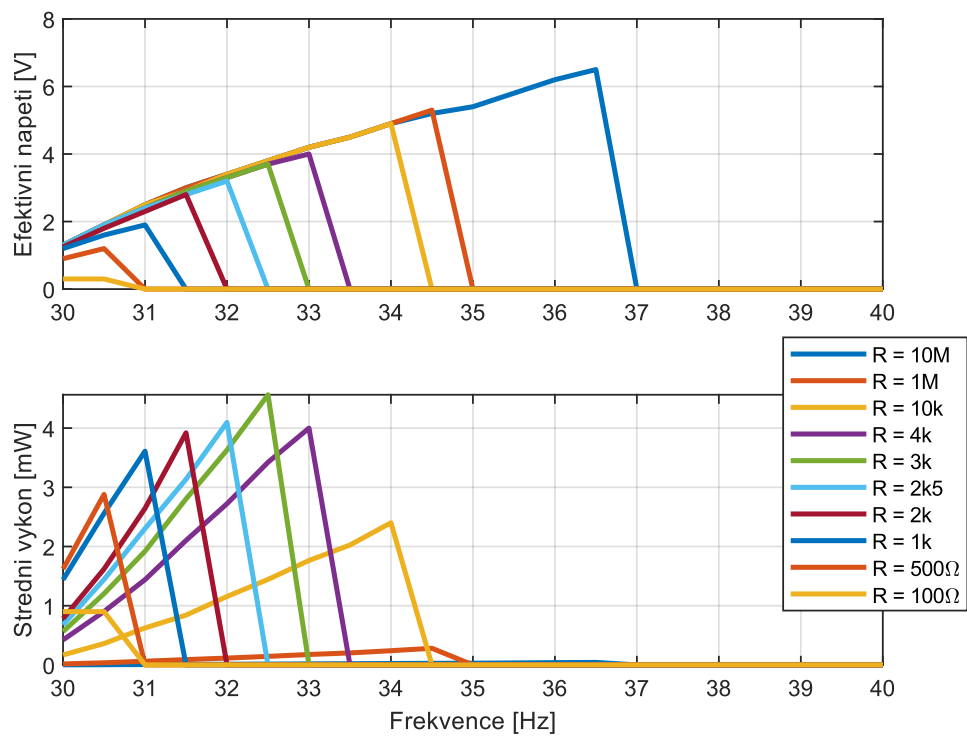
$$P_{MAX} = \frac{Q_m m}{8} \frac{\dot{z}_A^2}{\omega} \quad (74)$$

Tento vztah platí přesně pro lineární mikro sběrač v rezonanci a pro nelineární lze přibližně použít pro maximální výkon ve smyslu maximální ze všech možných kombinací frekvence a elektrické zátěže. Z něj můžeme snadno vyjádřit a vypočítat mechanickou kvalitu mikro sběrače pro obě amplitudy buzení:

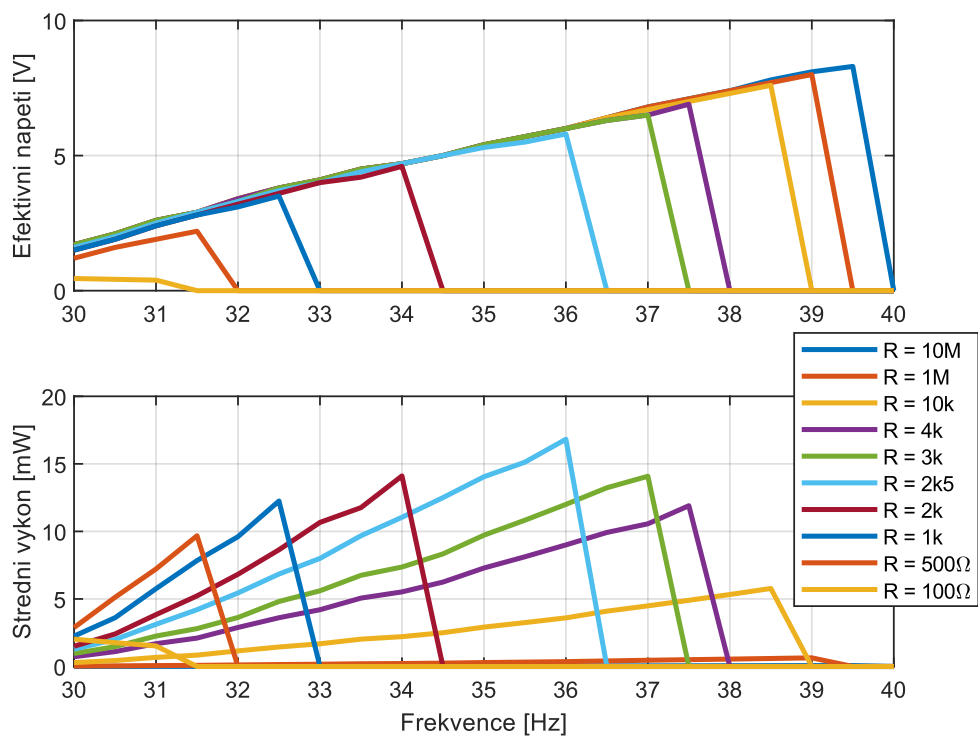
$$Q_m = P_{MAX} \frac{8\omega}{m\dot{z}_A^2} = 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{16 \cdot \pi \cdot 32,5}{90 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5^2} = 327 \quad (75)$$

$$Q_m = P_{MAX} \frac{8\omega}{m\dot{z}_A^2} = 17 \cdot 10^{-3} \frac{16 \cdot \pi \cdot 36}{90 \cdot 10^{-3} \cdot 1^2} = 342 \quad (76)$$

Mechanická kvalita vychází v obou případech lehce přes 300. Zde musíme upozornit, že výpočet je zkreslen také faktem, že kvalitu posuzujeme pro různou frekvenci kmitání. V každém případě je tato hodnota výrazně nižší než hodnota naměřená při určování z volné odezvy. Důvod lze nejspíše hledat v tom, že vlastní upnutí vibračního mikro sběrače ke zdroji vibrací způsobuje dodatečné zatlumení, a tedy snížení vlastní kvality.

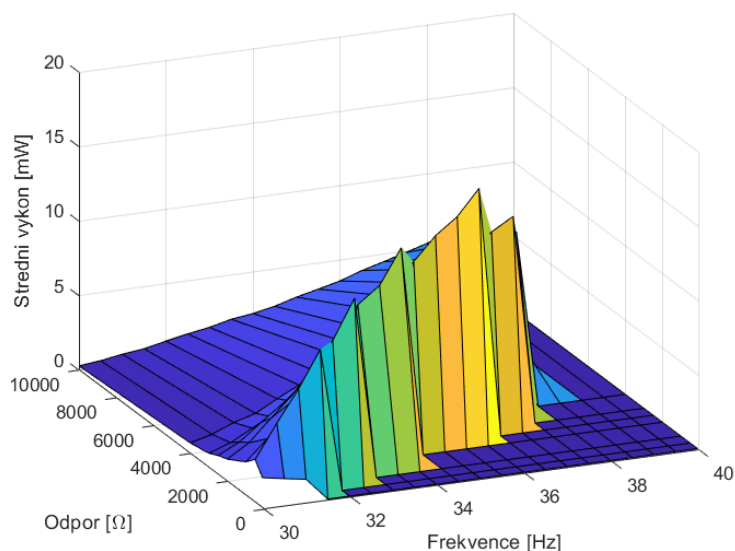


Obr. 72 Závislost napětí a výkonu na frekvenci pro buzení zrychlením o amplitudě 50 mg



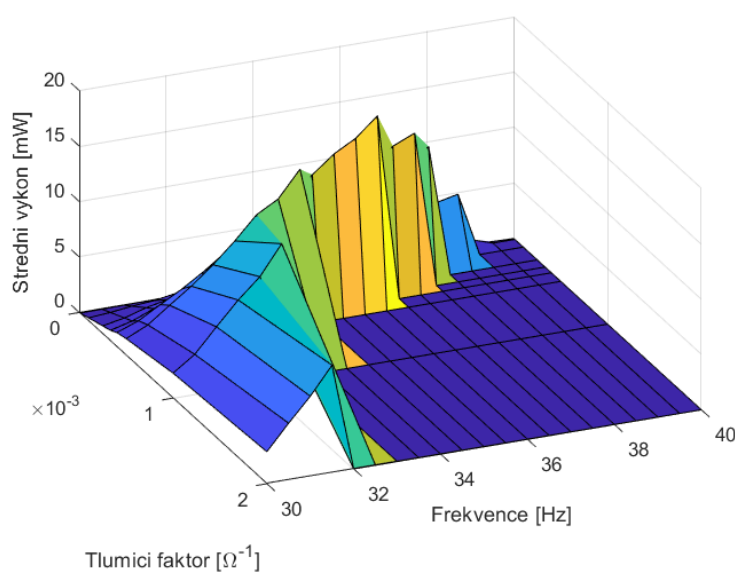
Obr. 73 Závislost napětí a výkonu na frekvenci pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg

Pro úplnost je zde ještě prostorový graf závislosti výkonu na budící frekvenci a elektrickém odporu, Obr. 74. Je v něm zároveň patrný maximální výkon v závislosti na frekvenci a taktěž měnící se hodnota potřebného elektrického odporu.



*Obr. 74 Závislost výkonu na frekvenci a elektrické zátěži pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg*

Graf opět dobře koreluje s teoretickým grafem z kapitoly 5. Pro jeho srovnání je však vhodné zobrazit výkon ne v závislosti na elektrickém odporu zátěže, ale na jeho obrácené hodnotě, kterou můžeme označit jako tlumicí faktor, viz Obr. 75. Tento tlumicí faktor dává po vynásobení patřičnými konstantami přímo hodnotu elektrického tlumení, a tak je průběh tohoto grafu odpovídající přímo teoretickému grafu Obr. 38.



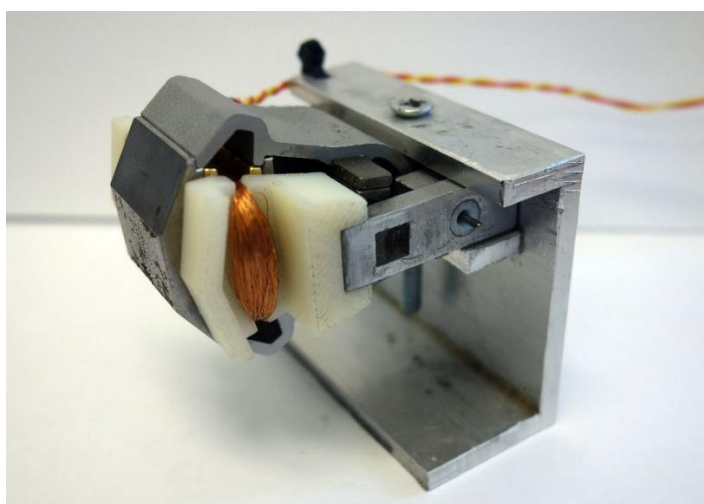
*Obr. 75 Závislost výkonu na frekvenci a tlumícím efektu elektrické zátěže pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg*

## 9 Bezdrátový senzor vibrací napájený elektromagnetickým vibračním mikro sběračem

V rámci dizertační práce byl též proveden experiment demonstrující aplikovatelnost vibračního mikro sběrače pro napájení funkční elektroniky. Konkrétně se jednalo o bezdrátový senzor vibrací, podrobně popsáný v [V3]. Tento senzor snímal vibrace pomocí piezoelektrické vrstvy [V4], viz Obr. 76, která zde sloužila pouze jako snímač, nikoliv jako zdroj energie. Jako zdroj energie zde byl použit elektromagnetický vibrační mikro sběrač vyvinutý na našem pracovišti [V18], zobrazen na Obr. 77.



*Obr. 76 Piezoelektrická snímací vrstva na vibrujícím nosníku*

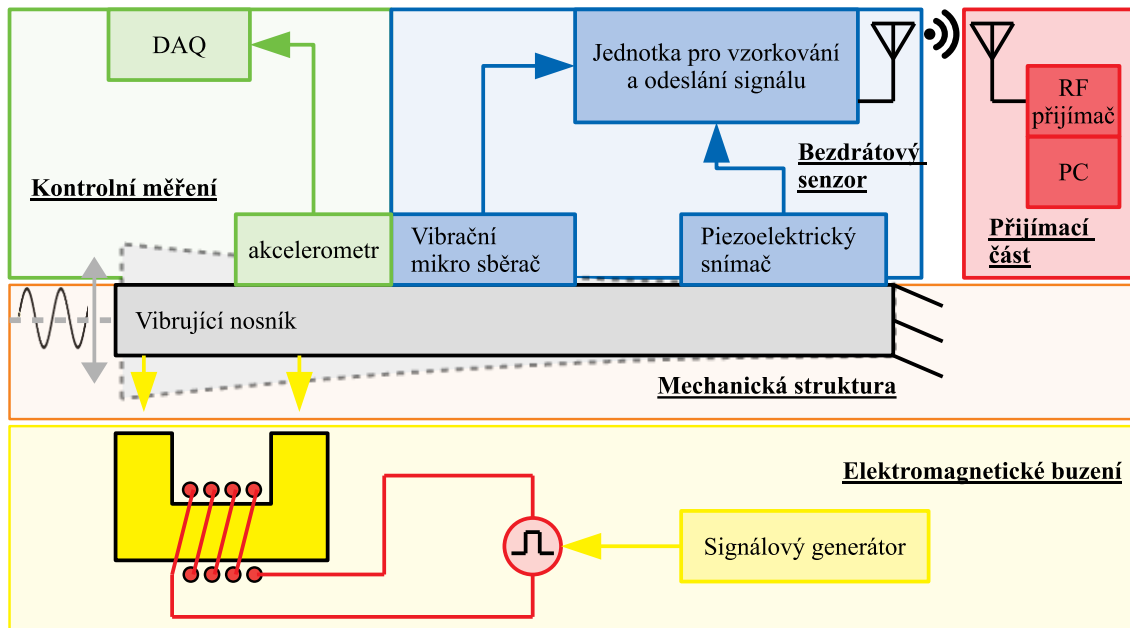


*Obr. 77 Elektromagnetický vibrační mikro sběrač použitý pro napájení bezdrátového senzoru*

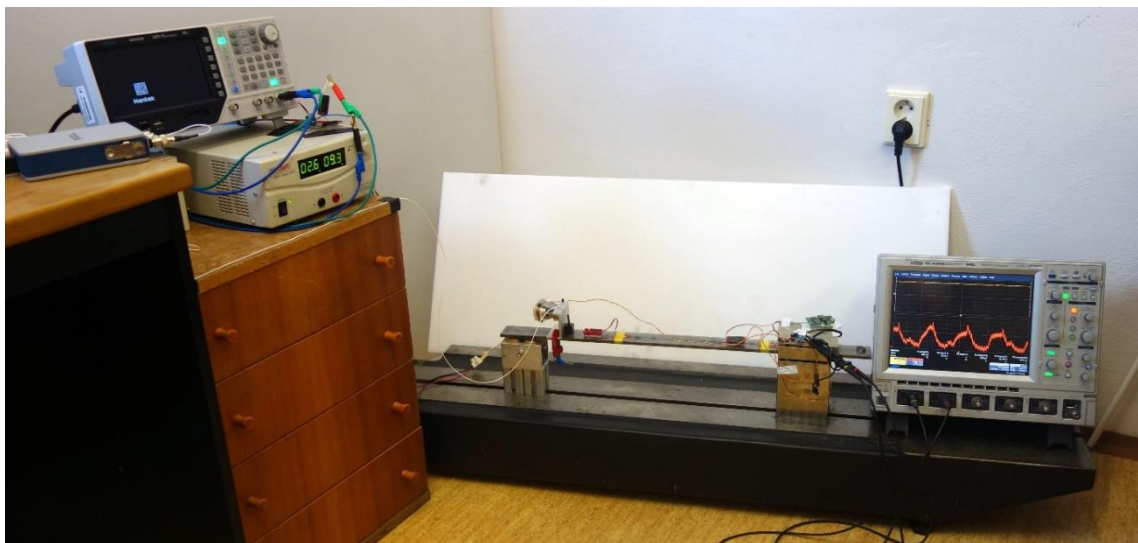
Celá experimentální soustava je schematicky zobrazena na Obr. 78 a její fotografie je na Obr. 79. Vibrační mikro sběrač byl umístěn na vetknutém nosníku, který byl rozvibrován

pomocí elektromagnetu. Energie byla dostatečná, aby napájela jednotku, která data z piezoelektrického čidla vzorkovala s frekvencí 600 vzorků za sekundu a bezdrátově je odesílala do počítače, kde proběhlo porovnání s daty z komerčního akcelerometru. Průměrná spotřeba energie byla 7 mW a vibrační mikro sběrač tuto spotřebu dostatečně pokryl při budících vibracích s amplitudou 0,5 g. V dalším výzkumu byly analyzovány vibrace projíždějícího vlaku jakožto zdroje energie [V12] a [V1]

. Tento výzkum je zatím v procesu, ale již nyní lze říct že se vyvíjí velice nadějným směrem. Též byly analyzovány možnosti v letectví [V7]. I zde výzkum pokračuje slibným směrem.



Obr. 78 Schéma experimentální soustavy



Obr. 79 Fotografie experimentální soustavy

## 10 Přínosy dizertační práce

- Teoretický přínos dizertační práce
  - Analýza vlivu elektrického tlumení na výstupní výkon obecného nelineárního vibračního mikro sběrače
  - Metodika návrhu permanentních magnetů pro magnetickou pružinu
  - Odvození vztahů pro výpočet ekvivalentního přidaného tlumení a tuhosti piezoelektrického vibračního mikro sběrače pro danou frekvenci
  - Vztah pro určení optimálního odporu zátěže pro piezoelektrický i elektromagnetický vibrační mikro sběrač
- Praktický přínos dizertační práce
  - Verifikace parametrů piezoelektrických vibračních mikro sběračů a jejich zařazení do kontextu vhodnosti pro sběr energie
  - Realizace a měření nelineárních piezoelektrických vibračních mikro sběračů jak v monostabilní, tak v bistabilní konfiguraci
  - Návrh, výroba a testování elektromagnetického vibračního mikro sběrače, na kterém byla ověřena teoretická závislost výkonu na elektrickém tlumení
  - Testování vibračního mikro sběrače s bezdrátovým senzorem
  - Uplatnění poznatků v národních i mezinárodních projektech
- Pedagogický přínos dizertační práce
  - Obecné poznatky o kmitání jsou využívány pro výuku základních kurzů dynamiky, nelineární dynamiky
  - Specifické poznatky o sběru energie jsou využívány pro specializovaný předmět „Chytré technologie a materiály v mechatronice (RAE)“
  - Na témata příbuzná dizertační práci vzniklo a stále vzniká mnoho bakalářských a diplomových prací

## 11 Závěr

V této dizertační práci jsou shrnuty základní poznatky o fungování piezoelektrických a elektromagnetických vibračních mikro sběračů. Tyto poznatky byly rozšířeny pro nelineární chování. Především byla ukázána vhodnost změny elektrické zátěže v závislosti na budící frekvenci pro nelineární vibrační mikro sběrač. Touto změnou lze dosáhnout širšího pásma pracovní frekvence a vyššího výkonu v tomto pásmu. Pro tyto účely byly podrobně rozpracovány matematické modely vibračních mikro sběračů, které zahrnují mechanickou i elektrickou doménu a jejich vzájemnou interakci.

Tyto modely byly zpracovány pro piezoelektrický i elektromagnetický princip a následně byly experimentálně ověřeny. Ukázalo se, že piezoelektrický princip s dostupnými materiály není pro nelineární vibrační mikro sběrač vhodný, jelikož neposkytuje možnosti dostatečného tlumení, a tedy nedokáže zvýšit výkon nelineárního vibračního mikro sběrače v pracovním pásmu tak jako elektromagnetický.

Naopak elektromagnetický vibrační mikro sklízeč v navržené a realizované koncepci má vysokou mechanickou kvalitu a zároveň poskytuje i vysoké tlumení, a tak bylo možné na něm ověřit teoreticky určený vliv změny elektrické zátěže na šířku pracovního pásma a na maximální výkon v tomto pásmu.

Dílní výzkum aplikace elektromagnetického vibračního mikro sběrače jakožto zdroje pro bezdrátový autonomní senzor vibrací ukázal reálný potenciál aplikace tohoto zařízení do průmyslu. Vhodnou integrací prezentovaných nelinearit lze dále zvyšovat uplatnitelnost vibračních mikro sběračů pro bezdrátové senzory v prostředí s běžnými vibracemi.

## 12 Seznam použitých zdrojů

- [1] WILLIAMS, C.B. a R.B. YATES. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1996, **52**(1–3), 8–11. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/0924-4247(96)80118-X
- [2] STARNER, T. Human-powered wearable computing. *IBM Systems Journal* [online]. 1996, **35**(3.4), 618–629. ISSN 0018-8670. Dostupné z: doi:10.1147/sj.353.0618
- [3] SHEARWOOD, C. a R.B. YATES. Development of an electromagnetic micro-generator. *Electronics Letters* [online]. 1997, **33**(22), 1883. ISSN 00135194. Dostupné z: doi:10.1049/el:19971262
- [4] KYMISSIS, J., C. KENDALL, J. PARADISO a N. GERSHENFELD. Parasitic power harvesting in shoes. In: *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)* [online]. B.m.: IEEE Comput. Soc, 1998, s. 132–139. ISBN 0-8186-9074-7. Dostupné z: doi:10.1109/ISWC.1998.729539
- [5] WILLIAMS, C.B., C. SHEARWOOD, M.A. HARRADINE, P.H. MELLOR, T.S. BIRCH a R.B. YATES. Development of an electromagnetic micro-generator. *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems* [online]. 2001, **148**(6), 337. ISSN 13502409. Dostupné z: doi:10.1049/ip-cds:20010525
- [6] GLYNNE-JONES, P., S.P. BEEBY a N.M. WHITE. Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology* [online]. 2001, **148**(2), 68. ISSN 13502344. Dostupné z: doi:10.1049/ip-smt:20010323
- [7] ROUNDY, Shad, Paul K WRIGHT a Jan RABAEY. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications* [online]. 2003, **26**(11), 1131–1144. ISSN 01403664. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-3664(02)00248-7
- [8] ANTON, Steven R a Henry A SODANO. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures* [online]. 2007, **16**(3), R1–R21. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/16/3/R01
- [9] SODANO, Henry A., Daniel J. INMAN a Gyuhae PARK. A Review of Power Harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials. *The Shock and Vibration Digest* [online]. 2004, **36**(3), 197–205. ISSN 05831024. Dostupné z: doi:10.1177/0583102404043275
- [10] BEEBY, S P, R N TORAH, M J TUDOR, P GLYNNE-JONES, T O'DONNELL, C R SAHA a S ROY. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2007, **17**(7), 1257–1265. ISSN 0960-1317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/17/7/007



- [11] BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, **17**(12), R175–R195. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01
- [12] HADAS, Zdenek, Cestmir ONDRUSEK a Vladislav SINGULE. Power sensitivity of vibration energy harvester. *Microsystem Technologies* [online]. 2010, **16**(5), 691–702. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-010-1046-4
- [13] STANDARD, National. IEEE Standard on Piezoelectricity. *East* [online]. 1988, 74. ISSN 0885-3010. Dostupné z: doi:10.1109/IEEESTD.1988.79638
- [14] AMBROSIO, R., A. JIMENEZ, J. MIRELES, M. MORENO, K. MONFIL a H. HEREDIA. Study of Piezoelectric Energy Harvesting System Based on PZT. *Integrated Ferroelectrics* [online]. 2011, **126**(1), 77–86. ISSN 1058-4587. Dostupné z: doi:10.1080/10584587.2011.574989
- [15] NYAMAYOKA, Lumbumba Taty-Etienne, Gloria Adedayo ADEWUMI a Freddie Liswaniso INAMBAO. Design of a prototype generator based on piezoelectric power generation for vibration energy harvestin. *Journal of Energy in Southern Africa* [online]. 2017, **28**(4). ISSN 2413-3051. Dostupné z: doi:10.17159/2413-3051/2017/v28i4a2054
- [16] ČEPONIS, Andrius, Dalius MAŽEIKA a Vytautas BAKANAUSKAS. Trapezoidal Cantilevers with Irregular Cross-Sections for Energy Harvesting Systems. *Applied Sciences* [online]. 2017, **7**(12), 134. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7020134
- [17] KUMAR, Saurabh, Rajeev SRIVASTAVA a R.K. SRIVASTAVA. Design and analysis of smart piezo cantilever beam for energy harvesting. *Ferroelectrics* [online]. 2016, **505**(1), 159–183. ISSN 0015-0193. Dostupné z: doi:10.1080/00150193.2016.1255848
- [18] SHU, Y C a I C LIEN. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures* [online]. 2006, **15**(6), 1499–1512. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/15/6/001
- [19] YANG, Bin. Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* [online]. 2010, **9**(2), 023002. ISSN 1932-5150. Dostupné z: doi:10.1117/1.3373516
- [20] KHALIGH, A., PENG ZENG a CONG ZHENG. Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies - State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2010, **57**(3), 850–860. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2009.2024652
- [21] TOYABUR, R.M., M SALAUDDIN, Hyunok CHO a Jae Y. PARK. A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations. *Energy Conversion and Management* [online]. 2018, **168**, 454–466. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.05.018
- [22] LI, Ping, Shiqiao GAO a Huatong CAI. Modeling and analysis of hybrid

- piezoelectric and electromagnetic energy harvesting from random vibrations. *Microsystem Technologies* [online]. 2015, **21**(2), 401–414. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-013-2030-6
- [23] SOLIMAN, M S M, E M ABDEL-RAHMAN, E F EL-SAADANY a R R MANSOUR. A wideband vibration-based energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2008, **18**(11), 115021. ISSN 0960-1317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/18/11/115021
- [24] LIU, Huicong, Chengkuo LEE, Takeshi KOBAYASHI, Cho Jui TAY a Chenggen QUAN. Investigation of a MEMS piezoelectric energy harvester system with a frequency-widened-bandwidth mechanism introduced by mechanical stoppers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, **21**(3), 035005. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/21/3/035005
- [25] DHAKAR, Lokesh, Huicong LIU, F.E.H. TAY a Chengkuo LEE. A new energy harvester design for high power output at low frequencies. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2013, **199**, 344–352. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2013.06.009
- [26] LIU, Shaogang, Qianju CHENG, Dan ZHAO a Lifeng FENG. Theoretical modeling and analysis of two-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester with stopper. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2016, **245**, 97–105. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.04.060
- [27] GAMMAITONI, L., I. NERI a H. VOCCA. Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting. *Applied Physics Letters* [online]. 2009, **94**(16), 164102. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3120279
- [28] STANTON, Samuel C., Clark C. MCGEHEE a Brian P. MANN. Reversible hysteresis for broadband magnetopiezoelectric energy harvesting. *Applied Physics Letters* [online]. 2009, **95**(17), 174103. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3253710
- [29] COTTONE, F., H. VOCCA a L. GAMMAITONI. Nonlinear Energy Harvesting. *Physical Review Letters* [online]. 2009, **102**(8), 080601. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.102.080601
- [30] BARTON, David A. W., Stephen G. BURROW a Lindsay R. CLARE. Energy Harvesting From Vibrations With a Nonlinear Oscillator. *Journal of Vibration and Acoustics* [online]. 2010, **132**(2), 021009. ISSN 07393717. Dostupné z: doi:10.1115/1.4000809
- [31] ERTURK, A. a D.J. INMAN. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2011, **330**(10), 2339–2353. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2010.11.018
- [32] VOCCA, Helios, Igor NERI, Flavio TRAVASSO a Luca GAMMAITONI. Kinetic energy harvesting with bistable oscillators. *Applied Energy* [online]. 2012, **97**, 771–776. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2011.12.087
- [33] HARNE, R L a K W WANG. A review of the recent research on vibration energy

- harvesting via bistable systems. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, **22**(2), 023001. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/2/023001
- [34] PELLEGRINI, Sergio P, Nima TOLOU, Mark SCHENK a Just L HERDER. Bistable vibration energy harvesters: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2013, **24**(11), 1303–1312. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X12444940
- [35] ZHENG, Rencheng, Kimihiko NAKANO, Honggang HU, Dongxu SU a Matthew P. CARTMELL. An application of stochastic resonance for energy harvesting in a bistable vibrating system. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2014, **333**(12), 2568–2587. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2014.01.020
- [36] LAN, Chunbo a Weiyang QIN. Enhancing ability of harvesting energy from random vibration by decreasing the potential barrier of bistable harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2017, **85**, 71–81. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2016.07.047
- [37] KIM, Pilkee a Jongwon SEOK. A multi-stable energy harvester: Dynamic modeling and bifurcation analysis. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2014, **333**(21), 5525–5547. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2014.05.054
- [38] ZHOU, Zhiyong, Weiyang QIN a Pei ZHU. A broadband quad-stable energy harvester and its advantages over bi-stable harvester: Simulation and experiment verification. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2017, **84**, 158–168. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2016.07.001
- [39] LENG, Yonggang, Dan TAN, Jinjun LIU, Yuyang ZHANG a Shengbo FAN. Magnetic force analysis and performance of a tri-stable piezoelectric energy harvester under random excitation. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2017, **406**, 146–160. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2017.06.020
- [40] WANG, Guangqing, Zexiang ZHAO, Wei-Hsin LIAO, Jiangping TAN, Yang JU a Yin LI. Characteristics of a tri-stable piezoelectric vibration energy harvester by considering geometric nonlinearity and gravitation effects. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2020, **138**, 106571. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2019.106571
- [41] HAI-TAO, Li, Ding HU, Jing XING-JIAN, Qin WEI-YANG a Chen LI-QUN. Improving the performance of a tri-stable energy harvester with a staircase-shaped potential well. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2021, **159**, 107805. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2021.107805
- [42] LIU, Chaoran, Baopeng LIAO, Rui ZHAO, Kaiping YU, Heow PUEH LEE a Jie ZHAO. Large stroke tri-stable vibration energy harvester: Modelling and experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2022, **168**(20), 108699. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2021.108699
- [43] TAN, D., P. YAVAROW a A. ERTURK. Resonant nonlinearities of piezoelectric macro-fiber composite cantilevers with interdigitated electrodes in energy harvesting. *Nonlinear Dynamics* [online]. 2018, **92**(4), 1935–1945. ISSN 0924-

090X. Dostupné z: doi:10.1007/s11071-018-4172-7

- [44] WANG, Xiang, Changsong CHEN, Na WANG, Haisheng SAN, Yuxi YU, Einar HALVORSEN a Xuyuan CHEN. A frequency and bandwidth tunable piezoelectric vibration energy harvester using multiple nonlinear techniques. *Applied Energy* [online]. 2017, **190**, 368–375. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.168
- [45] DHOTE, Sharvari, Zhengbao YANG a Jean ZU. Modeling and experimental parametric study of a tri-leg compliant orthoplanar spring based multi-mode piezoelectric energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2018, **98**, 268–280. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2017.04.031
- [46] DHOTE, Sharvari, Zhengbao YANG, Kamran BEHDINAN a Jean ZU. Enhanced broadband multi-mode compliant orthoplanar spring piezoelectric vibration energy harvester using magnetic force. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018, **135**, 63–71. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.11.012
- [47] CAETANO, Virgilio J. a Marcelo A. SAVI. Star-shaped piezoelectric mechanical energy harvesters for multidirectional sources. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2022, **215**, 106962. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106962
- [48] NGO, Tien-Hoang, I.-Ting CHI, Minh-Quang CHAU a Dung-An WANG. An Energy Harvester Based on a Bistable Origami Mechanism. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2022. ISSN 2234-7593. Dostupné z: doi:10.1007/s12541-021-00614-x
- [49] WANG, Hongyan a Lihua TANG. Modeling and experiment of bistable two-degree-of-freedom energy harvester with magnetic coupling. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2017, **86**, 29–39. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2016.10.001
- [50] YANG, Wei a Shahrzad TOWFIGHIAN. A hybrid nonlinear vibration energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2017, **90**, 317–333. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2016.12.032
- [51] JIANG, Xin-Ya, Hong-Xiang ZOU a Wen-Ming ZHANG. Design and analysis of a multi-step piezoelectric energy harvester using buckled beam driven by magnetic excitation. *Energy Conversion and Management* [online]. 2017, **145**, 129–137. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2017.04.088
- [52] MASANA, Ravindra a Mohammed F. DAQAQ. Relative performance of a vibratory energy harvester in mono- and bi-stable potentials. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2011, **330**(24), 6036–6052. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2011.07.031
- [53] VAN BLARIGAN, Louis, Per DANZL a Jeff MOEHLIS. A broadband vibrational energy harvester. *Applied Physics Letters* [online]. 2012, **100**(25), 253904. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.4729875

- [54] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. Technický. Praha: Sobotáles, 1994.
- [55] DUTOIT, NOËL E., BRIAN L. WARDLE a SANG-GOOK KIM. DESIGN CONSIDERATIONS FOR MEMS-SCALE PIEZOELECTRIC MECHANICAL VIBRATION ENERGY HARVESTERS. *Integrated Ferroelectrics* [online]. 2005, **71**(1), 121–160. ISSN 1058-4587. Dostupné z: doi:10.1080/10584580590964574
- [56] BALUTA, G., A. GRAUR, R. PENTIUC, C. DIACONESCU a C. POPA. FEM Analysis of Brushless DC Servomotor with Fractional Number of Slots per Pole. *Advances in Electrical and Computer Engineering* [online]. 2014, **14**(1), 103–108. ISSN 1582-7445. Dostupné z: doi:10.4316/AECE.2014.01016
- [57] *Smart materials* [online]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/MFC-product-P1V2.html>
- [58] TODARO, Maria Teresa, Francesco GUIDO, Vincenzo MASTRONARDI, Denis DESMAELE, Gianmichele EPIFANI, Luciana ALGIERI a Massimo DE VITTORIO. Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectronic Engineering* [online]. 2017, **183–184**, 23–36. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2017.10.005
- [59] PRIYA, Shashank a Daniel J INMAN, ed. *Energy Harvesting Technologies* [online]. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-76463-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-76464-1
- [60] BEŇO, Martin. *Návrh vibračního generátoru s planžetovým uložením*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2020
- [61] HADAS, Zdenek, Vojtech VETISKA, Jan VETISKA a Jiri KREJSA. Analysis and efficiency measurement of electromagnetic vibration energy harvesting system. *Microsystem Technologies* [online]. 2016. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-016-2832-4

## 13 Seznam vlastních publikací

V této kapitole jsou uvedeny všechny publikace, které vznikly v rámci tohoto doktorského studia. Publikace mají číslování s písmenem „V“ značícím že se jedná o publikace vlastní. Publikace jsou řazeny od nejnovější po nejstarší. Vlastní publikace jsou v práci citovány v tomto odlišném citačním stylu, aby byly jasně odlišeny od článků jiných autorů.

- [V1] HADAS, Z., O. RUBES, F. KSICA a J. CHALUPA. Kinetic Electromagnetic Energy Harvester for Railway Applications-Development and Test with Wireless Sensor. *Sensors* [online]. 2022, 22(3). ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22030905
- [V2] MACHU, Z., O. RUBES, O. SEVECEK a Z. HADAS. Experimentally verified analytical models of piezoelectric cantilevers in different design configurations. *Sensors* [online]. 2021, 21(20). ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s21206759
- [V3] RUBES, O., J. CHALUPA, F. KSICA a Z. HADAS. Development and experimental validation of self-powered wireless vibration sensor node using vibration energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2021, 160. ISSN 10961216. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2021.107890
- [V4] KSICA, F., J. BEHAL, O. RUBES a Z. HADAS. Homogenized model of piezoelectric composite structure for sensing purposes [online]. 2020. ISBN 9783030299927. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-29993-4\_44
- [V5] HADAS, Z., O. RUBES, P. TOFEL, Z. MACHU, D. RIHA, O. SEVECEK, J. KASTYL, D. SOBOLA a K. CASTKOVA. Piezoelectric PVDF Elements and Systems for Mechanical Engineering Applications. In: *Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2020* [online]. 2020. ISBN 9781728156019. Dostupné z: doi:10.1109/ME49197.2020.9286689
- [V6] MAJER, Z., O. ŠEVEČEK, K. ŠTEGNEROVÁ, O. RUBEŠ, P. TOFEL a Z. HADAS. Analysis of maximal operation amplitudes of piezoelectric vibration energy harvesters [online]. 2020. ISBN 9783035715866. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.827.324
- [V7] ZELENKA, S., Z. HADAS, S. BADER, T. BECKER, P. GLJUŠČIĆ, J. HLINKA, L. JANAK, E. KAMENAR, F. KSICA, T. KYRATSI, L. LOUCA, M. MRLIK, A. OSMANOVIĆ, V. PAKRASHI, O. RUBES, O. ŠEVEČEK, J.P.B. SILVA, P. TOFEL, B. TRKULJA, R. UNNTHORSSON, J. VELAGIĆ a Ž. VRCAN. Energy harvesting technologies for structural health monitoring of airplane components—a review. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2020, 20(22). ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s20226685
- [V8] RUBES, Ondrej, Zdenek MACHU, Oldrich SEVECEK a Zdenek HADAS. Crack Protective Layered Architecture of Lead-Free Piezoelectric Energy Harvester in Bistable Configuration. *Sensors* [online]. 2020, 20(20), 5808. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20205808

- [V9] HADAS, Z., F. KSICA a O. RUBES. Piezoceramic patches for energy harvesting and sensing purposes. *European Physical Journal: Special Topics* [online]. 2019, 228(7). ISSN 19516401. Dostupné z: doi:10.1140/epjst/e2019-800156-6
- [V10] RUBES, O, P TOFEL, R MACKU, P SKARVADA, F KSICA a Z HADAS. Piezoelectric Micro-fiber Composite Structure for Sensing and Energy Harvesting Applications. In: Brezina T MAGA D. STEFEK A., ed. *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2018* [online]. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. ISBN 9788021455443. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062713361&partnerID=40&md5=e2b3beeb1b98ab275b6529e95d7b2a50>
- [V11] RUBES, O. a Z. HADAS. Design and Simulation of Bistable Piezoceramic Cantilever for Energy Harvesting from Slow Swinging Movement. In: *Proceedings - 2018 IEEE 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control, PEMC 2018* [online]. 2018. ISBN 9781538641989. Dostupné z: doi:10.1109/EPEPEMC.2018.8521846
- [V12] HADAS, Z., J. SMILEK a O. RUBES. Energy harvesting from passing train as source of energy for autonomous trackside objects. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201821105003
- [V13] RUBES, Ondrej, Martin BRABLC a Zdenek HADAS. Nonlinear vibration energy harvester: Design and oscillating stability analyses. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2018. ISSN 08883270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2018.07.016
- [V14] RUBES, Ondrej, Martin BRABLC a Zdenek HADAS. Verified nonlinear model of piezoelectric energy harvester. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, 211, 05005. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201821105005
- [V15] HADAS, Z., J. SMILEK a O. RUBES. Analyses of electromagnetic and piezoelectric systems for efficient vibration energy harvesting. In: Luis FONSECA, Mika PRUNNILA a Erwin PEINER, ed. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. 2017, s. 1024619. ISBN 9781510609938. Dostupné z: doi:10.1117/12.2265206
- [V16] RUBES, O. a Z. HADAS. Designing, modelling and testing of vibration energy harvester with nonlinear stiffness. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. 2017. ISBN 9781510609938. Dostupné z: doi:10.1117/12.2264769
- [V17] RUBES, O., J. SMILEK, M. BRABLC a Z. HADAS. Nonlinear redesign of vibration energy harvester: Linear operation test and nonlinear simulation of extended bandwidth. In: *Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016* [online]. 2016. ISBN 9781509017980. Dostupné z: doi:10.1109/EPEPEMC.2016.7752086
- [V18] RUBES, O., J. SMILEK a Z. HADAS. Development of vibration energy harvester fabricated by rapid prototyping technology. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics, Mechatronika 2014* [online]. 2014. ISBN 9788021448162. Dostupné z: doi:10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018255