

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

**Ing. Ondřej Rubeš**

**Nelineární alternativní zdroje energie**

Nonlinear energy harvesting devices

zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Inženýrská mechanika  
Školitel: doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.  
Oponenti: ---  
---

Datum obhajoby: ---

## KLÍČOVÁ SLOVA

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

## KEY WORDS

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

Místo uložení rukopisu:

Knihovna VUT-FSI v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

Ondřej Rubeš, 2022

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

## OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	6
3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ .....	7
3.1 Základní typy přeměny energie vibrací na energii elektrickou.....	7
3.1.1 Elektromagnetický vibrační mikro sběrač energie .....	7
3.1.2 Piezoelektrický vibrační mikro sběrač energie.....	9
3.2 Používané druhy nelinearit.....	10
3.2.1 Přídavná magnetická tuhost.....	11
3.2.2 Varianty s bistabilním chováním.....	12
4 VLIV ELEKTRICKÉHO TLUMENÍ NA OBECNÝ NELINEÁRNÍ MIKRO SBĚRAČ.....	13
4.1 Model obecného nelineárního vibračního mikro sběrače .....	14
4.2 Elektrický výkon vibračního mikro sběrače .....	15
4.3 Optimální elektrické tlumení .....	16
4.4 Závěry z vlivu elektrického tlumení na výkon.....	18
5 OBECNÝ NÁVRH MAGNETŮ PRO NELINEÁRNÍ TUHOST OSCILÁTORU .....	18
5.1 Topologie magnetů a parametry návrhu .....	19
5.2 Změna velikosti magnetů .....	19
6 PIEZOELEKTRICKÝ VIBRAČNÍ MIKRO SBĚRAČ .....	20
6.1 Měření vlastností piezoelektrických vibračních mikro sběračů.....	21
7 ELEKTROMAGNETICKÝ VIBRAČNÍ MIKRO SBĚRAČ .....	22
7.1 Návrh a výroba testovacího vzorku .....	22
7.2 Testování vyrobeného funkčního vzorku.....	23
8 ZÁVĚR.....	26
9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	27
CURRICULUM VITAE.....	30
ABSTRAKT .....	31
ABSTRACT .....	31



# 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.

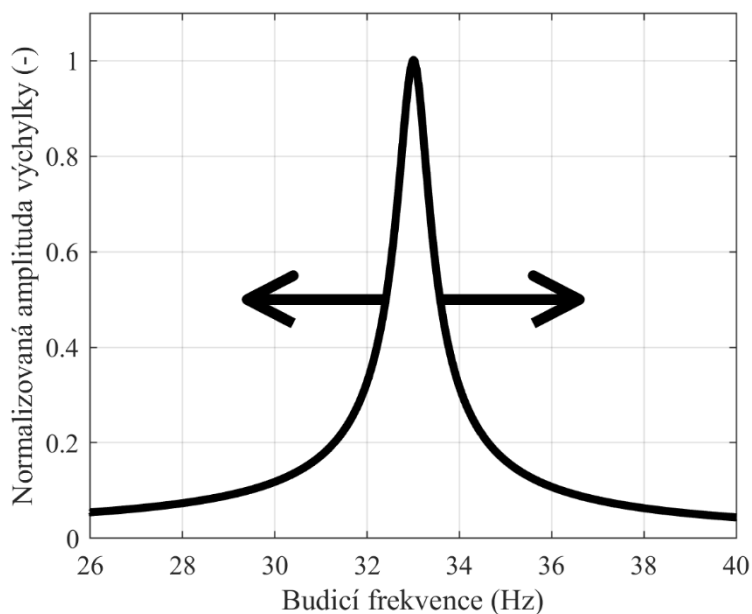
Předmětem této práce je vývoj vibračního mikro sběrače energie, který přeměňuje kinetickou energii vibrací na elektrickou energii. Jádrem zařízení je mechanický oscilátor zesilující výchylku vibrací v rezonanci. Tyto zesílené vibrace jsou pomocí různých fyzikálních principů převedeny na elektrickou energii 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  $\mu$ 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 budicího zrychlení 40 g generuje výstupní výkon 0,3  $\mu$ 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 team 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  $\mu$ 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 ENERGIÍ ELEKTRICKOU

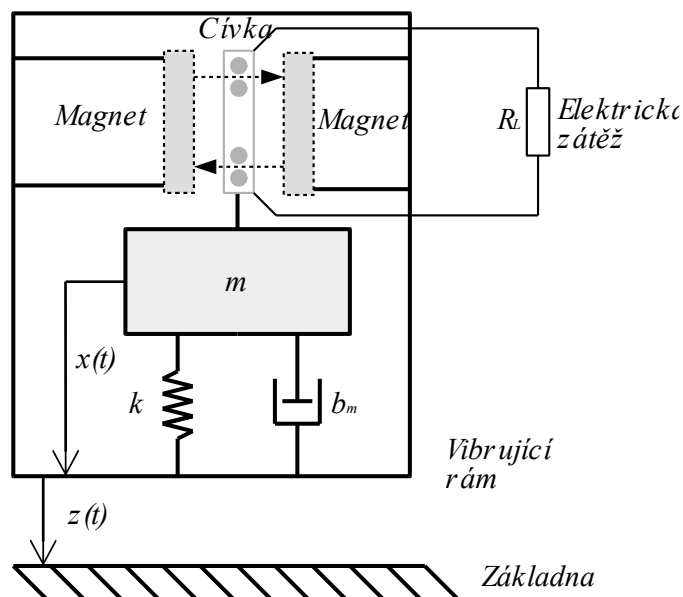
V této kapitole budou stručně představeny dva základní typy přeměny energie vibrací na energii elektrickou, tedy dva základní typy vibračních mikro sběračů energie.

##### 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]:

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

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

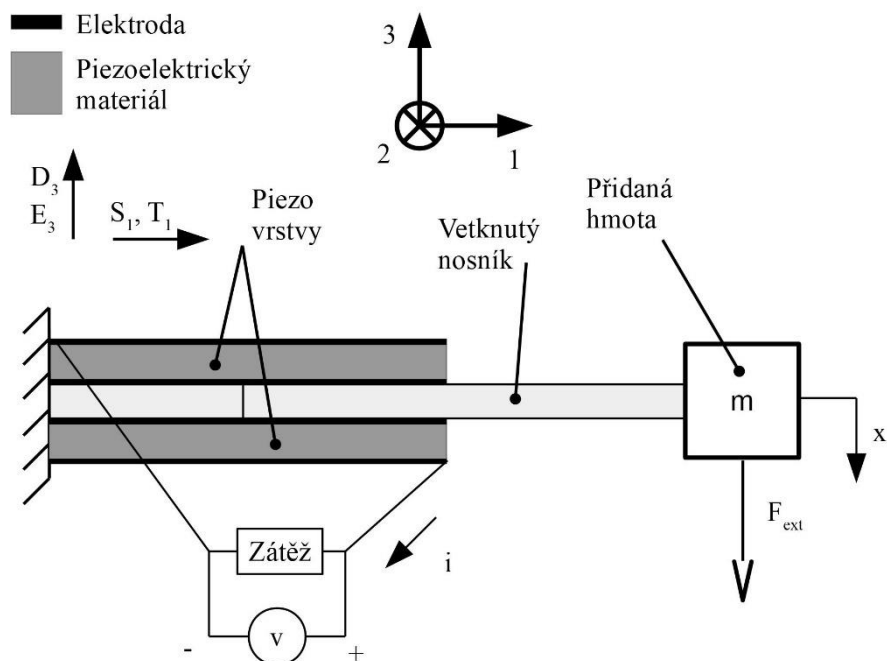
Kde  $T_p$  je mechanické napětí,  $c_{pq}^E$  mechanická tuhost,  $S_q$  je mechanické přetvoření,  $e_{kp}$  piezoelektrická konstanta,  $E_k$  je intenzita elektrického pole,  $D_i$  je elektrická indukce,  $\epsilon_{ik}^S$  je permitivita a  $i,k,p,q$  jsou koeficienty směrů. Tyto rovnice popisují piezoelektrický jev v šesti směrech [13], nicméně pouze dva jsou důležité pro mikro sběr energie [14]: mód 33 a mód 31.

Nejčastější konfigurace piezoelektrického vibračního mikro sběrače je jednostranně vetknutý nosník [15–17] s přidanou hmotou na konci. Tato konfigurace je zobrazena na Obr. 3. 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]:

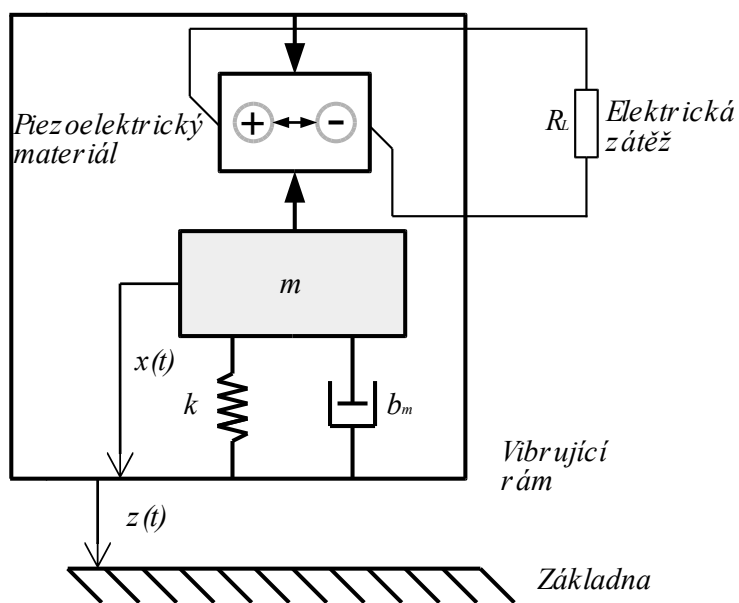
$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx + \Theta u = F_{ext} \quad (5)$$

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

Kde  $m$  je hmotnost oscilující hmoty,  $b_m$  je mechanické tlumení,  $k$  je tuhost pružiny,  $x$  je výchylka,  $F_{ext}$  je vnější budící 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. 4. 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 vlastní pieza. Jak bude ukázáno dále, tato vlastnost hraje silnou roli při hledání optimální elektrické zátěže.



Obr. 3 Schéma piezomateriálu v módu 31 na vibračním mikro sběrači



Obr. 4 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.

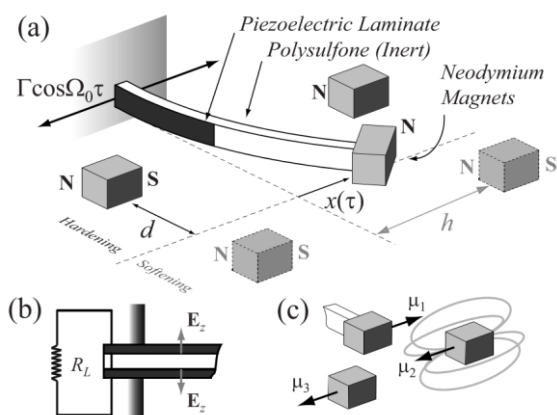
### 3.2 POUŽÍVANÉ DRUHY NELINEARIT

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. Plná verze dizertační práce v tomto místě přináší širší přehled.

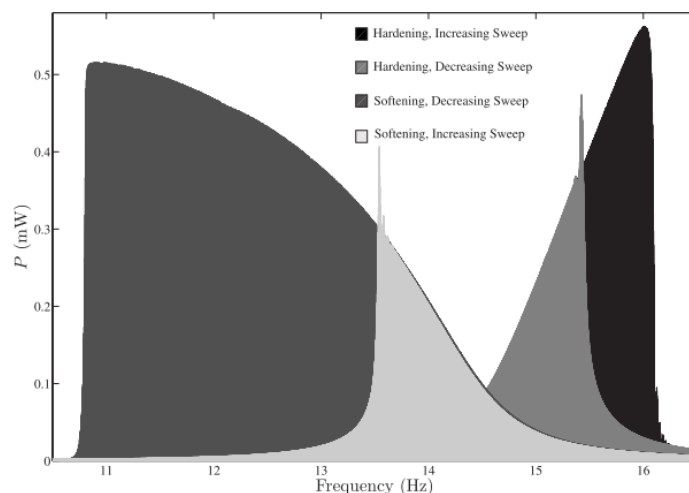
### 3.2.1 Přídavná magnetická tuhost

V následujících letech se objevovaly studie s magnety přidanými k vetknutému nosníku, které modifikují vlastní tuhost nosníku [19–21]. 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. 5. Tato konfigurace má výhodu ve snadné změně parametrů, která umožňuje sadu zajímavých experimentů.



Obr. 5 (a) Schéma piezoelektrického vibračního mikro sběrače s přidanými magnety, (b) detail připojení elektrické zátěže, (c) detail interakce magnetů. Převzato z [19]

Z výsledků autorského kolektivu [19] jsou zajímavé experimentálně naměřené závislosti výkonu na frekvenci buzení pro tvrdnoucí a měknoucí tuhost, viz. Obr. 6. Budicí 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.

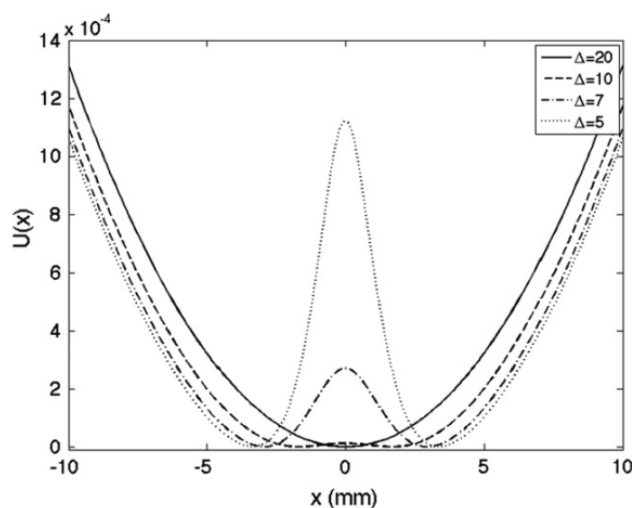


Obr. 6 Experimentálně změřená závislost výkonu piezoelektrického vibračního mikro sběrače na budící frekvenci s tvrdnoucí a měknoucí tuhostí. Převzato z [19]

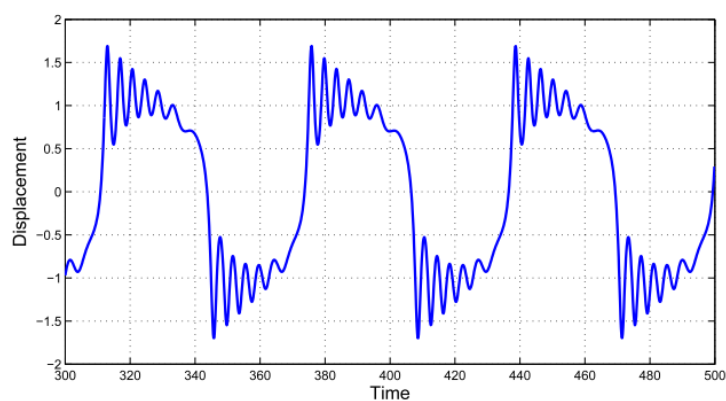
Je tedy patrné, že nelineární verze může přinést možnost rozšíření pásma, avšak je zde problém s dvěma možnými stavy kmitání, kdy ten nižší stav přináší z hlediska generování energie velice špatné výsledky, respektive špatné v porovnání s lineární variantou. Problém těchto studií může být také viděn 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.

### 3.2.2 Varianty s bistabilním chováním

V určité konfiguraci mohou přidané magnety způsobit bistabilitu oscilátoru [22–26]. Ta nastává v případě, že potenciální energie pružiny má dvě minima, viz Obr. 7. 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. 8.



Obr. 7 Graf potenciální energie oscilátoru v závislosti na výchylce pro různý parametr nastavení magnetů. Převzato z [23]



Obr. 8 Průběh výchylky v čase nelineárního vibračního mikro sběrače. Převzato z [24]

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

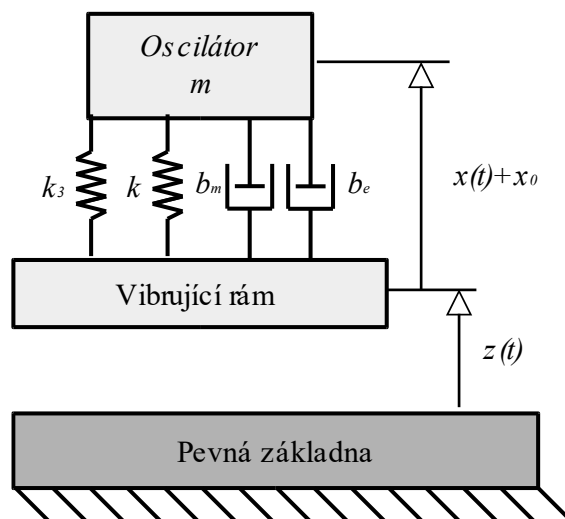
#### 4 VLIV ELEKTRICKÉHO TLUMENÍ NA OBECNÝ NELINEÁRNÍ MIKRO SBĚRAČ

Prvním důležitým výstupem práce, je analýza vlivu elektrického tlumení na obecný nelineární mikro sběrač. V této kapitole je základní model Duffingova oscilátoru jakožto vibračního mikro sběrače, tedy včetně členu představujícímu elektromechanickou přeměnu energie.

## 4.1 MODEL OBECNÉHO NELINEÁRNÍHO VIBRAČNÍHO MIKRO SBĚRAČE

Duffingův oscilátor s elektrickým tlumením (Obr. 9) a je popsán rovnicí (7), která vychází ze základní rovnice obecného vibračního mikro sběrače [12] doplněné o kubickou tuhost.

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + b_e\dot{x} + kx + k_3x^3 = -m\ddot{z} \quad (7)$$



Obr. 9 Duffingův oscilátor s doplněným elektrickým tlumením

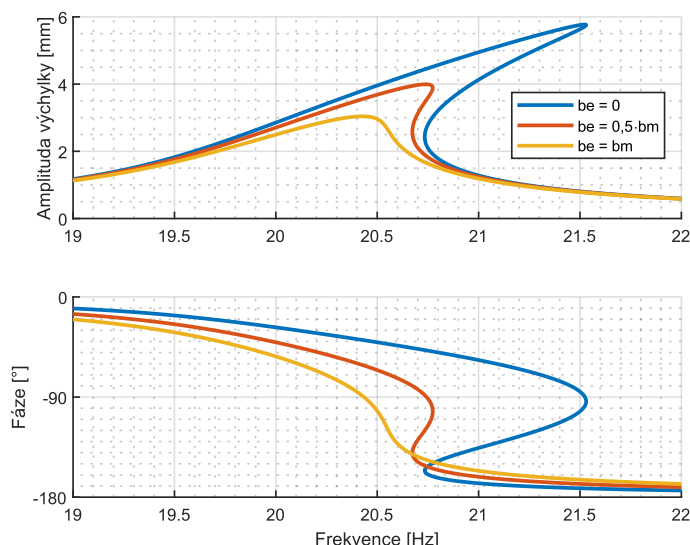
Jak ukazuje již název kapitoly, bude zde rozebrán vliv elektrického tlumení na tento mikro sběrač. Především to bude vliv na výstupní výkon. U lineárního vibračního mikro sběrače je ukázáno, že optimální hodnota elektrické zátěže je shodná s hodnotou vlastního mechanického tlumení [27]. Toto tvrzení 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. 10. 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 ztlumení.

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 otázka, zda není vhodné elektrické tlumení snížit rovnou. Odpověď musíme hledat ve výpočtu výkonu, který bude ukázán dále.



Obr. 10 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různé elektrické tlumení s buzením o amplitudě 0,2 g

## 4.2 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:

$$p = b_e \dot{x} \cdot \dot{x} = b_e \dot{x}^2 \quad (8)$$

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:

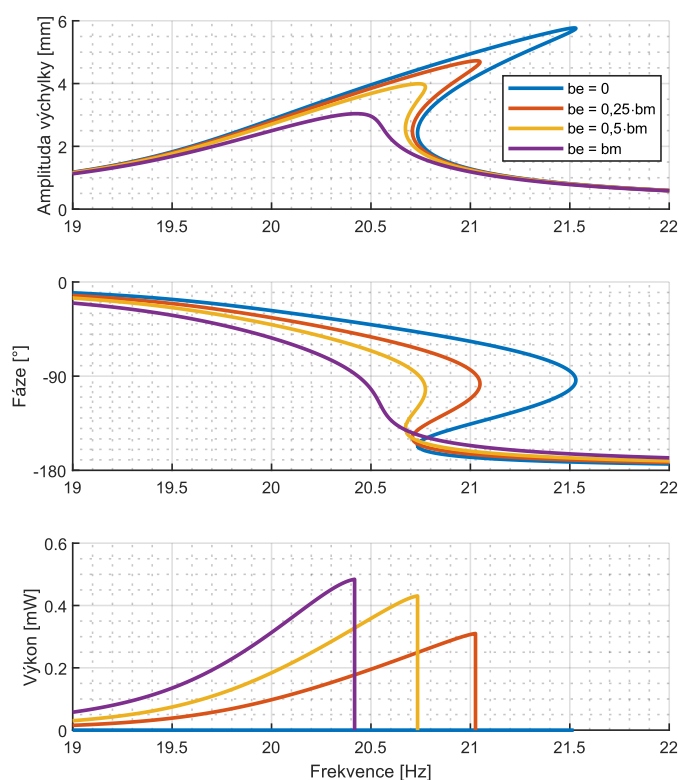
$$P_{stř} = \frac{1}{2} p_A = \frac{1}{2} b_e \dot{x}_A^2 \quad (9)$$

Pomocí tohoto vztahu lze snadno rozšířit graf o závislost výkonu. Tento rozšířený graf je na Obr. 11. 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. 11 Amplitudová a fázová charakteristika nelineárního oscilátoru pro různé elektrické tlumení doplněná o elektrický výkon sběrače s buzením o amplitudě 0,2 g

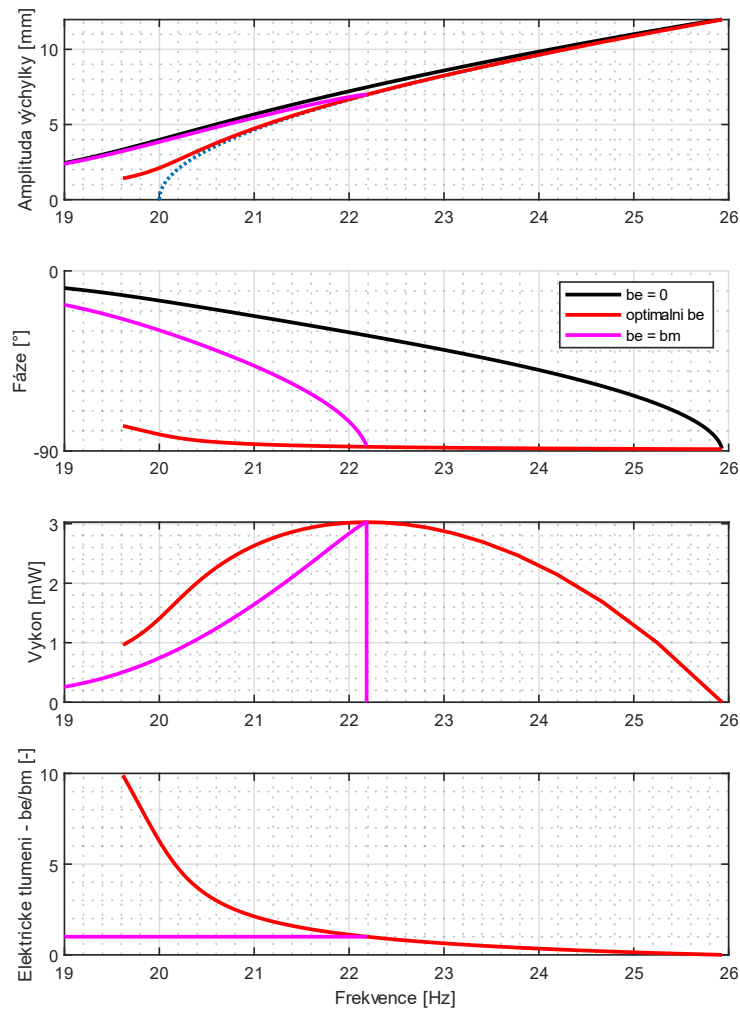
### 4.3 OPTIMÁLNÍ ELEKTRICKÉ TLUMENÍ

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. 12 ve srovnání s tradiční a nulovou elektrickou zátěží. Buzení je v tomto případě zrychlením o amplitudě 0,5 g.

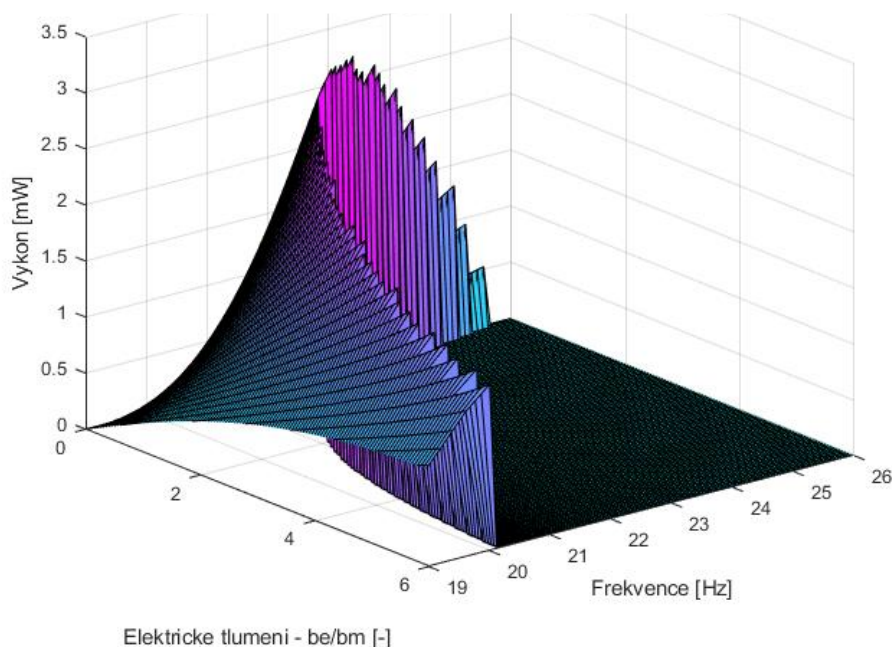
Z grafu je patrné, že pro  $b_e = b_m$  je výkon maximální, avšak pouze pro jednu danou frekvenci. Pro vyšší frekvence je výkon nulový a pro nižší frekvence strmě klesá. Naopak s optimalizovanou elektrickou zátěží je využitelná frekvence výrazně vyšší. Je to sice na úkor klesajícího výkonu, avšak stále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



Obr. 12 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. 13. Optimum prezentované na Obr. 12 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. 13 Závislost výkonu na budicí frekvenci a proměnném elektrickém tlumení s buzením o amplitudě 0,5 g

#### 4.4 ZÁVĚRY Z VLIVU ELEKTRICKÉHO TLUMENÍ NA VÝKON

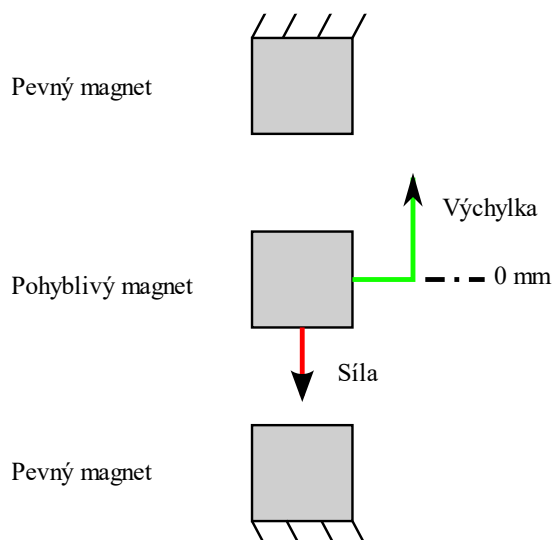
Závěrem z této kapitoly je důležitý poznatek. Při návrhu nelinearity je možné uvažovat vibrační mikro sběrač pouze s vlastním tlumením. Po doplnění optimalizované elektrické zátěže bude využita celá šířka frekvenčního pásma s maximálním výkonem zhruba uprostřed rozsahu. To vše však za určité amplitudy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

### 5 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 [28].

## 5.1 TOPOLOGIE MAGNETŮ A PARAMETRY NÁVRHU

Základní schéma je na Obr. 14. Krajní magnety jsou upevněny k rámu, zatímco prostřední magnet kmitá spolu s pohyblivým ramenem.



Obr. 14 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.

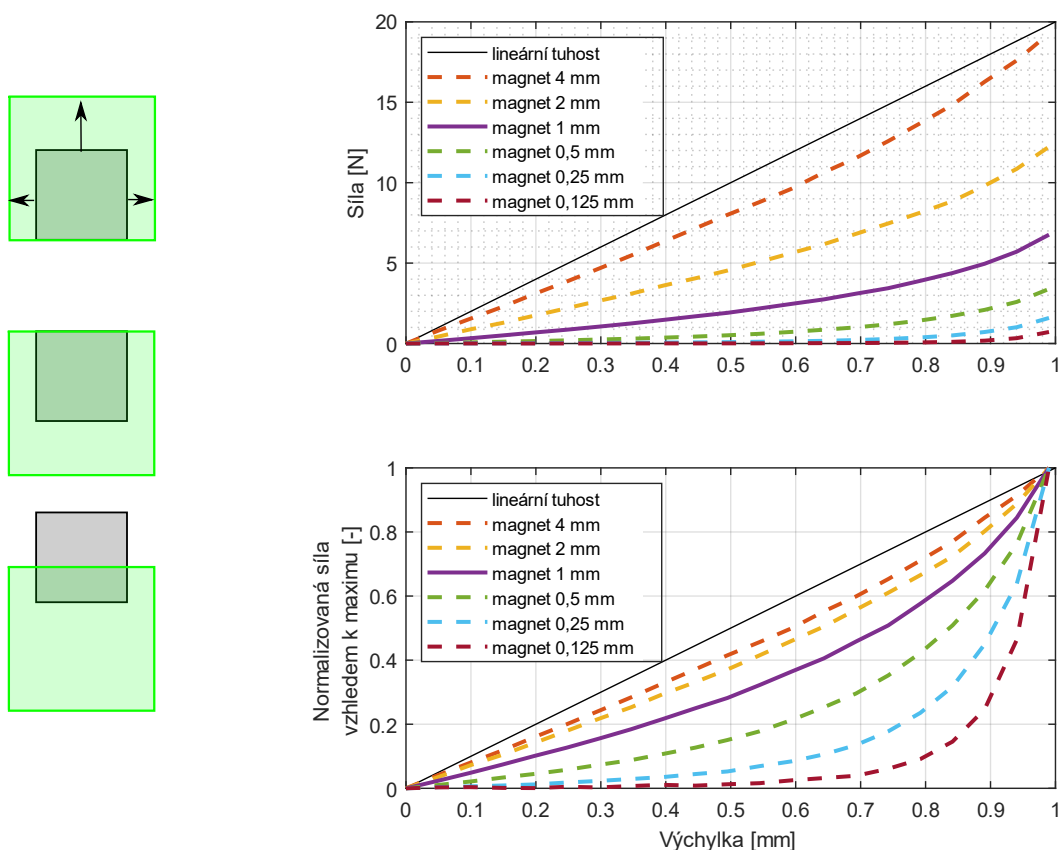
Pro účely stanovení těchto vlivů bylo rozhodnuto provést sadu výpočtů pro měnící se rozměry magnetů tak, aby byl zřetelný základní vliv těchto parametrů na výslednou tuhost. Jako konstantní byla stanovena mezera mezi magnety, což odpovídá návrhu pro předem danou maximální výchylku, což je často požadovaný 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.

## 5.2 ZMĚNA VELIKOSTI MAGNETŮ

V plné verzi dizertační práce jsou obsaženy rozsáhlé výsledky těchto simulací. Jejich závěr lze zestručnit tak, že nejvhodnější se jeví využití stejně velkých magnetů čtvercového průřezu, u kterých lze měnit jejich rozměr v poměru k velikosti mezery mezi nimi. Změna velikosti magnetů je schematicky zobrazena na Obr. 15, 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 sběrač, neboť je jasně patrné, že pro nelineární chování budou zřejmě vhodné menší magnety.



Obr. 15 Závislost síly na výchylce pro různou velikost magnetů

## 6 PIEZOELEKTRICKÝ VIBRAČNÍ MIKRO SBĚRAČ

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.

V této kapitole bude ukázáno měření jednoho komerčního nosníku a dvou nosníků vlastní konstrukce, na kterých budou ukázána omezení piezoelektrického nosníku.

## 6.1 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ PIEZOELEKTRICKÝCH VIBRAČNÍCH MIKRO SBĚRAČŮ

V rámci práce bylo využito komerčního nosníku Midé V21BL a vlastních piezonosníků, jejichž konstrukce je popsána v plné verzi práce. Zde uveďme pouze parametry určené z měření. Detailní rozbor modelu z způsobů určení parametrů je též uveden v plné verzi práce.

Pro vyhodnocení parametrů je vhodné použít metriku, která obsahuje nejen elektromechanický koeficient, ale také kapacitu pieza. A rovněž je vhodné vyjít ze vztahu pro výpočet elektrického tlumení. Je potom nasnadě, že tlumicí schopnosti piezoelektrické vrstvy (TSP) na daném nosníku vhodně reprezentuje vztah:

$$TSP = \frac{\Theta^2}{C} \quad (10)$$

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).

$$FoM = \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}} \quad (11)$$

Tlumicí schopnosti piezoelektrické vrstvy na daném vzorku nosníku vyjádřené kvantitativně pomocí vztahu (10) a označené zkratkou TSP jsou pro všechny 3 vzorky vypočítané v Tab. 1. 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. 1 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 4 jsou zde tak prakticky nepoužitelné. 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.

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.

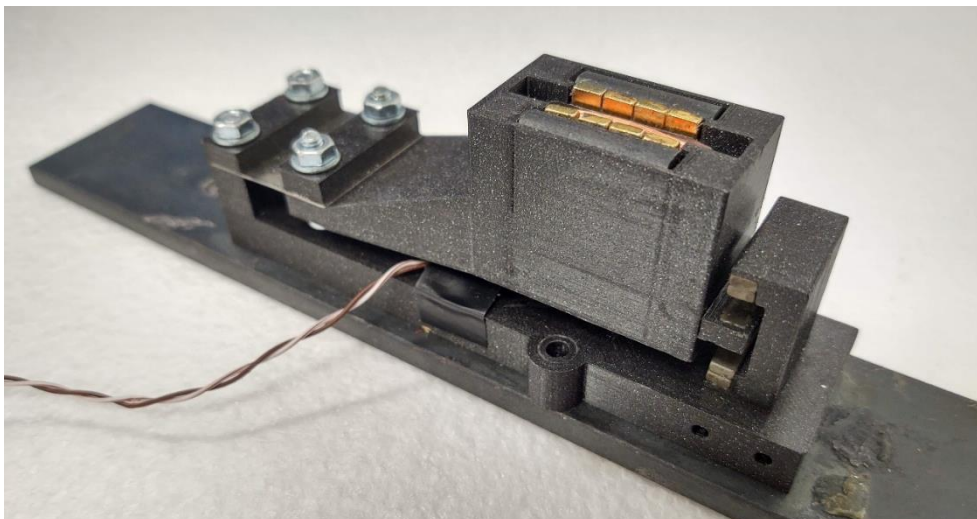
## **7 ELEKTROMAGNETICKÝ VIBRAČNÍ MIKRO SBĚRAČ**

Elektromagnetický vibrační mikro sběrač je oproti piezoelektrickému náročnější na konstrukci, avšak přináší potenciál vyššího zatlumení. V této kapitole bude ukázán návrh a testování vlastního elektromagnetického vibračního mikro sběrače. V plné verzi práce je též kapitola věnující se jeho matematickému modelu.

### **7.1 NÁVRH A VÝROBA TESTVACÍHO 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.

V rámci dizertace byla provedena zásadní modifikace v podobě změny rotační vazby na planžetové uložení. Ukázalo se, že takové uložení nejen že je konstrukčně snazší, ale jsou v něm také menší ztráty energie. Návrh další částí jako jsou magnety a cívka jsou detailně popsány v plné verzi dizertační práce. Vyroběný vzorek elektromagnetického vibračního mikro sběrače je na Obr. 16.



Obr. 16 Fotografie vyrobeného vzorku elektromagnetického vibračního mikro sběrače

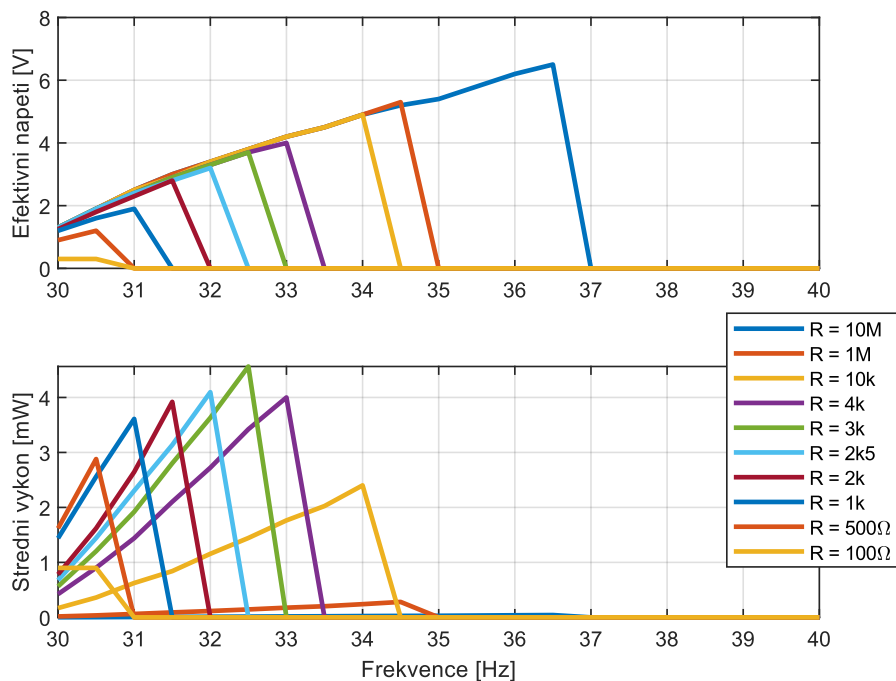
Celková hmotnost je 140 g a hmotnost kmitajícího ramene je 90 g. Celková hmotnost je uvedena bez ocelové příložky, na které je vibrační mikro sběrač upevněn kvůli snadnější montáži při měření.

## 7.2 TESTOVÁNÍ VYROBENÉHO FUNKČNÍHO VZORKU

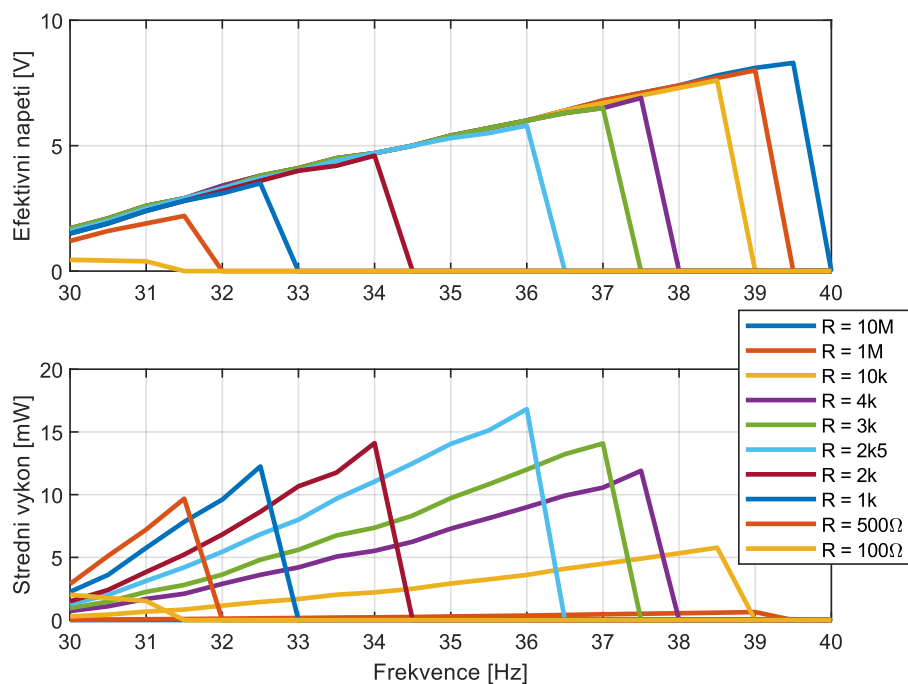
Vyrobený vibrační mikro sběrač byl podroben testování. V plné verzi práce jsou uvedeny všechny testy, avšak zde uvedme pouze měření se silným zdrojem sinusových vibrací. Měření byla provedena pro dvě různé amplitudy budícího zrychlení a sice 50 mg a 100 mg, tedy  $0,5$  a  $1 \text{ ms}^{-2}$ .

Pro buzení 50 mg zobrazuje výsledky Obr. 17. Z průběhů je na první pohled patrná dobrá korelace s teoretickým průběhem určeným v kapitole 4 . Maximální výkon je 4,5 mW při zátěži 3 k $\Omega$  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 k $\Omega$ . Napětí potom se snižující se zátěží a zvyšující se frekvencí roste stále.

Pro buzení 100 mg jsou výsledky obdobné na Obr. 18. 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 k $\Omega$ . Zde je potřeba upozornit, že 0,5 k $\Omega$  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.



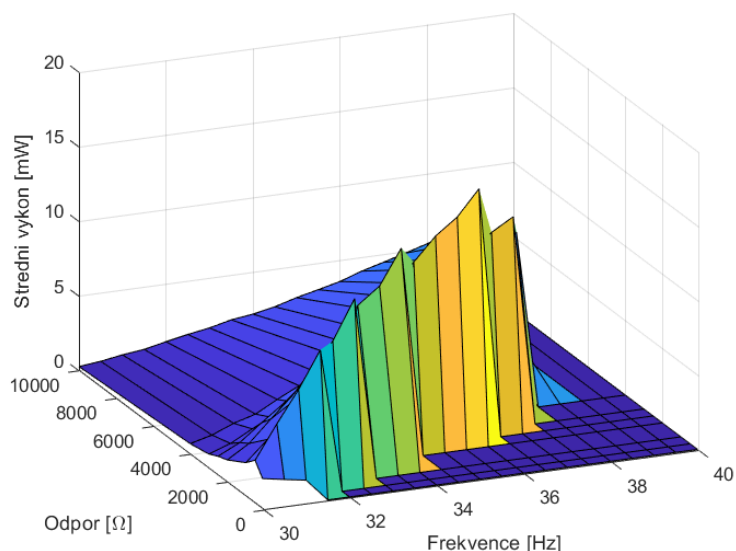
Obr. 17 Závislost napětí a výkonu na frekvenci pro buzení zrychlením o amplitudě 50 mg



Obr. 18 Závislost napětí a výkonu na frekvenci pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg

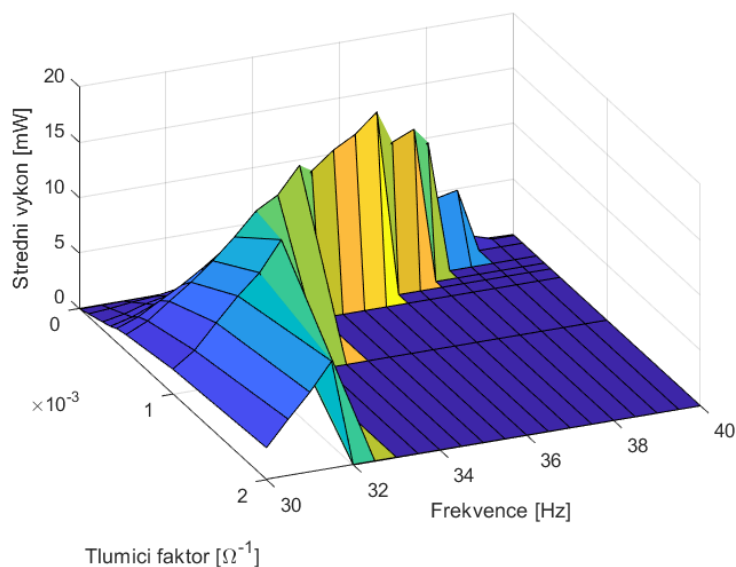
Pro úplnost je zde ještě prostorový graf závislosti výkonu na budící frekvenci a elektrickém odporu, Obr. 19. Je v něm zároveň patrný maximální výkon v závislosti na frekvenci a taktéž měnící se hodnota potřebného elektrického odporu.





Obr. 19 Závislost výkonu na frekvenci a elektrické zátěži pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg

Graf opět dobře koreluje s teoretickým grafem z kapitoly 4 . 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. 20. Tento tlumicí faktor dává po vynásobení patričnými konstantami přímo hodnotu elektrického tlumení, a tak je průběh tohoto grafu odpovídající přímo teoretickému grafu Obr. 13.



Obr. 20 Závislost výkonu na frekvenci a tlumícím efektu elektrické zátěže pro buzení zrychlením o amplitudě 100 mg

## 8 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 budicí 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, publikovaný v [29] a blíže popsany v plné verzi dizertační práce 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.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [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] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] 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

## CURRICULUM VITAE

### Osobní údaje

Jméno: Ing. Ondřej Rubeš  
Datum narození: 17. 11. 1991  
Občanství: ČR  
E-mail: [ondrej.rubes@vut.cz](mailto:ondrej.rubes@vut.cz)

### Zaměstnání

2017–dosud VUT–FSI – Odborný asistent  
2017–2018 VUT–FSI – Technicko hospodářský pracovník  
2012–2017 ZOKO, spol. s r. o., Lomnička – Správa výkresové dokumentace  
2008–2016 RK cyklos, Brno – Sezónní brigáda, servis jízdnicích kol

### Vzdělání

2016–dosud VUT–FSI, Ph.D., obor Inženýrská mechanika  
2011–2016 VUT–FSI, Bc. + Ing., obor Mechatronika  
2003–2011 Gymnázium Brno, třída Kapitána Jaroše, matematická třída

### Publikační a vědecká činnost

22 publikací, z toho 7 v impaktovaných časopisech. 100 citací a H-index 6 dle databáze Scopus. Mnoho publikací prezentováno na zahraničních vědeckých konferencích.

Člen řešitelského týmu 3 projektů GAČR a 3 projektů TAČR.

### Jazykové znalosti

Angličtina pokročilá  
Němčina základní  
Francouzština základní

### Technické znalosti a dovednosti

PC – Kancelářské programy a specializované programy týkající se strojírenské, a především mechatronické problematiky.

Kovoobrábění – Základy práce s obráběcími stroji klasickými i CNC

### Vlastnosti a zájmy

Považuji se především za komunikativního, pozitivně laděného a asertivního člověka. Rád udržuji pozitivně naladěný kolektiv, ve kterém panuje tvůrčí atmosféra, která podporuje dobré pracovní výsledky. Ze zálib se nejradši věnuji sportům, hudbě a v neposlední řadě rodině.

## **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.

## **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.