



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

**NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU S VYUŽITÍM
NELINEÁRNÍCH CHARAKTERISTIK**

DESIGN OF VIBRATION ENERGY HARVESTER WITH USING OF NON-LINEAR CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Rubeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Ondřej Rubeš
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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

Návrh vibračního generátoru s využitím nelineárních charakteristik

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti s rozvojem technologií jako jsou IOT a M2M komunikace se zvyšuje poptávka po nezávislém zdroji elektrické energie z okolí, který dokáže autonomně napájet danou bezdrátovou aplikaci. Vibrace technických soustav je zajímavý zdroj okolní energie, který však lze efektivně převádět na elektrickou energii jen v úzkém pracovním pásmu. Toto pracovní pásmo lze rozšířit nelinearitami konstrukce vibračních generátorů a úkolem této práce je tyto metody analyzovat a experimentálně ověřit.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše nelineárních přístupů v oblasti získávání elektrické energie z vibrací
2. Analýza potenciálních přístupů a výběr vhodné konstrukční varianty
3. Vytvoření modelu nelineárního generátoru a návrh parametrů generátoru
4. Analýza generovaného výkonu v porovnání s lineárním modelem
5. Experimentální ověření na testovacím vzorku

Seznam literatury:

Lán, R.: Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. Diplomová práce.

Stanton, S.C., McGehee, C.C., Mann, B.P.: Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator

(2010) Physica D: Nonlinear Phenomena, 239 (10), pp. 640-653.

Neiss, S., Goldschmidtboeing, F., Kroener, M., Woias, P.: Analytical model for nonlinear piezoelectric energy harvesting devices (2014) Smart Materials and Structures, 23 (10), art. no. 105031.

Henderson I.: Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications, APC Int., USA. 2011.

Arnau A.: Piezoelectric Transducers and Applications, Springer, Germany, 2008.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na zkonstruování piezoelektrického generátoru s přidanou nelineární tuhostí. Lineární generátor má rezonanční frekvenci s velice úzkým pásmem rezonance. Následkem toho je generátor velice citlivý na přeladění a může být nastaven pouze pro generování z jedné úzké frekvence. Myšlenka použití generátoru s přidanou nelineární tuhostí je rozšířit pásmo rezonance, aby mohl být generátor využit pro více budících frekvencí. V práci je využit generátor Midé V21BL s přidaná nelineární tuhost je realizována pomocí permanentních magnetů.

Abstract

This thesis is focused on design of piezoelectric energy harvester with additional nonlinear stiffness. Linear generator has very narrow resonance frequency bandwidth. It makes the resonance mechanism very sensitive to tuning up of the resonance frequency and it can be tuned only for one narrow vibration peak. The main idea for using of the vibration energy harvester with nonlinear stiffness is to make resonance frequency bandwidth wider, so the generator will be useable for more excitation frequencies. In this thesis is used generator Midé V21BL and additional nonlinear stiffness is realized with permanent magnets.

Klíčová slova

Piezoelektrický generátor, energy harvesting, nelineární tuhost, magnetický obvod, kinematické buzení, Femm, Matlab, Simulink;

Key words

Piezoelectric energy harvester, energy harvesting, nonlinear stiffness, magnetic circuit, kinematics excitation, Femm, Matlab, Simulink;

RUBEŠ, O. *Návrh vibračního generátoru s využitím nelineárních charakteristik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Já, Ondřej Rubeš, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Návrh vibračního generátoru s využitím nelineárních charakteristik vypracoval samostatně, s radami vedoucího práce doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....
Ondřej Rubeš

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D., za vstřícný přístup v průběhu tvorby této práce a za jeho cenné rady a připomínky. Rovněž bych chtěl poděkovat svojí drahé manželce, se kterou jsme se vzájemně podporovali při tvorbě našich diplomových prací.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Motivace a cíle práce	10
3	Existující přístupy k rozšíření rezonance.....	11
3.1	Analytický model Duffingova oscilátoru s piezoelektrickou vazbou pro generování elektrické energie a jeho rozbor	11
3.2	Mechanická realizace nelinearity	12
3.2.1	Skoková nelinearita za pomoci dorazu	12
3.2.2	Hladká nelinearita za pomoci dorazu.....	13
3.3	Realizace nelinearity pomocí tíhové síly	14
3.4	Realizace nelinearity pomocí přídavných magnetů	15
3.4.1	Přídavný magnet pro elektromagnetický generátor	15
3.4.2	Využití magnetu pro tvrdnoucí tuhost	17
3.4.3	Komplexní nelineární soustava piezonosníku s magnety	18
4	Volba vhodné koncepce nelineárního generátoru.....	21
4.1	Piezoelektrický vibrační generátor.....	21
4.1.1	Dostupná komerční řešení	22
4.2	Přidaná nelineární tuhost.....	23
4.2.1	Topologie s použitím dvou magnetů	23
4.2.2	Topologie s použitím tří magnetů	24
4.2.3	Omezení topologií.....	24
5	Určení parametrů generátoru Midé V21BL.....	25
5.1	Redukovaná hmotnost a tuhost nosníku.....	25
5.2	Vlastní tlumení	26
5.2.1	Popis experimentu.....	26
5.2.2	Realizace experimentu	27
5.3	Zjednodušený model generátoru bez zátěže	28
6	Návrh magnetů pro nelineární tuhost.....	29
6.1	Volba standardně dostupných magnetů	30
6.2	Výpočet nelineárních tuhostí.....	30
6.2.1	Magnety pro topologii 1	32
6.2.2	Magnety pro topologii 2	33
6.2.3	Magnety pro topologii 3	34
6.2.4	Magnety pro topologii 4	38
6.3	Určení vhodných magnetů pro další postup návrhu.....	40

7	Simulace generátoru Midé V21BL s přidanou nelineární tuhostí bez zátěže	41
7.1	Zvolená nelinearita pro simulace	41
7.2	Model nosníku s přidanou nelineární tuhostí	42
7.3	Výsledky simulací	43
7.3.1	Změna amplitudy buzení	43
7.3.2	Změna rychlosti přejezdu	47
8	Simulační porovnání lineární a nelineární verze generátoru Midé V21BL	49
8.1	Model generátoru se zátěží	49
8.1.1	Úprava modelu pro nelineární tuhost	49
8.2	Nalezení ideální elektrické zátěže	51
8.3	Porovnání výkonu lineárního a nelineárního generátoru	55
9	Experimentální měření generátoru Midé V21BL s přidanou nelineární tuhostí	57
9.1	Konstrukce experimentálního vzorku	57
9.2	Kvazi-periodické buzení	58
9.2.1	Buzení nízkými frekvencemi	59
9.2.2	Buzení vysokými frekvencemi	61
9.2.3	Srovnání s lineárním generátorem	61
9.3	Buzení se změnou frekvence	62
10	Závěr	63
11	Seznam použitých zdrojů	64
12	Seznam obrázků	66
13	Seznam příloh	68

1 Úvod

Ať se nám to líbí nebo ne, v posledních letech se z čím dál tím více obyčejných přístrojů stávají smart systémy, které myslí za nás a často dokonce proti nám. O významu a přínosu takového vývoje by mohly být vedeny a také vedeny jsou dlouhé diskuze s nejistým výsledkem. Jisté však je, že něco jako morálka je dnes až na posledním místě a lidé se řídí pohodlností a reklamou, výrobci potom touhou po maximalizaci zisků, a tak se tato inovativní řešení objevují a stále objevovat budou, protože je lidé kupují, aby měli to nejnovější a byli trend.

S novými systémy však přichází i nové požadavky na napájení. Zatímco před pár lety vydržel mobilní telefon nabitý týden, dnes je to jeden den. Náramkové hodiny vyžadovaly výměnu baterie jednou za rok, pokud neměly systém Quartz, a dnes smart hodinky nabíjíme jako mobilní telefon. Vzniká tedy logický požadavek, na nějaký autonomní napájecí zdroj, který by byl schopen z okolní volné energie odebírat a přetvářet energii napájecí.

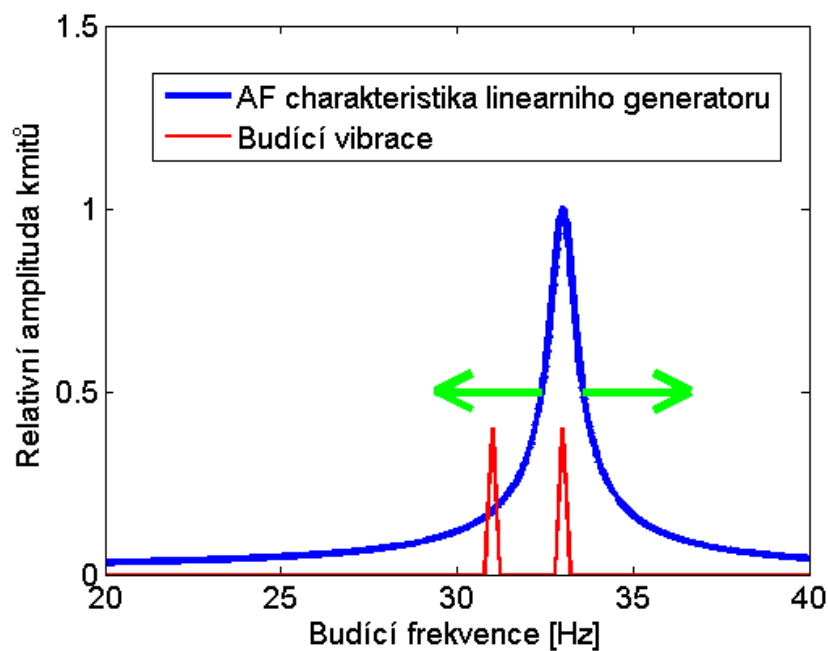
Řešení, zabývající se využitím okolní energie je bezpočet. Jako typické reprezentanty můžeme uvést využití energie z pohybu člověka, sluneční svit, změny teplot nebo vibrace. Využitím poslední ze zmíněných, tedy vibracemi, se má zabývat tato práce.

Jak je již známo z posledních let, některé z přístupů k využití okolní energie jsou značně nešťastné, jako například lány fotovoltaických elektráren, které zohyzďují krajinu a způsobují přetěžování sítě. Naopak vibrace jsou zpravidla nežádoucí a bývají často mařeny do disipativních tlumičů. Jejich využití pro získ elektrické energie má tedy dvojitý pozitivní přínos sice získ energie a zatlumení nežádoucích vibrací. Jak bude ukázáno dále, takový získ energie má značná omezení, jejich alespoň částečné eliminaci se věnuje právě tato práce.

2 Motivace a cíle práce

Pro získání elektrické energie z vibrací jsou používány vibrační generátory, tedy generátory, které energii vibrací přeměňují na energii elektrickou. Jedná se zpravidla o oscilátor s jedním stupněm volnosti, naladěným na rezonanční frekvenci shodnou s budící frekvencí. Elektrická energie je generována pomocí jevu elektromagnetické indukce, piezoelektrického, magnetostrikčního nebo některých dalších. Vždy je však potřeba vybudit kmitání pohyblivé části generátoru. Elektrická zátěž potom představuje spolu s disipativními ztrátami tlumení.

Největším limitem současných lineárních generátorů je malá šířka rezonance. Generátory jsou tak využitelné pouze v rezonanci, kde dávají dostatečný výkon. Mimo rezonanci je výkon řádově nižší, a tak se generátory stávají mimo rezonanci zcela nepoužitelné. Myšlenku rozšíření rezonance ilustruje Obr. 1. Pokud by se povedlo rezonanci rozšířit, mohlo by být využito více frekvencí z budících vibrací.



Obr. 1: Vize rozšíření pásma rezonance

Vhodným postupem pro rozšíření rezonance se jeví nelineární tuhost oscilátoru. Práce se tedy bude zabývat návrhem nelineární tuhosti a ověřením jejího vlivu na šířku rezonance a obecně na chování celého generátoru.

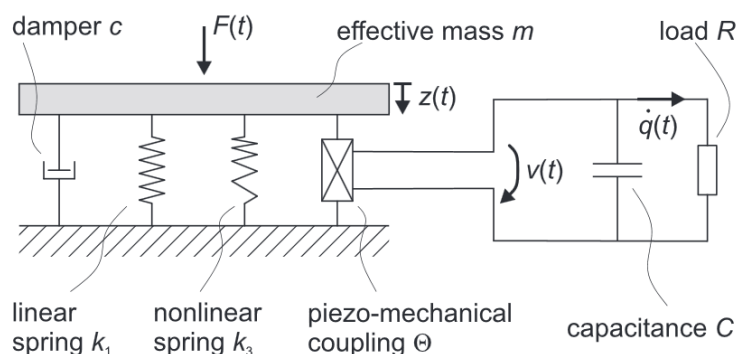
3 Existující přístupy k rozšíření rezonance

V současné době se začíná experimentovat s různými nelineárními přístupy. Jejich výzkum je však teprve na počátku. V této kapitole budou předvedeny některé z nich, jejich srovnání a vyhodnocení, ze kterého je žádoucí vyvodit východiska pro tuto práci.

3.1 Analytický model Duffingova oscilátoru s piezoelektrickou vazbou pro generování elektrické energie a jeho rozbor

Duffingův oscilátor, který je popsán rovnicí (1), je případ nelineárního oscilátoru, který je analyticky řešitelný. Schematicky takový oscilátor ukazuje Obr. 2. Jeho rozбором se zabývá článek [1]

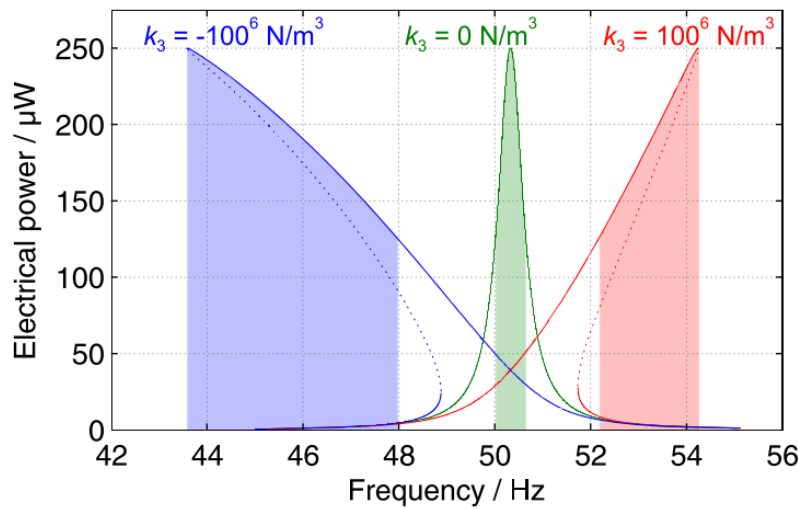
$$m \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + k \cdot z + c \cdot z^3 = F_{ext} \quad (1)$$



Obr. 2: Schéma Duffingova oscilátoru s piezoelektrickou přeměnou energie [1]

Z rovnice (1) je patrné, že nelineární člen vystupuje kubický u tuhosti. Patříčná konstanta může být kladná nebo záporná, což způsobí tvrdnoucí nebo měknoucí charakteristiku. Změnu A-f charakteristiky ukazuje Obr. 3. Článek se dále zabývá určením rozšíření rezonance, avšak pouze pro jednu amplitudu buzení. Navíc se nezabývá problematikou bistability v prohnuté části charakteristiky, kdy jsou možné dvě amplitudy kmitání, přičemž při té nižší z nich je přínos oproti lineárnímu oscilátoru zcela zanedbatelný.

Takový přístup sice dává základní vhled do chování oscilátoru, avšak je poměrně málo přínosný pro představu fungování generátoru v reálné soustavě. Ideál Duffingova oscilátoru je navíc poměrně těžko dosažitelný a je otázka, zda drobná odchylka od charakteru tuhosti, kdy se jedná o součet lineárního a kubického průběhu, přinese pouze drobnou odchylku od teorie Duffingova oscilátoru, nebo zda se zcela změní chování ve frekvenčním spektru.



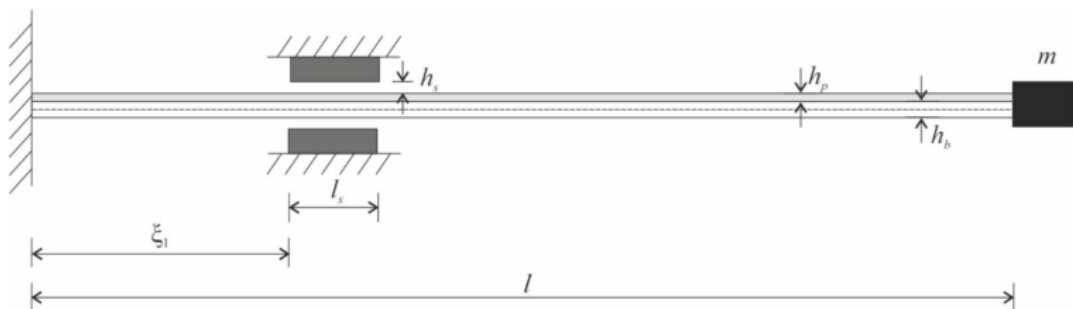
Obr. 3: Vliv nelineárního členu na Duffingův oscilátor [1]

3.2 Mechanická realizace nonlinearity

Prvním přístupem k vytvoření nonlinearity, jsou mechanické způsoby ovlivnění tuhosti. Takové způsoby jsou snadno realizovatelné, avšak lze od nich očekávat určité problémy.

3.2.1 Skoková nonlinearity za pomoci dorazu

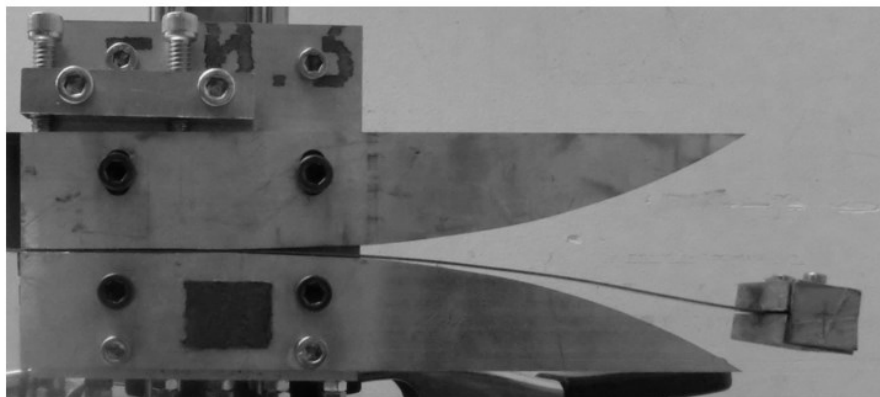
Nonlinearitu typu skokové směny využívá [2], kdy k piezogenerátoru jsou přidány mechanické dorazy v určité vzdálenosti, které změny kmit nosníku. Řešení ukazuje Obr. 4. Bez dalšího studia výsledků lze toto řešení považovat za poměrně nešťastné, protože v místě dorazu bude docházet k vysokému namáhání nosníku, a lze tedy očekávat poměrně rychlou cyklickou únavu. Dále může docházet k porušování piezovrstvy, která je na povrchu nosníku a nejspíš i ke koncentraci náboje v místě dorazu, kde bude vyšší deformace.



Obr. 4: Realizace nonlinearity pomocí dorazu piezonosníku [2]

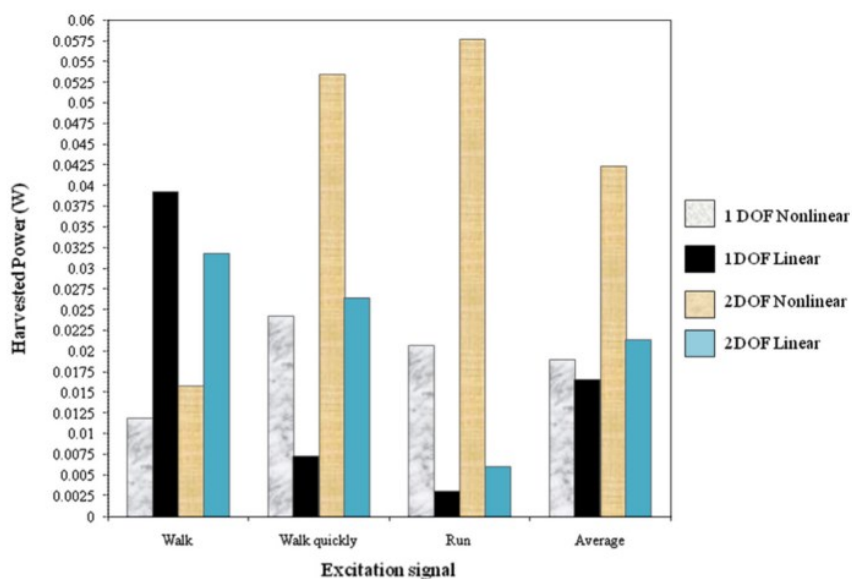
3.2.2 Hladká nelinearita za pomoci dorazu

Další řešení nelinearity je zobrazeno na Obr. 5. Autoři [3] využívá závaží kmitajícího na nosníku, což je samo o sobě lineární řešení. K této konstrukci je však přidáno omezení maximální výchylky nosníku, které při správném natvarování může způsobit vhodnou nelinearitu. Výhodou je možnost libovolného tvarování nelineárního průběhu. Dále také toto řešení nezpůsobí skokovou změnu, takže odpadá problém s rázy a cyklickou únavou. Nevýhodou je naopak nutnost přesné výroby a velké množství disipované energie.



Obr. 5: Mechanická realizace nelinearity [3]

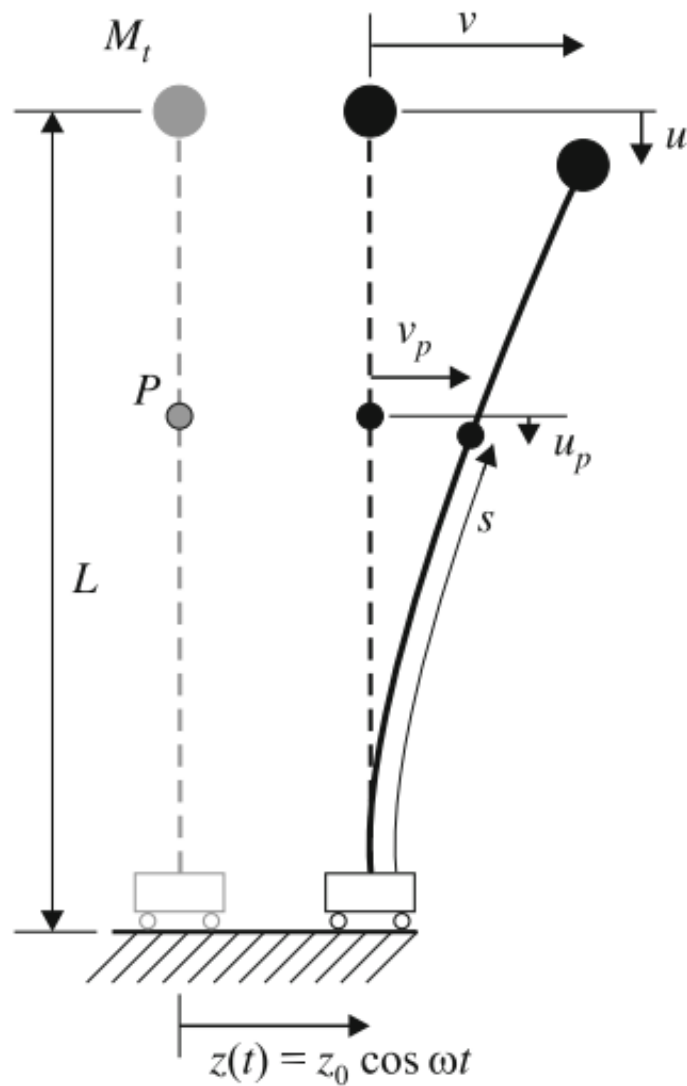
Řešení bylo určeno pro generování energie z chůze a běhu a porovnání výhodnosti lineárního a nelineárního přístupu se nalézá na Obr. 6. Z porovnání je patrné, že nelineární přístup přinesl pro většinu pohybů více energie. Mnohem větší vliv mělo však využití generátoru se dvěma stupni volnosti.



Obr. 6: Srovnání lineárních a nelineárních generátorů z aplikace [3]

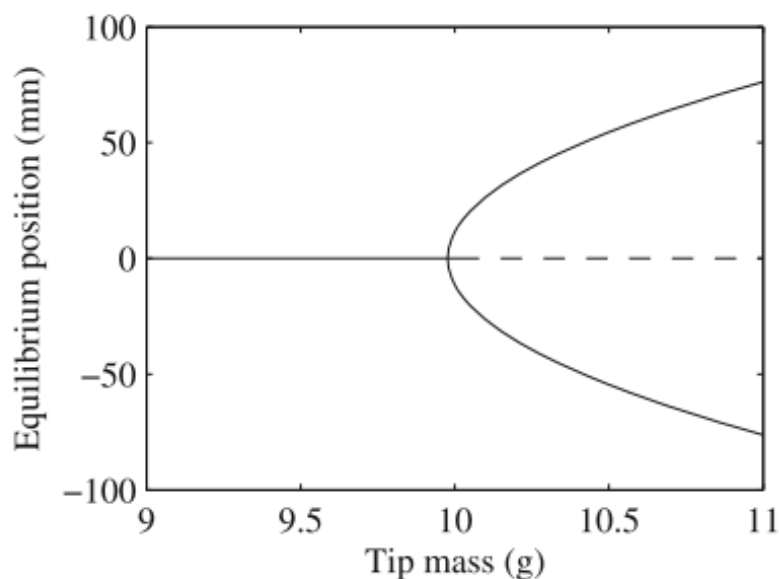
3.3 Realizace nelinearity pomocí tíhové síly

Další řešení [4] využívá pro vznik nelinearity tíhové síly. Nosník je orientován svisle, s vetknutím dole a na horním konci je umístěno závaží. Při vychýlení z osy začíná na závaží působit tíhová síla, která nemá lineární průběh.



Obr. 7: Využití působení tíhové síly pro realizaci nelinearity [4]

Obr. 8 ukazuje závislost rovnovážné polohy na velikosti závaží na konci nosníku. Při hmotnosti cca 10 g je tíhová síla už tak velká, že způsobí vznik dvou rovnovážných poloh, které se s rostoucí hmotností dále oddalují od středu. Článek se dále zabývá volným kmitáním takovéto soustavy.



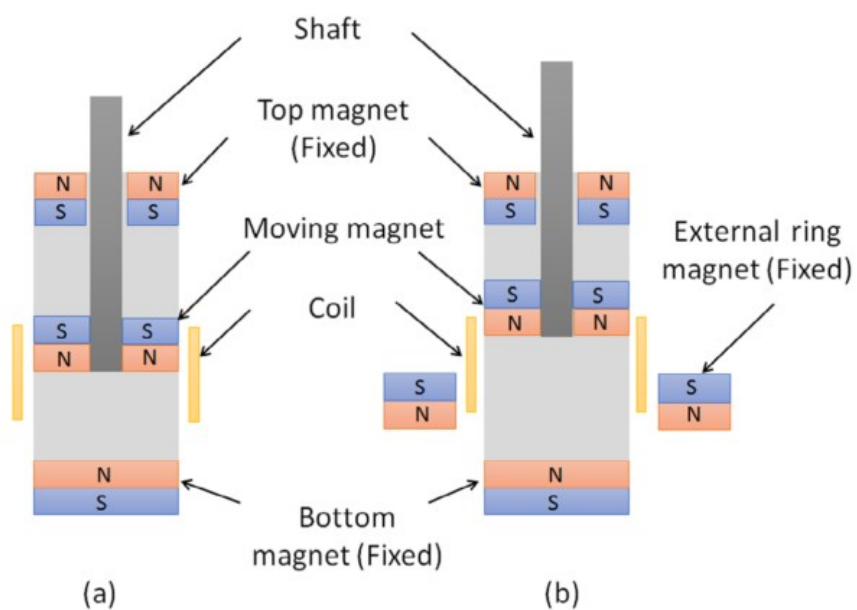
Obr. 8: Vznik a poloha 2 rovnovážných poloh v závislosti na přidaném závaží [4]

3.4 Realizace nelinearity pomocí přídavných magnetů

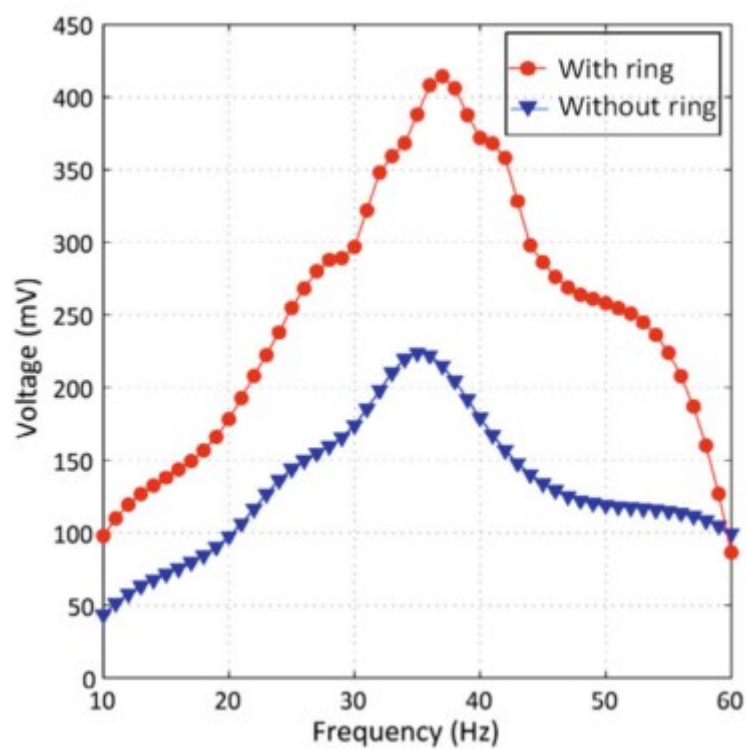
U elektromagnetických generátorů je realizace tuhosti za pomoci magnetů v podstatě samozřejmostí [5] a je tedy logickým krokem se za jejich pomoci pokusit vytvořit také nelineární tuhost. Řešení se objevují různá, avšak každé nahlíží na problém pouze úzce a neprovádí komplexní rozbor. Budou zde tedy ukázány alespoň nějaké přístupy a měření.

3.4.1 Přídavný magnet pro elektromagnetický generátor

Autoři publikace [6] porovnávají jejich stávající elektromagnetický generátor s verzí s přidaným magnetem. Obě verze generátoru jsou na Obr. 9. V tomto případě je už původní verze generátoru nelineární, protože koncepce odpuzujících se magnetů přináší vždy tvrdnoucí tuhost. Obr. 10 potom zobrazuje porovnání výstupního napětí obou verzí generátoru. Novější verze generátoru s magnetem poskytuje vyšší napětí prakticky v celém měřeném pásmu a přináší drobné změny v jeho průběhu. Lze tedy říci, že kombinace více magnetů přináší poměrně složité průběhy, které nejsou pro počáteční výzkum zcela vhodné.



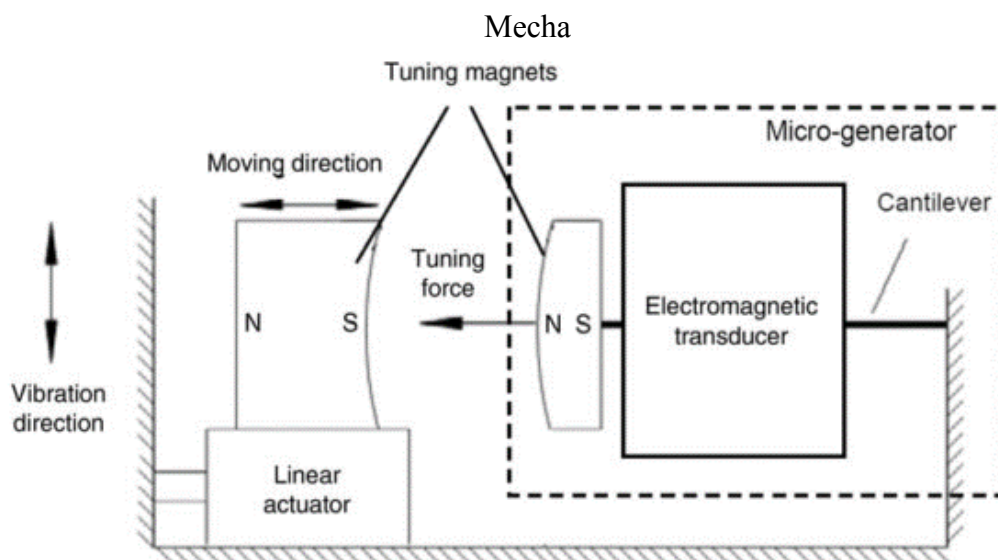
Obr. 9: Původní elektromagnetický generátoru (a) a verze s přidáním externím magnetem (b) [6]



Obr. 10: Srovnání výstupního napětí původního generátoru s generátorem doplněným o externí magnet [6]

3.4.2 Využití magnetu pro tvrdnoucí tuhost

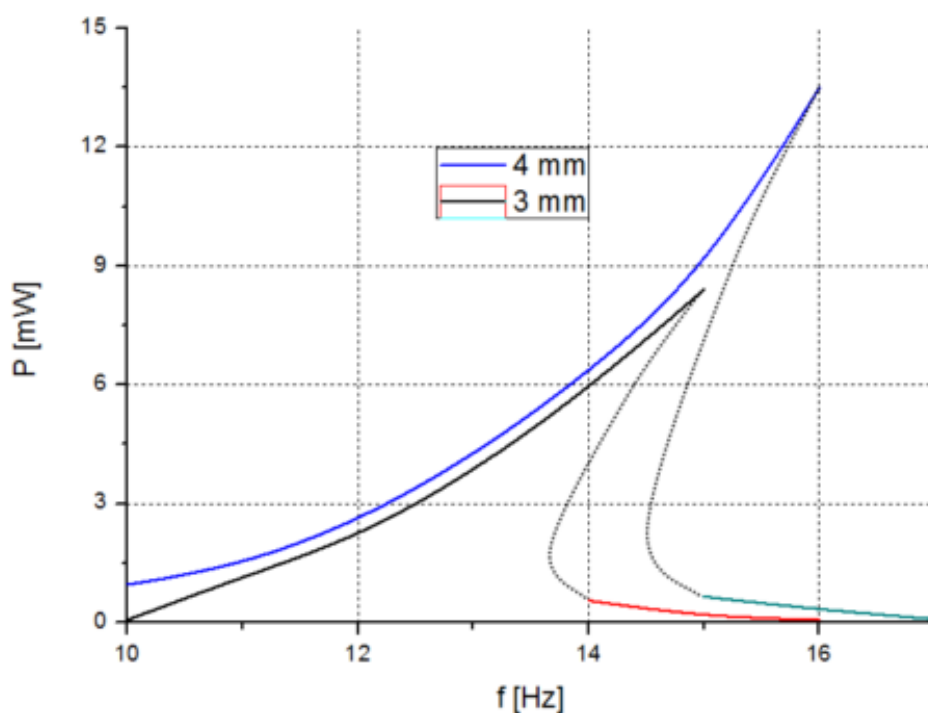
Článek [7] přináší energetický rozbor vibračního generátoru s přeladitelnou přidanou nelineární magnetickou tuhostí. Konceptu generátoru zobrazuje Obr. 11. Tuhost lze přeladovat změnou vzdálenosti mezi magnety. Článek se zabývá měřeními pro různou vzdálenost, tedy různou tuhost, a také různé buzení.



Obr. 11: Vibrační generátor s přidanou laditelnou nelineární tuhostí od magnetů [7]

Z Obr. 12 je patrný problém nelineárních generátorů, zmíněný v kap. 2, že pro zvýšení buzení se amplituda mění jen minimálně. Ke zvýšení amplitudy dochází pouze ve směru tvrdnoucí nebo měknoucí charakteristiky, tedy dochází vlastně pouze k rozšíření amplitudy.

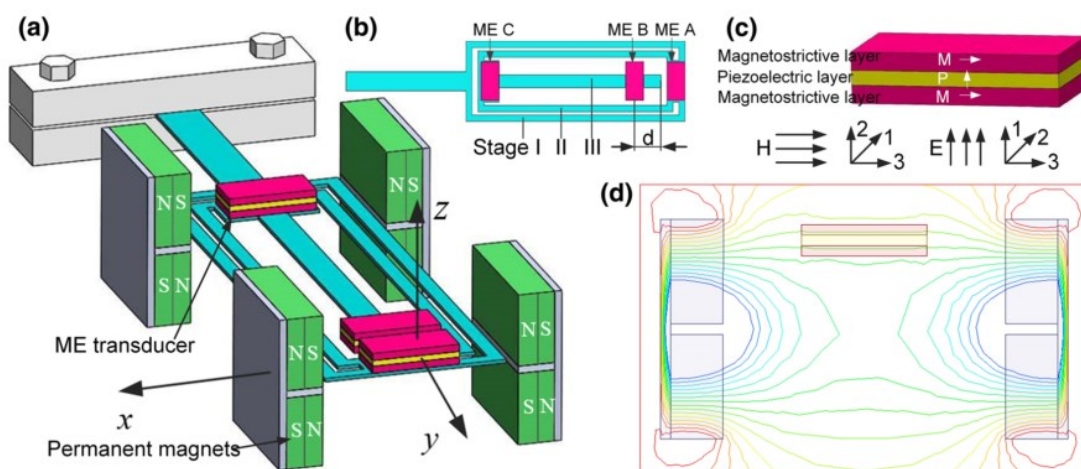
Lze tedy říci, že zatímco lineární generátor je omezen rezonanční frekvencí, mimo níž téměř nepoužitelný, nelineární generátor bude omezen maximální amplitudou, která se již při zvýšení buzení dále nezvýší. Tato situace je však výhodná, pokud je třeba generátorem napájet zařízení, u něž je znám maximální příkon, na který lze naladit generátor v širokém pásmu vibrací. Vzhledem ke sklonu křivky omezující výkon však ani tato úloha není snadná.



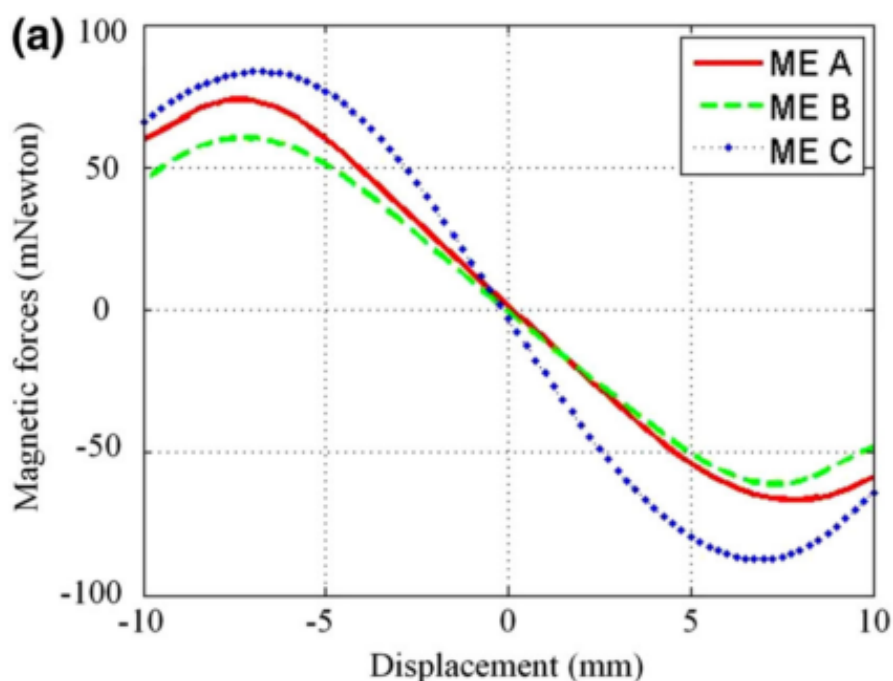
Obr. 12: Závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různé buzení [7]

3.4.3 Komplexní nelineární soustava piezonosníku s magnety

Autoři publikace [8] stvořili komplexní model piezonosníku s přípravou pro více magnetů, způsobujících přidanou nelinearitu. Z Obr. 13 je patrné, že se jedná o značně složitou soustavu, kde už piezonosník je speciálně vyroben pouze pro tento účel. Nejedná se o jednoduchý nosník, ale o poměrně složitou plošnou strukturu nosníku, určenou pro doplnění o magnety.



Obr. 13: Model piezogenerátoru s více stupni volnosti a přidanými magnety [8]

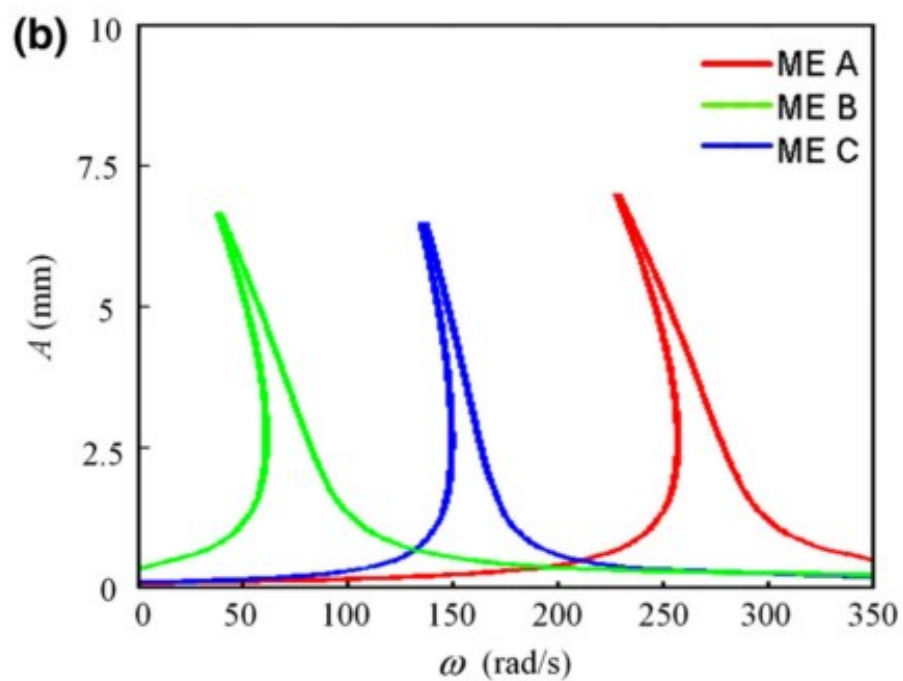


Obr. 14: Průběh síly od jednotlivých magnetů [8]

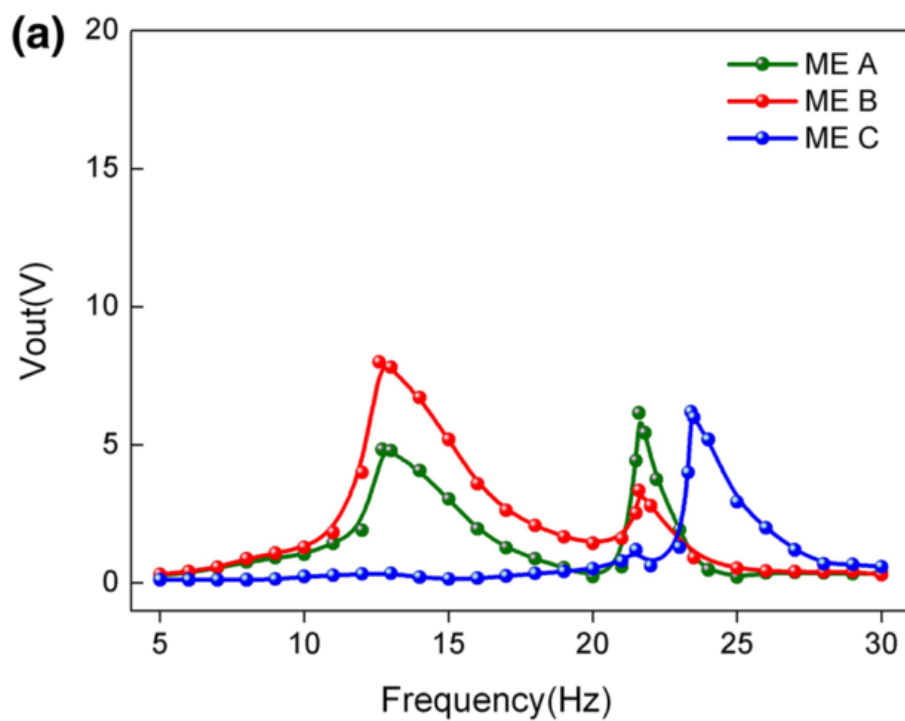
Obr. 14 ukazuje průběh síly od magnetů. Je vidět, že tuhost okolo středu je lineární, jednotlivé magnety jsou od sebe mírně rozladěny. Pro větší výchylky už se tuhost projevuje jako měknoucí. Výsledné chování generátoru ukazuje Obr. 15. V průběhu amplitudofrekvenční charakteristiky je vidět jak rozestupy mezi naladěním jednotlivých magnetů, tak zakřivení vlastních naladěních jednotlivých magnetů, způsobené měknoucí charakteristikou.

Nevýhodou takového generátoru je, že se vlastně jedná o 3 generátory, kdy každý je naladěn na jinou frekvenci, tedy vždy pro danou frekvenci je v chodu jeden generátor a ostatní jsou nevyužity. Vzhledem k distingované konstrukci nosníku se pro každou rezonanci promítne kmitání i do kanálu od jiného magnetu, než je v rezonanci. Měřené napětí na jednotlivých kanálech generátoru ukazuje Obr. 16, ze kterého je patrné, že pro první dvě rezonance je napětí vždy na dvou kanálech, na jednom vždy nižší, a pro třetí rezonanci už je napětí pouze na jednom kanále.

Jedná se o řešení velice komplikované a specifické, a zejména se tedy nehodí pro základní bádání v rozsahu diplomové práce.



Obr. 15: Amplitudofrekvenční charakteristika generátoru [8]



Obr. 16: Generované napětí z jednotlivých kanálů pro různé budící frekvence [8]

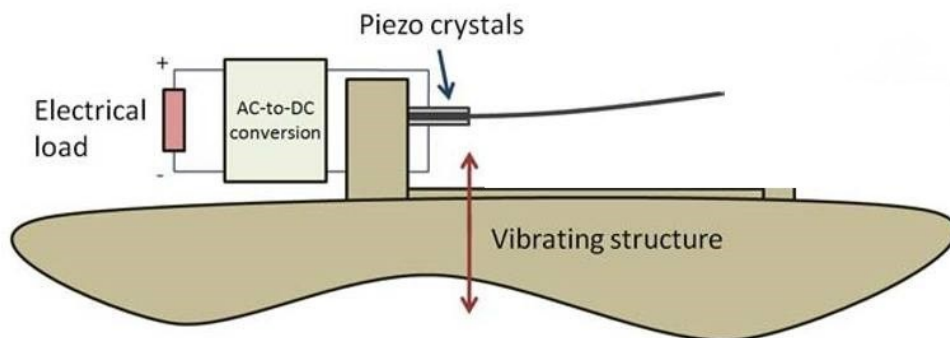
4 Volba vhodné koncepce nelineárního generátoru

Většina elektromagnetických generátorů má tuhost tvořenou magnety. Z analýzy možných přístupů k realizaci nelinearity v předchozí kapitole vyplývá, že vhodné řešení bude za pomoci přidavných magnetů. Kombinace dvou magnetických vazeb by značně komplikovala návrh. Proto je vhodné zvolit piezoelektrický generátor, který v základní konfiguraci sám o sobě má hmotnost a tuhost a tedy i vlastní frekvenci. K němu lze přidat jak kmitající hmotu, která sníží vlastní frekvenci a zvýší výstupní energii, tak především magnetickou vazbu, která způsobí nelineární průběh tuhosti a tedy značnou změnu polohy, ale především šířky rezonance.

4.1 Piezoelektrický vibrační generátor

První publikace, týkající se piezoelektrického jevu pochází z roku 1880 [9], kdy bratři Curieovi publikovali jev, kdy při stlačování krystalu měřili na jeho stranách napětí. Přesně tohoto principu využívá piezoelektrický generátor. Z deformace piezoelektrického materiálu generuje elektrickou energii.

Obvyklou koncepcí piezoelektrického generátoru je vetknutý nosník, který kmitá prvním tvarem ohybu. Takovýto generátor ukazuje Obr. 17, na kterém je také vidět příslušná elektronika a elektrická zátěž generátoru, které jsou pro celek velice důležité, avšak v rozsahu této práce není možné se jim blíže věnovat.



Obr. 17: Schéma piezoelektrického generátoru s elektrickou zátěží [10]

Piezoelektrický jev v takovémto nosníku popisují rovnice (2) a (3), převzaté z [11], kde k nim lze nalézt bližší rozbor. Stručně zde lze jmenovat členy rovnice, kdy S_1 je přetvoření, tedy ohyb nosníku, σ_1 je napětí v nosníku, E_3 je intenzita elektrického pole, D_3 je elektrická intenzita a další jsou materiálové konstanty nosníku.

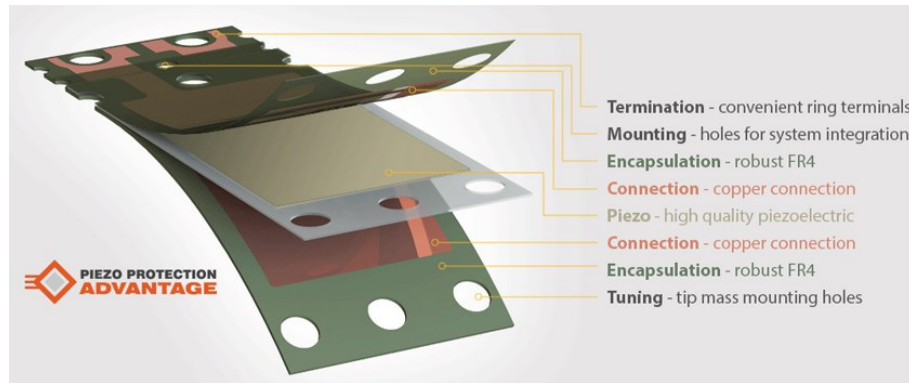
$$S_1 = s_{11}^E \cdot \sigma_1 + d_{31} \cdot E_3 \quad (2)$$

$$D_3 = d_{31} \cdot \sigma_1 + \varepsilon_{33} \cdot E_3 \quad (3)$$

Pomocí těchto rovnic lze popsat piezoelektrickou přeměnu energie. Pro kmitání nosníku platí standardní rovnice dynamiky, jak dále ukazuje rovnice (16).

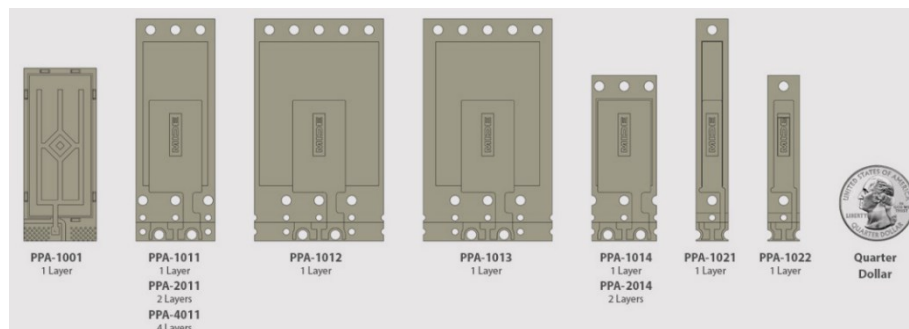
4.1.1 Dostupná komerční řešení

Dnes se dodáváním průmyslových generátorů zabývá řada firem. Nejčastěji se jedná o sendvičovou konstrukci nosníku, jak ji ukazuje Obr. 18. Na jedné straně je nosník vetknut a na druhé straně je volný, případně lze na volný konec umístit závaží, které zvýší energetický zisk a také se projeví do změny vlastní frekvence. Parametry takového nosníku jsou prakticky lineární a má tedy vždy jednu vlastní frekvenci s poměrně úzkou šířkou rezonance, jak je ukázáno v [12].



Obr. 18: Piezogenerátor ve formě nosníku od firmy Midé [12]

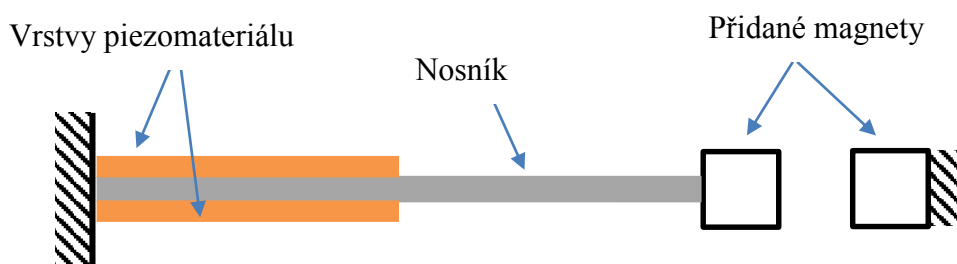
Výběr generátorů je v dnešní době široký. Obr. 19 ukazuje základní nabídku firmy Midé. Liší se velikosti, počet vrstev a tedy vlastní frekvence i množství generované energie. Vždy je však úzké pásmo rezonance, které je pro použití generátorů limitující a je tedy potřeba vyvinout přístupy a modifikace, které by rezonanci rozšířili.



Obr. 19: Přehled piezogenerátorů dodávaných firmou Midé [12]

4.2 Přidaná nelineární tuhost

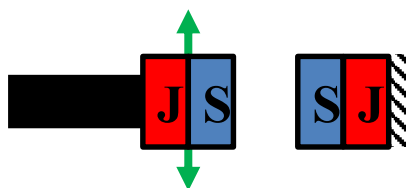
Jak již bylo naznačeno v úvodu kap. 4, přidaná tuhost bude realizována pomocí magnetické vazby. Logické umístění takové vazby je na konci nosníku, kde je největší výchylka (bere se v úvahu dominantní první tvar kmitu). Možné způsoby přidání magnetů vychází ze současných přístupů, viz kap. 3, vlastních zkušeností a jejich syntézy. Výstupem jsou určité topologie, které budou prezentovány dále, a na nichž stojí další kroky návrhu. Schéma celého nosníku s přidanými magnety ukazuje Obr. 20.



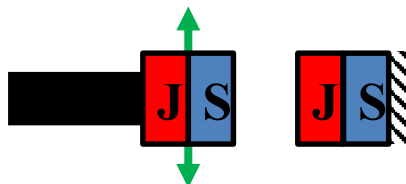
Obr. 20: Schéma generátoru s přidanými magnety

4.2.1 Topologie s použitím dvou magnetů

Kromě využití jednoho magnetu a feromagnetického protikusu, čímž se práce nezabývá, je nejjednodušší využít dva magnety, čelně se odpuzující, nebo přitahující. Takové postavení magnetů ukazují Obr. 21 a Obr. 22. Vznikají tak první dvě topologie, jejichž návrhem se bude dále zabývat kapitola 6.



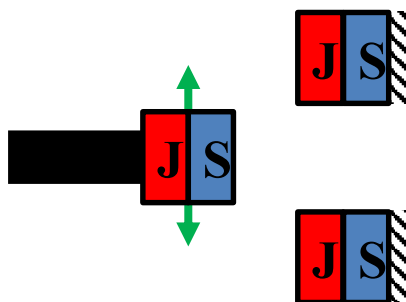
Obr. 21: Schéma topologie 1 – dva odpuzující se magnety



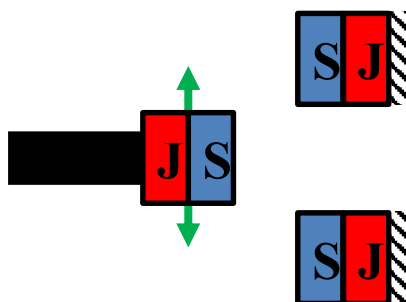
Obr. 22: Schéma topologie 2 – dva přitahující se magnety

4.2.2 Topologie s použitím tří magnetů

Dále lze využít tři magnetů. Takové topologie budou bezesporu komplikovanější, avšak lze očekávat větší možnosti v ladění průběhu tuhosti.



Obr. 23: Schéma topologie 3 – tři přitahující se magnety



Obr. 24: Schéma topologie 4 – tři odpuzující se magnety

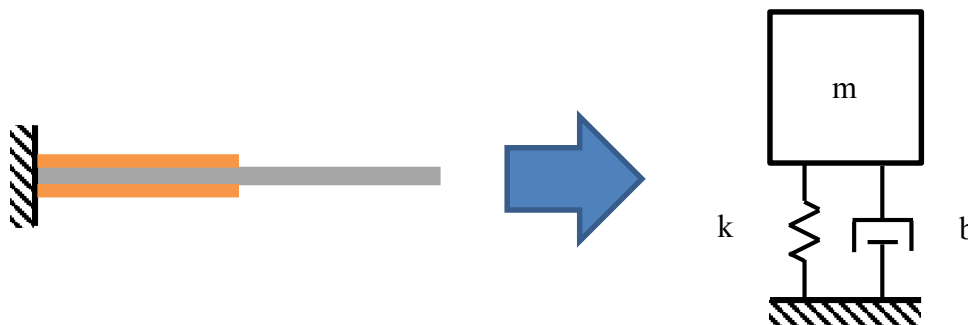
4.2.3 Omezení topologií

Uváděné topologie jsou pouze jakýmsi prvotním vodítkem a stojí na počátku V-cyklu. Z obecného postavení magnetů lze sice usuzovat určitý průběh síly, avšak konkrétní rozměrová realizace může průběh ovlivnit často více, než změna topologií.

Taktéž topologií by bylo možné vymýšlet celou řadu, přidávat magnety, či feromagnetické materiály, měnit úhel natočení a podobně. Současným cílem vývoje je však projít stručně první kroky V-cyklu a ukázat možnosti daného přístupu, ne dopodrobna probídat první krok, avšak nemít žádné informace o dalším průběhu. Tento přístup je ostatně jádrem mechatronického iteračního přístupu a přináší možnosti objevení vhodné synergie.

5 Určení parametrů generátoru Midé V21BL

Pro rozbor, simulace a experimenty byl použit komerčně vyráběný generátor Midé V21BL [13]. Pro další výpočty je třeba určit redukované parametry nosníku, tedy redukovanou hmotnost, tuhost a tlumení. Redukované parametry budou vztaženy k volnému konci nosníku, což bude vhodné pro další postup.



Obr. 25: Schéma redukce parametrů nosníku

5.1 Redukovaná hmotnost a tuhost nosníku

Výrobce u generátorů neuvádí fyzikální konstanty, avšak nabízí poměrně ucelenou tabulku chování generátoru pro různá dodatečná závaží, ze které lze určit redukovanou hmotnost a tuhost. Ty určíme ze dvou pracovních bodů, kdy známe přidanou hmotnost a vlastní frekvenci. Neznámé jsou dvě, a sice redukovaná hmotnost vlastního nosníku a redukovaná tuhost, které snadno určíme ze soustavy 2 rovnic o dvou neznámých. Rovnice je základní rovnice pro vlastní frekvenci [14]:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Upravená do vhodnějšího tvaru:

$$k = (2 \cdot \pi \cdot f_i)^2 \cdot m_i \quad (5)$$

Z tabulky výrobce zjistíme 2 vlastní frekvence pro 2 přidané hmotnosti a dosadíme do soustavy rovnic. Hmotnost vyjádříme jako redukovanou hmotnost nosníku plus přidanou hmotu.

$$k = (2 \cdot \pi \cdot 110)^2 \cdot m_0 \quad (6)$$

$$k = (2 \cdot \pi \cdot 40)^2 \cdot (m_0 + 4,8 \cdot 10^{-3}) \quad (7)$$

Z rovnic (6) a (7) určíme tuhost a vlastní redukovanou hmotnost nosníku:

$$k = 350 \text{ N/m} \quad (8)$$

$$m_0 = 0,7 \text{ g} \quad (9)$$

Pro vetknutý nosník se redukovaná tuhost obvykle pohybuje kolem 20 % hmotnosti. Tento nosník má hmotnost 3,5 g a redukovaná hmotnost tak vyšla přesně podle předpokladů.

Připomeňme zde znovu, že se jedná o zjednodušený model pro hrubé přiblížení. Model se vůbec nezabývá polohou těžiště nosníku s přidanou hmotou na konci, ani změnou průhybové čáry. Pro naše účely však toto zjednodušení stačí. Další zpřesnění a vliv tohoto zjednodušení budou ukázány dále.

5.2 Vlastní tlumení

Tlumení již výrobce neudává v žádné podobě. K jeho určení musí být tedy využito experimentu.

5.2.1 Popis experimentu

Postup je jednoduchý. Nosník se vychýlí z rovnovážné polohy a nechá volně kmitat. Z průběhu kmitů lze snadno určit tlumení. Měření výchylky je v případě piezoelektrického nosníku též snadné, jelikož napětí na prázdko je přímo úměrné napětí v nosníku [15] a tedy i deformaci [16]. Pro určení tlumení vyjdeme ze vztahu pro dozínání tlumených kmitů, kdy pro obálku kmitání platí [14]:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \quad (10)$$

Kde A je amplituda kmitu a δ poměrné tlumení. Pro dvě měření v čase $t = 0$ a v čase $t = t$, můžeme vztah upravit:

$$\frac{A_0}{A_t} = e^{\delta \cdot t} \quad (11)$$

Zlogaritmováním dostáváme:

$$\ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right) = \delta \cdot t \quad (12)$$

A odtud vyjádříme koeficient doznívání:

$$\delta = \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right) \quad (13)$$

Určení vlastního tlumení je tedy už snadné:

$$b = 2 \cdot m \cdot \delta = 2 \cdot m \cdot \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right) \quad (14)$$

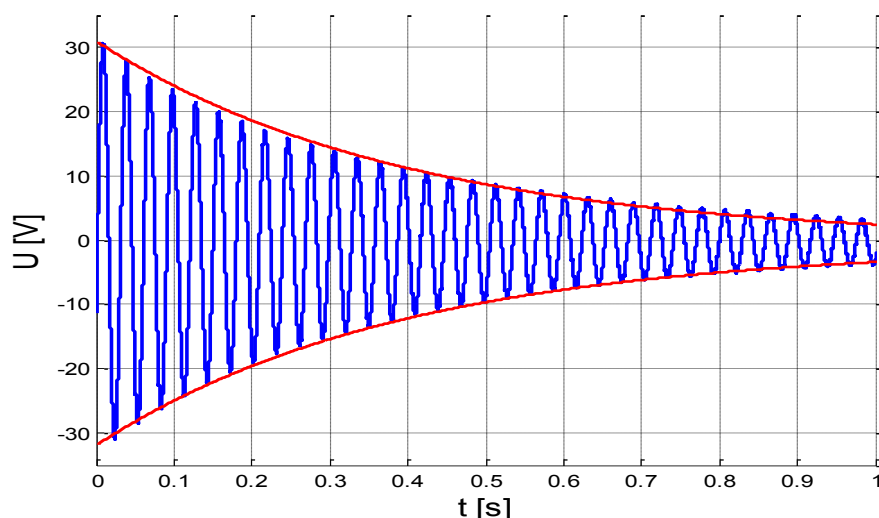
Kde b je tlumení a m hmotnost. Je tedy potřeba změřit amplitudu kmitu na začátku a na konci časového úseku o délce t .

5.2.2 Realizace experimentu

Průběh experimentu zobrazuje Obr. 26. Místo výchylky je zde měřené napětí, které však odpovídá výchylce, jak bylo vysvětleno v kap. 5.2.1. Časový úsek byl zvolen 0,5 s. Naměřené amplitudy byly na počátku $A_0 = 31 \text{ V}$ a na konci $A_t = 8 \text{ V}$. Přidaná hmotnost činila 4,8 g. Dosazením těchto hodnot do rovnice (14) získáme tlumení:

$$b = 2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{0,5} \cdot \ln\left(\frac{31}{8}\right) = 0,03 \text{ N/m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15)$$

Do Obr. 26 byla též vykreslena vypočítaná obálka kmitání z určeného tlumení, a tak lze pouhým pohledem ověřit správnost výpočtu tlumení. Z průběhu lze vidět drobné odchylky amplitud od vypočtené obálky. To může být způsobenou slabou nelinearitou, nebo i drobnými budícími vibracemi, jelikož měření probíhalo na obyčejném stole a mohlo se tedy promítnout buzení například od větráků okolních počítačů, nebo i jiných zdrojů vibrací na celém patře.



Obr. 26: Průběh tlumeného kmitání nosníku s vykreslenou obálkou.

5.3 Zjednodušený model generátoru bez zátěže

Tímto postupem byly získány parametry pro zjednodušený model generátoru bez zátěže, jako ho zobrazuje Obr. 25 Tento model je lineární, s jedním stupněm volnosti, a je popsán lineární diferenciální rovnicí prvního řádu [14]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = Q(t) \quad (16)$$

Kde m (17) je hmotnost skládající se z redukované hmotnosti samotného nosníku a přidané hmotnosti,

$$m = m_0 + m_{\text{přidaná}}, \quad \text{kde } m_0 = 0,7g \quad (17)$$

b (18) je vnitřní tlumení nosníku

$$b = 0,03 \text{ N/m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (18)$$

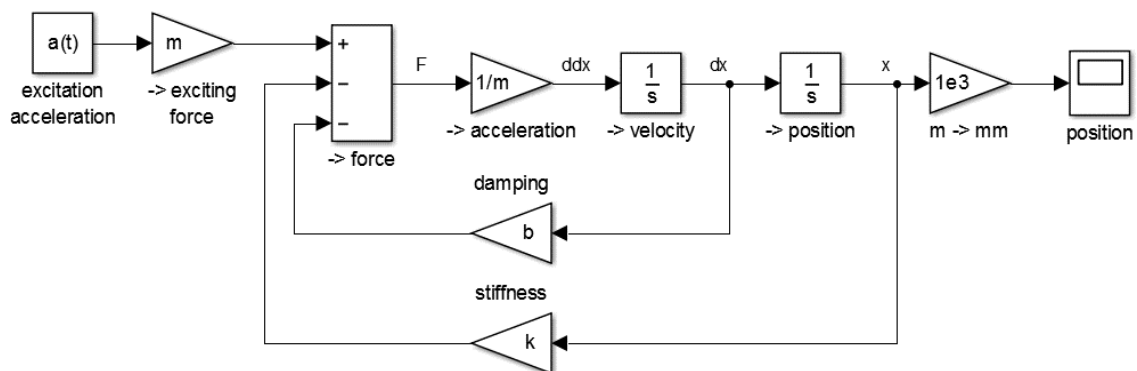
a k (19) je redukovaná tuhost.

$$k = 350 \text{ N/m} \quad (19)$$

Pravá strana představuje buzení. V případě vibračního generátoru je buzení výhradně vibracemi, jak již název napovídá, a jedná se tedy o kinematické buzení. Pravá strana tam bude mít tvar:

$$Q(t) = m \cdot a(t) \quad (20)$$

Kde m je opět hmotnost (17) a $a(t)$ je budící zrychlení vibrací základny, na které je generátor upevněn. Obr. 27 ukazuje tento model v prostředí Simulink. Jedná se vlastně o grafickou interpretaci rovnice (16). V tomto prostředí je tato rovnice počítána numericky s jemným výpočetním krokem, čehož bude dále využito.



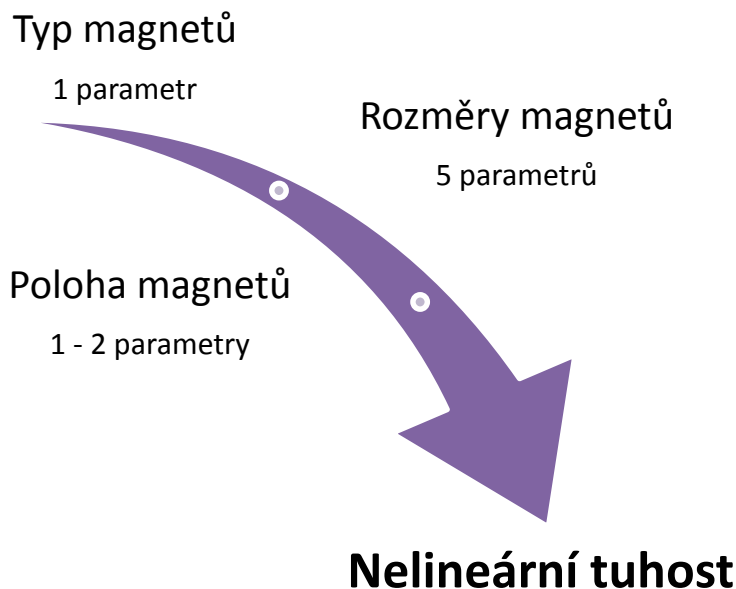
Obr. 27: Linearizovaný model generátoru v programu Simulink.

6 Návrh magnetů pro nelineární tuhost

V kapitole 5. byly určeny parametry generátoru, s nimiž se chová lineárně a s nimiž je v současnosti využíván. Následujícím krokem je navrhnout magnetický obvod tak, aby ke stávajícím parametrům přidala nelineární tuhost, která zlepší chování generátoru. Jedná se o úlohu principiálně velmi komplikovanou, jelikož má mnoho volitelných parametrů a není jednoznačný požadavek na výsledné chování.

Zadání lze specifikovat tak, že chceme pomocí magnetů dosáhnout vhodné nelinearity, která zlepší chování generátoru. Můžeme volit rozměry a typ magnetů a jejich polohu, jak to zobrazuje Obr. 28.

Aby byl problém uchopitelný, je třeba si stanovit nějaké body, ze kterých bude návrh vycházet. Prvním bodem je využití topologií z kap. 4.2, které nám dávají vstupní předpoklady pro geometrii. Dalším bodem je zjednodušení řešení na planární úlohu, tedy v simulacích budeme zanedbávat průběh magnetického pole podél hloubky magnetu. Taktéž pohyb konce nosníku uvažujeme jako přímočarý, protože výchylku jsou vzhledem k délce nosníku malé. Co se týče rozměrů a materiálu magnetu, je zde omezení dodávanými modely. Pro sériovou výrobu by nebyl problém vyrábět magnety libovolných rozměrů a z libovolného materiálu, avšak pro první experimenty by se jednalo o zbytečně nákladnou záležitost. Požadavek na výstup návrhu magnetů však není vůbec jednoznačný. Je tedy třeba návrh provést s určitým inženýrským citem a s výsledky dále pracovat a analyzovat je.



Obr. 28: Zobrazení procesu návrhu magnetů pro nelineární tuhost

6.1 Volba standardně dostupných magnetů

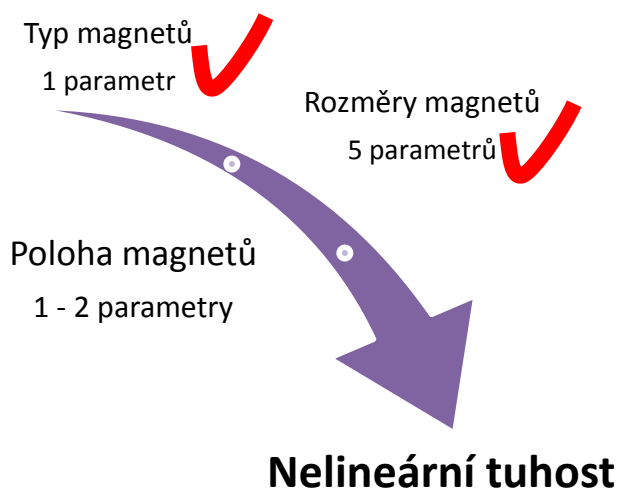
Následující kapitoly se budou zabývat konkrétním návrhem parametrů a výsledkem výpočtu pro jednotlivé topologie. Uvedme zde však ještě jeden krok návrhu, který se zabývá volbou vhodných dodávaných magnetů. Tento krok je vhodné spojit ze dvou důvodů:

1. Omezením pro rozměr magnetů bude poměrně malá maximální výchylka nosníku, která je shodná pro všechny topologie.
2. Rovněž je vhodné pracovat s jedním typem magnetů kvůli snadné realizaci experimentálních modelů.

Zásadním parametrem je tedy maximální výchylka nosníku. Ta je $\pm 2,3$ mm. Bylo by vhodné, aby magnet nebyl větší než tato výchylka, abychom v rozsahu kmitu využili co nejvíce změny magnetického pole. Zespodu je omezení dáno pouze tím, jak se bude z magnetem pracovat. Z toho důvodu není vhodné volit rozměry menší než 2 mm. V neposlední řadě je také vhodná co největší délka magnetu, abychom nemuseli skládat více magnetů za sebe. Zároveň všechny tyto parametry budou ovlivňovat průběh nelinearity, takže není vyloučeno, že takováto volba nebude vhodná. Identifikace této situace je však možná pouze s využitím V-cyklu. Z úvodních znalostí vhodnosti rozměrů a jejich aplikaci na nabídku dodavatele [17], vyšel jako vhodný magnet pro první fázi návrhu magnet VMM4-N30 o rozměrech 2x2x10 mm.

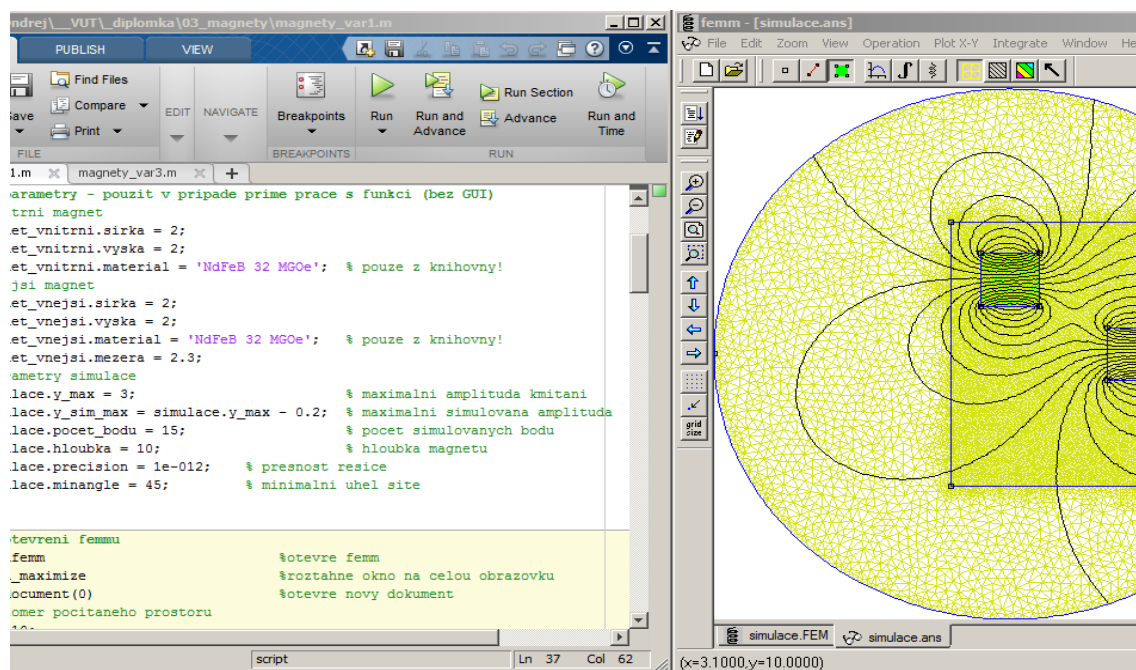
6.2 Výpočet nelineárních tuhostí

Nyní lze provést MKP výpočet pro zjištění síly od magnetů, pro dané rozměry a různé vzdálenosti magnetů, v jednotlivých topologiích. Jedná se o sestupný proces ve V-cyklu, jak to zobrazuje Obr. 29.



Obr. 29: Postup návrhu ve V-cyklu

Pro magnetické výpočty je využito softwaru FEMM ovládaného z prostředí MATLAB jednoduchým obslužným skriptem, který dle nastavení spouští magnetický výpočet pro dané magnety v jednotlivých polohách kmitu a výstupem je diskretizovaný průběh síly v závislosti na výchylce nosníku.



Obr. 30: Magnetický výpočet v programu FEMM spouštěný z programu MATLAB.

Jednoduše takto lze zvolit parametry a provést výpočet průběhu síly v kmitu, tedy v závislosti na výchylce. Problém však tkví právě ve volbě parametrů. Obr. 29 ukazuje, že jako měnitelný parametr zůstala už pouze poloha magnetů, která dle topologie zahrnuje jeden až dva číselné parametry.

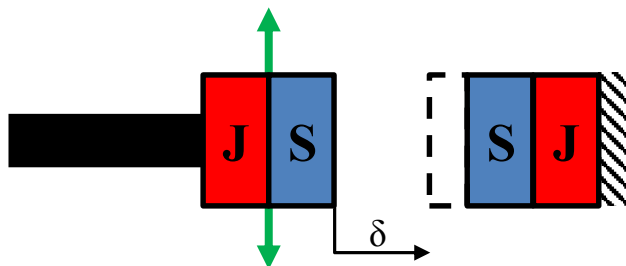
V případě jednoho parametru tedy stačí provést několik simulací s pozměněným parametrem a sledovat jeho vliv. V případě dvou parametrů je třeba měnit oba parametry a udělat si nad jejich vlivem určitý nadhled, jelikož jejich vliv se projevuje na složité křivce a tak ho nelze jednoduše vystihnout ani zobrazit do jednoho grafu.

Na tomto místě se taktéž hodí připomenout, že pohyb konce nosníku uvažujeme lineární, a tak v simulacích budeme uvažovat pouze pohyb kolmo na osu magnetů, tedy ve směru zelených šipek na příslušných schématech. Ve skutečnosti bychom museli pro určení polohy magnetu využít průhybové čáry nosníku, což je postup velice pracný – museli bychom uvažovat posunutí ve dvou osách a natočení – a navíc platný pouze pro nosník bez připojené elektrické zátěže, která působí přídavnou deformaci v oblasti elektrod. Jak bylo řečeno výše, vzhledem k malým výchylkám toto zanedbáváme, a uvažujeme pouze pohyb v jedné ose.

V grafech bude vždy zobrazena tuhost samotného nosníku F_{pruz} , přídavné silové působení magnetu F_{mag} a výsledná síla F_{vys} .

6.2.1 Magnety pro topologii 1

První topologie dvou odpuzujících se magnetů má měnitelný jeden parametr a lze tedy provést sadu výpočtů, zobrazit vypočtené průběhy sil přes sebe do grafu a sledovat jejich změnu v závislosti na vzdálenosti magnetů δ , jak to ukazuje Obr. 31



Obr. 31: Změna parametru δ v topologii 1

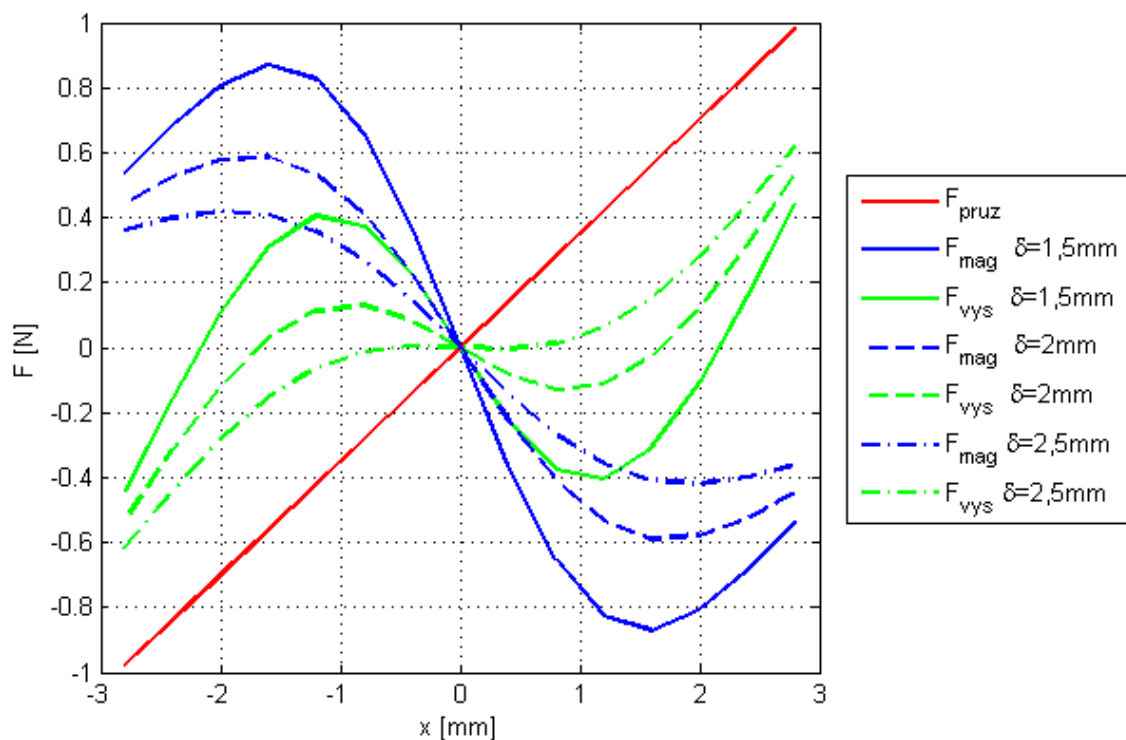
Výsledné průběhy síly zobrazuje Obr. 32. Samotná magnetická síla se se zvyšující se vzdáleností snižuje a její maximum se lehce posouvá směrem k vyšším výchylkám. Mnohem zajímavější je však sledovat průběh součtu síly od pružiny a magnetu. Větší vzdálenost magnetů má totiž za následek posun rovnovážné polohy směrem ke středu.

Pro vzdálenost magnetů 1,5 mm je rovnovážná poloha vzdálena od středu o více než 2 mm, a tak je takováto koncepce zcela nemožná, protože by došlo k porušení nosníku při velké výchylce, kterou výrobce omezuje na 2,3 mm.

Naopak pro vzdálenost magnetů 2,5 mm už je rovnovážná poloha pouze jedna ve středu. Magnety v této konfiguraci způsobí pouze změknutí tuhosti v okolí středu, a tak je výsledná součtová tuhost tuhnoucí, avšak bez 2 rovnovážných poloh.

Pro vzdálenost magnetů 2 mm leží rovnovážná poloha cca 1,5 mm od středu, což je přijatelná hodnota. Z průběhu je také vidět, že tuhost okolo této rovnovážné polohy není symetrická. Zatímco pro větší výchylky směrem od středu je tuhnoucí, pro výchylky směrem do středu je měknoucí. Chování takto naladěného oscilátoru bude tedy nejspíše velice chaotické (samozřejmě v deterministickém slova smyslu), popis takového oscilátoru není matematicky téměř vůbec možný a jeho numerickým popisem se stále nezabývá mnoho vědců.

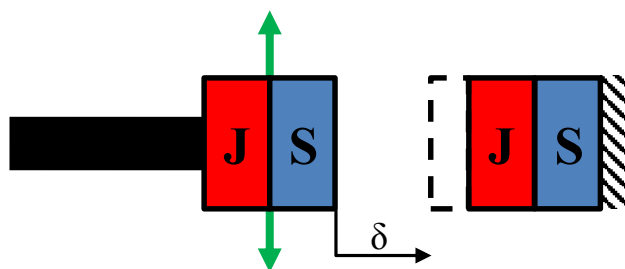
Můžeme si také povšimnout, že čím více jsou oddalovány magnety, tím rychleji se blíží rovnovážné polohy ke středu a tím nižší je tuhost směrem ke středu. Realizace rovnovážných poloh blíže středu je tak prakticky velice obtížná, protože je značně citlivá na vzdálenost magnetů. Proto by bylo vhodné pro případné přiblížení rovnovážných poloh zvolit užší magnet, čímž by také bylo možné dosáhnout vyšší tuhosti směrem do středu. Takový požadavek může vyjít ze závěru V-cyklu a bylo by úkolem dalšího průchodu cyklem volit užší magnetu a dále projít stejným postupem návrhu, jako je popsáno v této práci.



Obr. 32: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 1, pro různé parametry δ

6.2.2 Magnety pro topologii 2

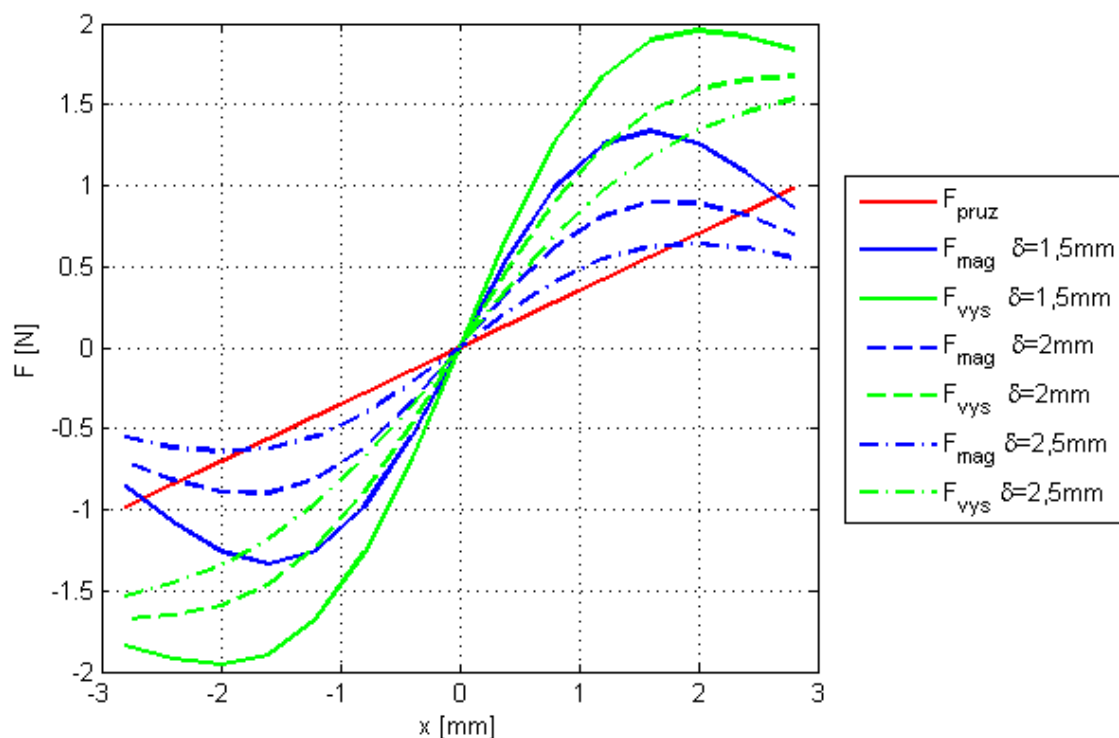
Pro dva přitahující se magnety je postup zcela shodný s kap. 6.2.1. Situaci zobrazuje Obr. 33



Obr. 33: Změna parametru δ v topologii 2

Na Obr. 34 lze opět spatřit průběhy sil. Stejně jako pro dva odpuzující se magnety, tak i pro dva přitahující se magnety síla se vzdáleností magnetů klesá a její maximum se posunuje směrem od středu. V součtu síla vytváří měknoucí tuhost. Menší vzdálenost magnetů způsobuje více měknoucí charakter. Tento případ je tedy velice snadno

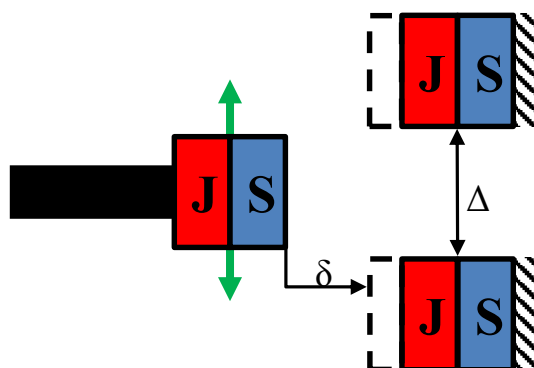
uchopitelný a snadno laditelný. Přináší však také prostou symetrickou měknoucí charakteristiku s jednou rovnovážnou polohou.



Obr. 34: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 2, pro různé parametry δ

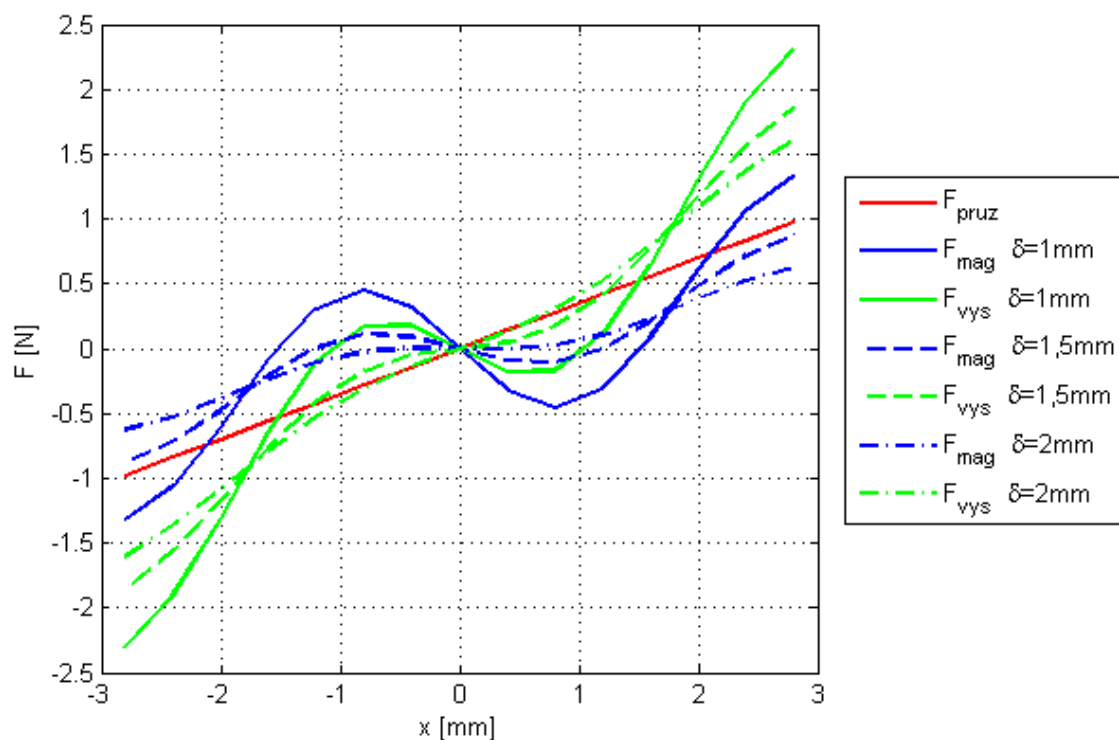
6.2.3 Magnety pro topologii 3

Pro tři magnety jsou již parametry dva. Stejně jako v předchozím je to vzdálenost čela vnitřního magnetu od čel vnějších magnetů δ , avšak přibyla vzdálenost vnějších magnetů od sebe Δ , viz Obr. 35. Je tedy potřeba udělat větší množství simulací, a ty porovnat. 3D graf se jeví jako poměrně nepřehledný, a proto je třeba zvolit jiný přístup, a sice provést simulace jako v předchozím, ovšem třikrát pro různý rozestup magnetů.



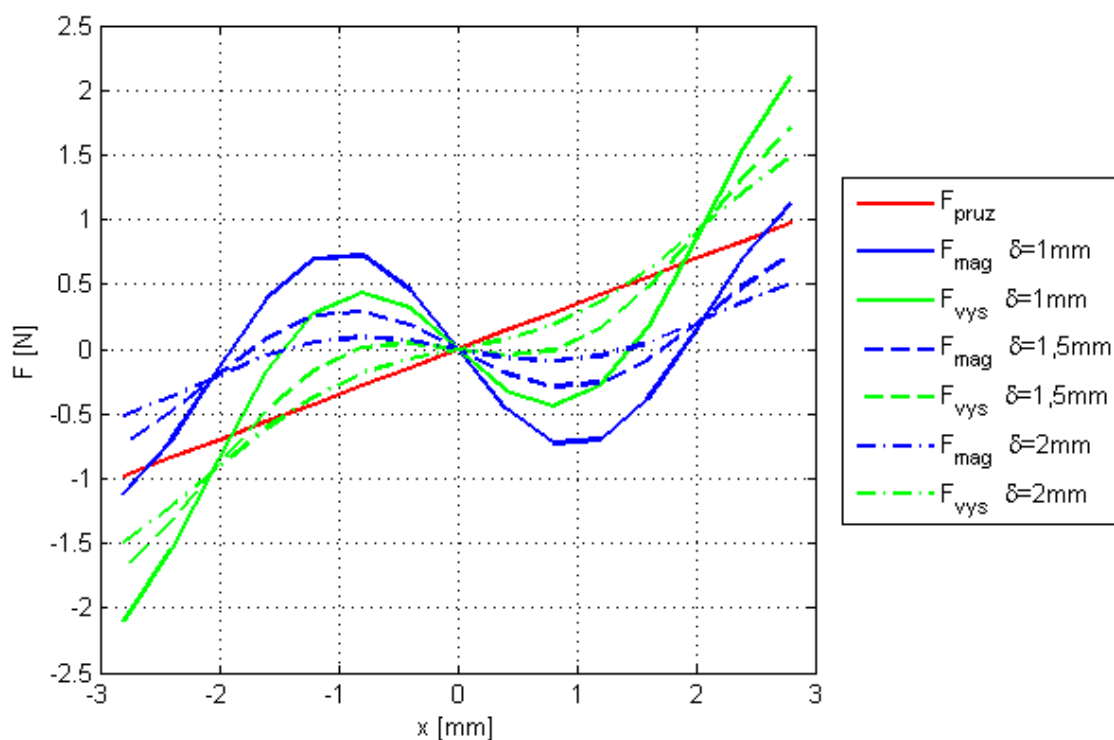
Obr. 35: Změna parametrů δ a Δ v topologii 3

V jednom grafu jsou tedy porovnány průběhy pro různou vzdálenost magnetů δ a jeden daný rozestup mezi vnějšími magnety Δ . Rozsah parametrů byl zvolen $\delta = 1; 1,5; 2$ mm a $\Delta = 1,5; 2; 2,5$ mm.



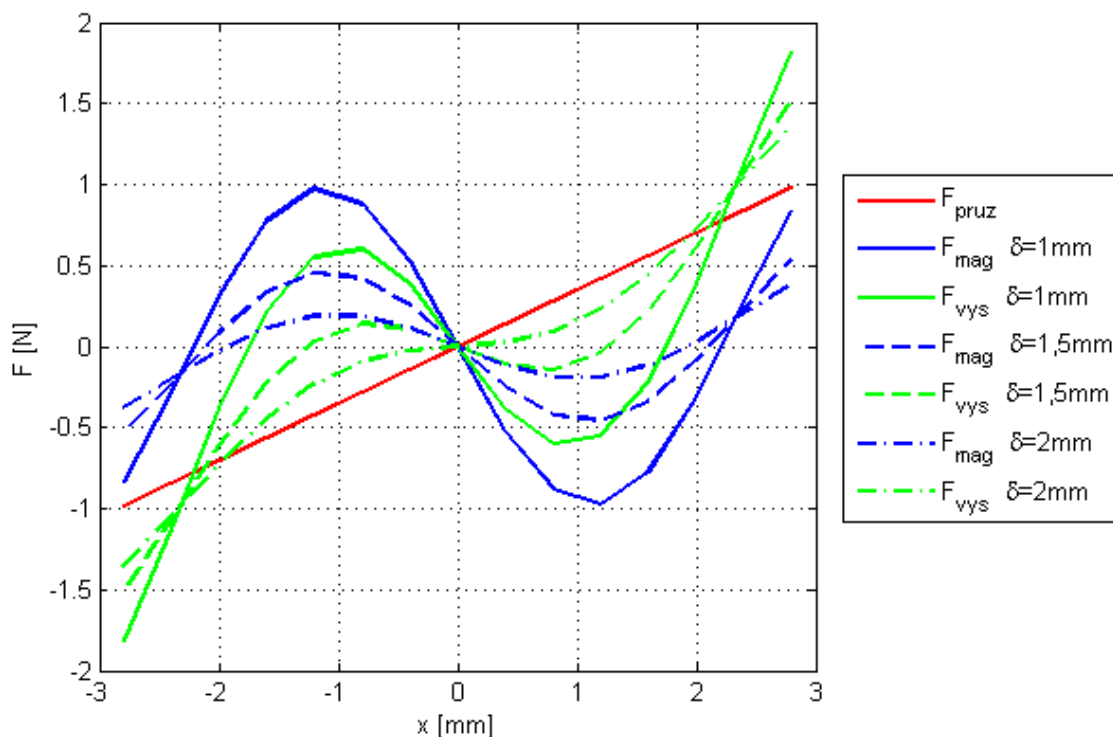
Obr. 36: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 1,5$ mm a pro různé parametry δ

Z Obr. 36 je patrné, že pro daný rozestup Δ existuje bod, kdy je síla od magnetu stejná pro různé vzdálenosti δ , avšak ne nulová. S přibližováním vnitřního magnetu k vnějším se síla v tomto bodě nemění, avšak v ostatních bodech je vliv magnetů silnější. Výsledná sečtená síla je pro větší vzdálenosti s jednou rovnovážnou polohou, tvrdnoucí, a pro menší vzdálenost už jsou zde rovnovážné polohy dvě. Chování je tedy velice podobné, jak pro topologii 1, viz kap. 6.2.1, ovšem v tomto případě je síla oproti topologii 1 vyšší než síla samotného nosníku.



Obr. 37: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 2\text{ mm}$ a pro různé parametry δ

Obr. 37 ukazuje průběhy pro větší rozestup mezi vnějšími magnety. Průběh síly je „roztážen“ a kolem středu je síla vyšší. Vysvětlení je prosté – pro menší rozestup byla síla v okolí středu snižována působením druhého vnějšího magnetu.



Obr. 38: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 2,5 \text{ mm}$ a pro různé parametry δ

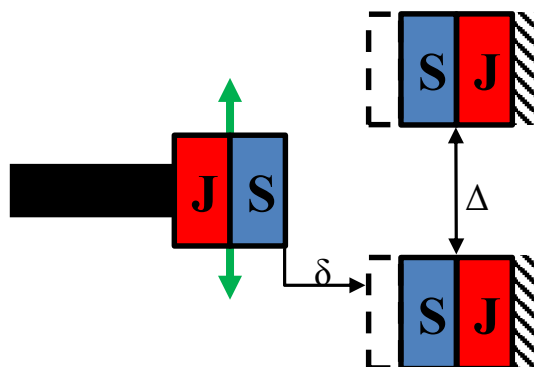
Na Obr. 38 vidíme průběhy pro ještě větší rozestup mezi vnějšími magnety a trend je stejný jako v předchozím případě – „rozšíření“ průběhu a zvětšení okolo středu. Zároveň zde opět nastává problém s rovnovážnou polohou příliš blízkou maximální výchylce nosníku, kdy by hrozilo poškození.

Konkrétní volba parametrů by záležela na požadovaném chování. V této fázi vývoje nejsou požadavky úzce specifikované, a proto by byl návrh do jisté míry nemožný. Pro tuto topologii by bylo nutné projít celý V-cykus pro zvolenou polohu magnetů, analyzovat chování a dále činit úpravy v návrhu. Jako vhodné parametry pro další výpočty, simulace a experimenty se jeví rozestup mezi magnety $\Delta = 2 \text{ mm}$ a $\delta = 1 \text{ mm}$.

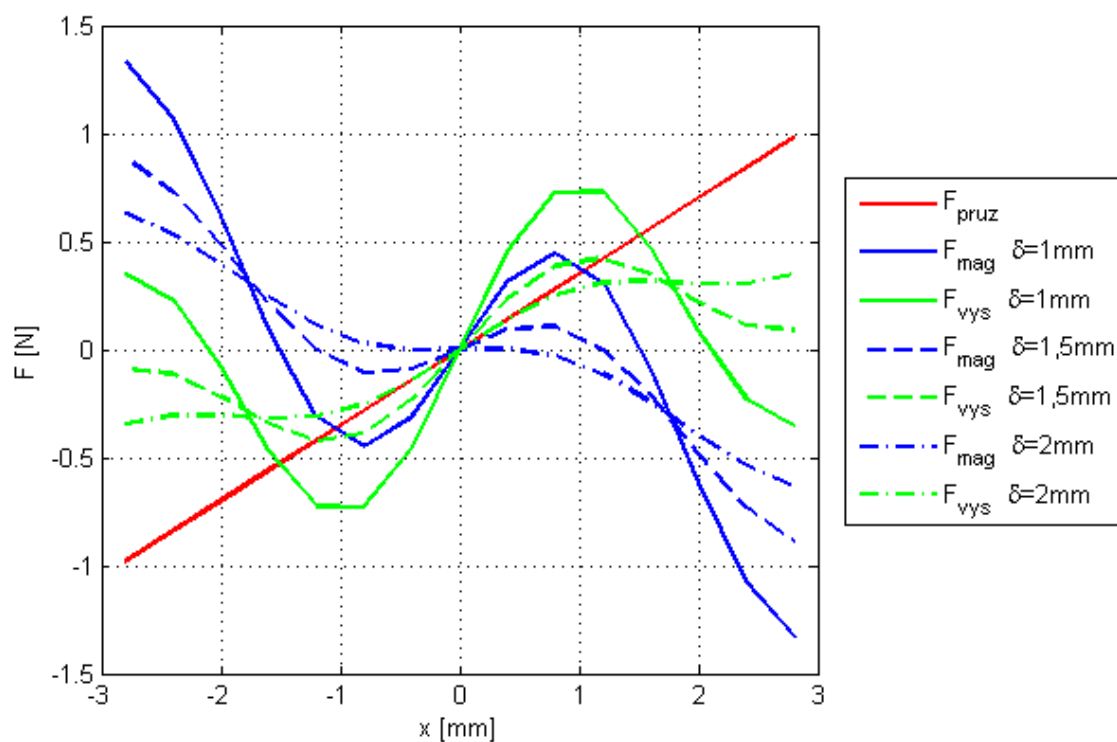
Dále si lze povšimnout, že tato topologie přináší téměř shodné výsledky s topologií 1 a je tedy vhodné se zabývat spíše topologií 1, která má pouze dva magnety, a tedy 1 parametr. Takováto konstrukce by byla jednak jednodušší, jednak lehčí a také návrh by byl vzhledem k jedinému parametru snazší. Topologie s třemi přitahujícími magnety však může být vhodná k využití v dalších fázích návrhu, kdy budou blíže specifikovány požadavky na průběh magnetické síly, a kdy mohou tři magnety přinést více možností k tvarování průběhu než magnety dva. Toto však může ukázat až další vývoj.

6.2.4 Magnety pro topologii 4

Množství a typ parametrů se shodný s topologií 3 a postup magnetických výpočtů bude tedy stejný. Postavení magnetů ukazuje Obr. 39.



Obr. 39: Změna parametrů δ a Δ v topologii 4



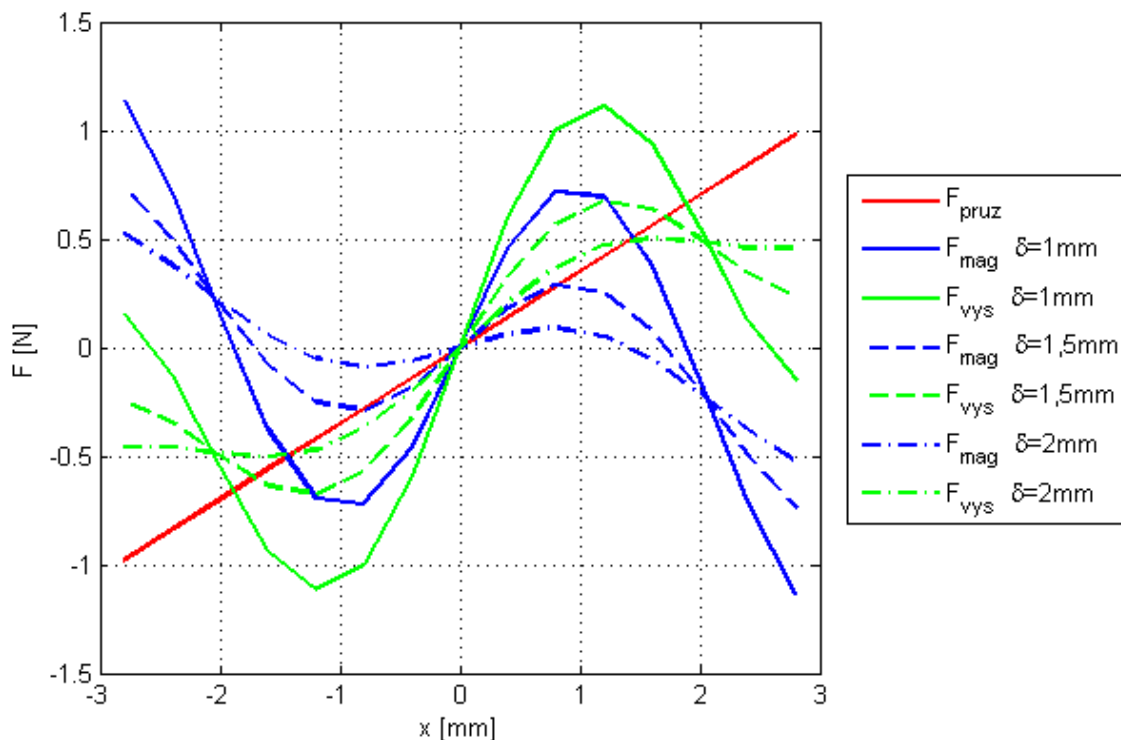
Obr. 40: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 1,5 \text{ mm}$ a pro různé parametry δ

Z Obr. 40 je patrné, že rovnovážná poloha uprostřed má ve svém okolí měknoucí charakteristiku. Dále průběh pokračuje zápornou tuhostí s nestabilní rovnovážnou polohou. Následující průběh lze předpokládat kladnou tuhost a další rovnovážnou polohu, tentokrát stabilní, která však leží mimo výpočetní rozsah.

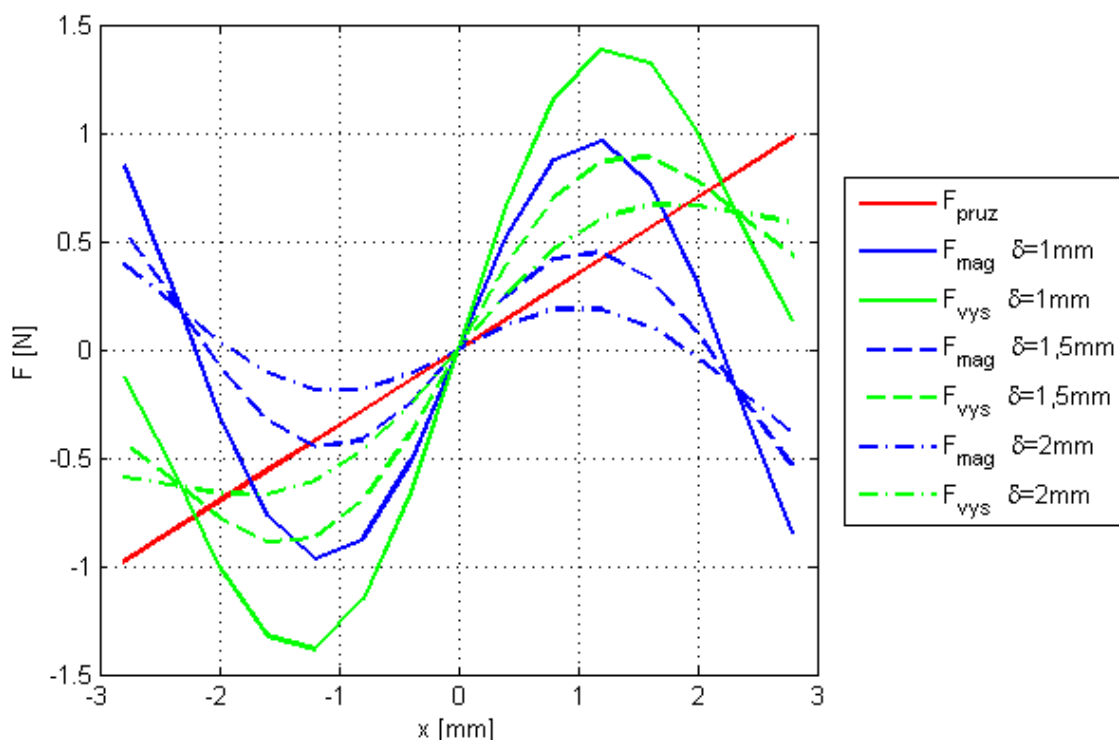
Pro daný parametr $\Delta = 1,5$ mm existuje opět vzdálenost od středu, kde je neměnní se nenulová síla. S klesající vzdáleností vnitřního magnetu od magnetů vnějších roste magnetická síla. Pro největší simulovanou vzdálenost $\delta = 2$ mm je charakteristika pouze silně měknoucí. Pro menší vzdálenosti je zde již záporná tuhost, která by vedla k destrukci nosníku.

Podobný průběh lze pozorovat i pro parametry $\Delta = 2$ mm na Obr. 41 a $\Delta = 2,5$ mm na Obr. 42. Stejně jako v případě tří přitahujících se magnetů se průběh roztahuje do šířky. Lze takto tedy získat z využitelného opět pouze měknoucí charakteristiku.

Další snižování rozestupu mezi magnety by vedlo pouze k degeneraci na případ dvou odpuzujících se magnetů. Pro přiblížení stabilních rovnovážných poloh do středu by tedy bylo zapotřebí volit užší magnety.



Obr. 41: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 2$ mm a pro různé parametry δ



Obr. 42: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 2,5 \text{ mm}$ a pro různé parametry δ

6.3 Určení vhodných magnetů pro další postup návrhu

Z předchozích kapitol vychází topologie se třemi magnety jako poměrně složité a s nejistým přínosem. Jejich nasazení by bylo možné při hlubším zkoumání, avšak pro prvotní přiblížení se jeví jako zbytečné.

Topologie se dvěma magnety jsou naproti tomu jednoduché existencí pouze jednoho parametru, svými průběhy tuhosti i snadnou realizovatelností. Pro další postup se jeví ideální topologie 1, která přináší dvě stabilní neutrální polohy a velice různorodý průběh tuhosti v jejich okolí. Topologie 2 se dvěma přitahujícími se magnety je taktéž snadně realizovatelná a laditelná, avšak nepřináší tak zajímavé průběhy jako v případě magnetů odpuzujících se. Další postup tedy bude prováděn s topologií 1, pro kterou je volný pouze jeden parametr.

7 Simulace generátoru Midé V21BL s přidanou nelineární tuhostí bez zátěže

Z kap 6 vyplynul typ magnetů a topologie jejich postavení pro realizaci nelineární tuhosti. Zůstal jediný volný parametr δ , tj. vzdálenost magnetů. Dále je třeba zkoumat chování generátoru s touto přidanou nelineární tuhostí bez zátěže, tedy simulování nosníku s přidanými magnety.

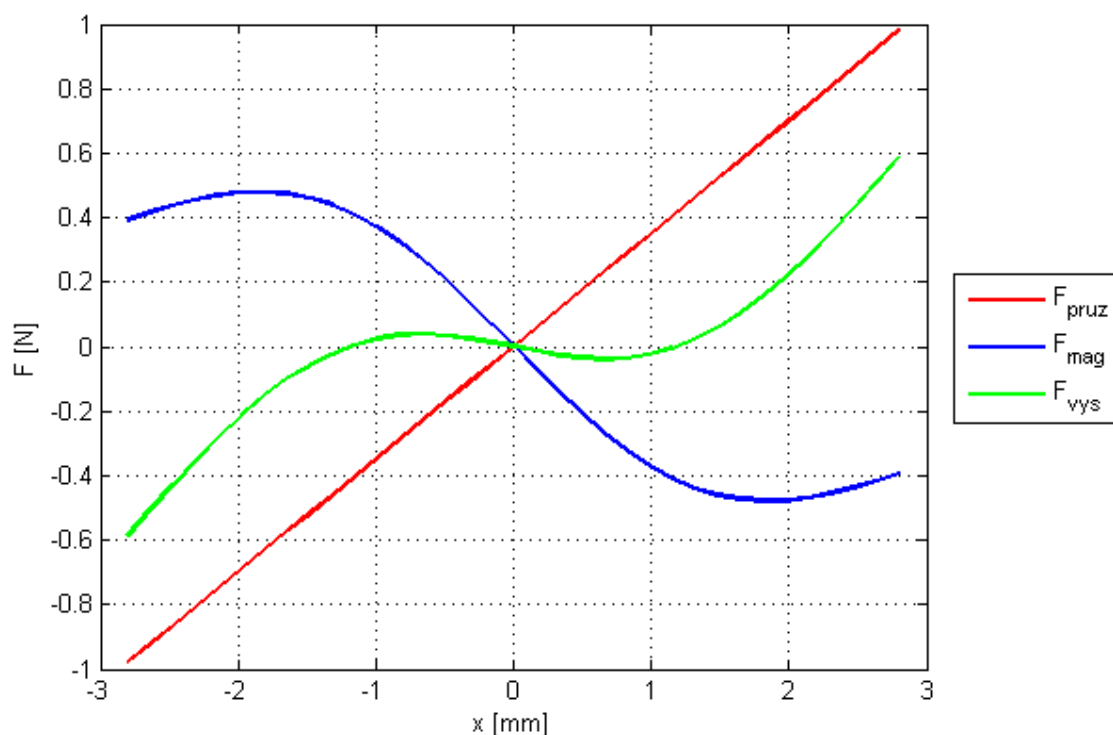
Nabízí se několik simulačních experimentů. Prvním je buzení konstantní amplitudou s měnící se frekvencí, takzvaný přejezd, z něhož obdržíme amplitudo-frekvenční charakteristiku. Vzhledem ke dvěma rovnovážným polohám, mezi kterými jsou očekávány chaotické překmity, je otázka jak amplitudu určovat, aby měla vypovídající charakter. Jednoduše můžeme místo amplitudy polohy vykreslovat amplitudu rychlosti, čímž se situace velmi zjednoduší, případně vykreslovat celý průběh výchylky, nejen její obálku. Dále by bylo možné buzení rázy, konstantní frekvencí s přidaným šumem a mnohé další.

7.1 Zvolená nelinearita pro simulace

Simulace by mohly být prováděny pro různé nelinearity, což by však přineslo obrovské množství výsledků, které by překročili rozsah práce. Je tedy třeba zvolit jednu nelinearitu, pro kterou budou prováděny simulace i experiment. Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, topologie byla určena a zůstal pouze parametr δ , tj. vzdálenost magnetů. I tento parametr bude tedy pro simulace určen pevně a nebude dále měněn. Výzkum vlivu změny tohoto parametru na chování generátoru je sám o sobě velice rozsáhlé téma.

Vhodná hodnota parametru není známá a její určení opět závisí na určitém citu a nadhledu nad problematikou. Lze říci, že by byl vhodný takový parametr, který by zajistil poměrně blízce položené 2 stabilní polohy, avšak s dostatečnou rezervou od jejich splnutí v jedinou polohu. Dlouhé simulace a ladění ukázaly, že vhodným parametrem může být $\delta = 2,3$ mm, jehož výsledný vliv ukazuje Obr. 43. Rovnovážné polohy vidíme cca 1 mm od středu, což je necelá polovina maximální výchylky a síla kolem středu je stále ještě dostatečná, aby nedošlo ke sklouznutí k jediné rovnovážné poloze uprostřed.

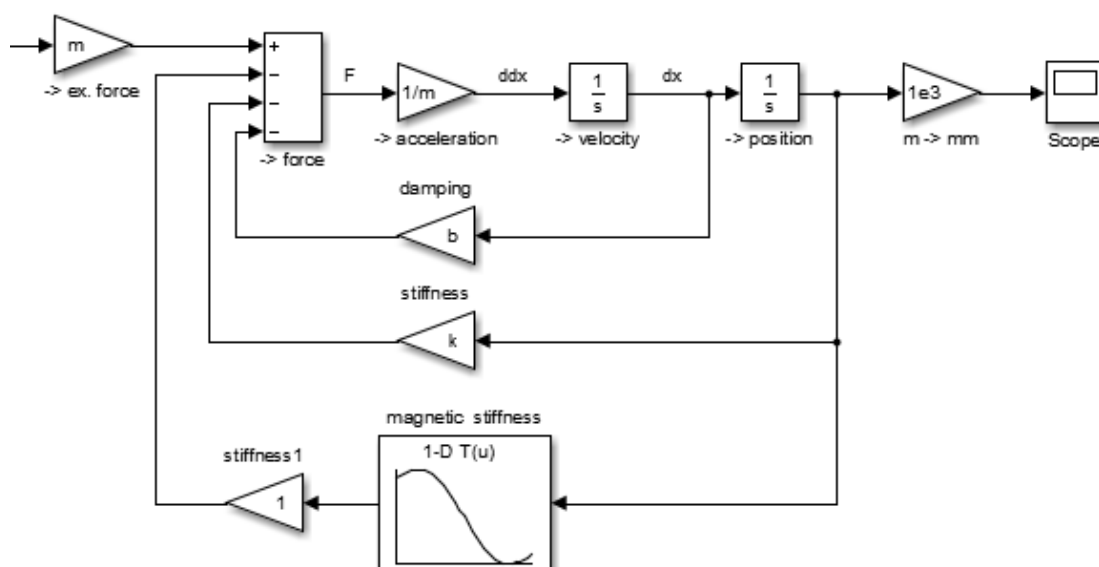
Další simulace generátoru budou dále využívat této nelinearity, která se nebude dále měnit. Parametr δ a příslušný průběh síly se tedy stávají pro tuto práci neměnné a jejich vliv na chování je možným předmětem dalšího výzkumu.



Obr. 43: Průběh síly od magnetů pro parametr $\delta = 2,3$ mm, který byl zvolen pro další simulace chování generátoru.

7.2 Model nosníku s přidanou nelineární tuhostí

Model z kap. 5.3 lze snadno doplnit o nelineární tuhost od přídavných magnetů pomocí tabulky, do které jsou vloženy body z magnetické simulace. Vznikne tak jednoduchý model generátoru bez zátěže s přidanou nelineární tuhostí, který lze využít pro simulace generátoru naprázdno, tedy pro pochopení základních vlivů nelinearity na kmitání. Doplněný model zobrazuje Obr. 44.



Obr. 44: Model nosníku s doplněnou nelineární tuhostí od magnetů

7.3 Výsledky simulací

Pro simulace byly zvoleny frekvenční přejezdy se zobrazením průběhu výchylky v čase.

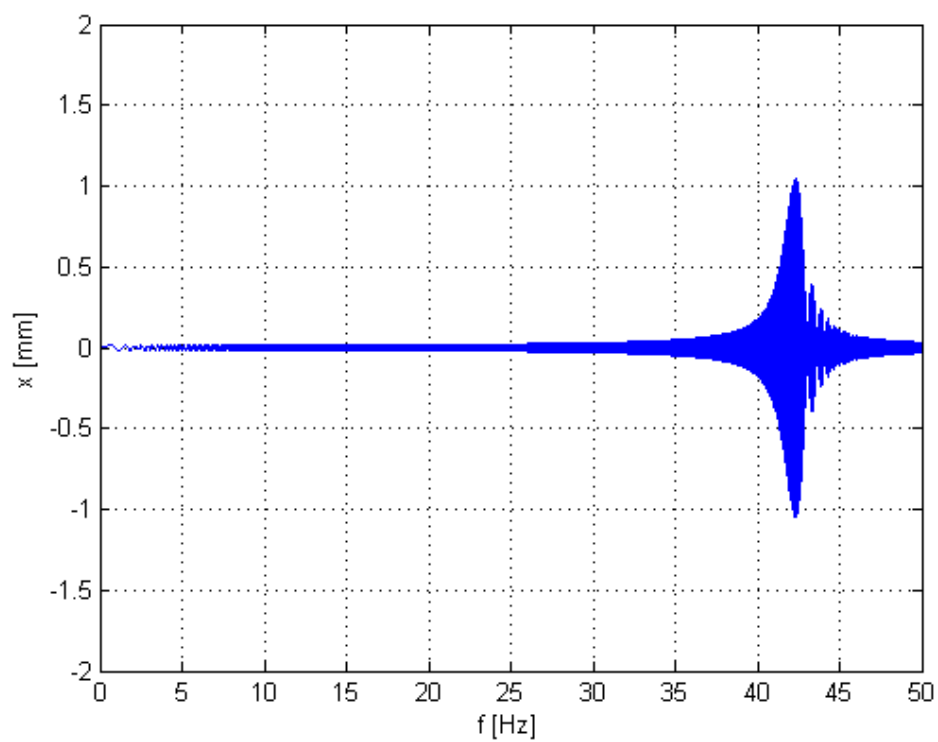
7.3.1 Změna amplitudy buzení

První simulace se zabývaly srovnáním pro neměnnou rychlost přejezdu $1 \text{ Hz} / 1 \text{ s}$, v rozmezí frekvencí $0 - 50 \text{ Hz}$ a proměnnou amplitudu buzení. Následující grafy zobrazují průběhy výchylky v čase.

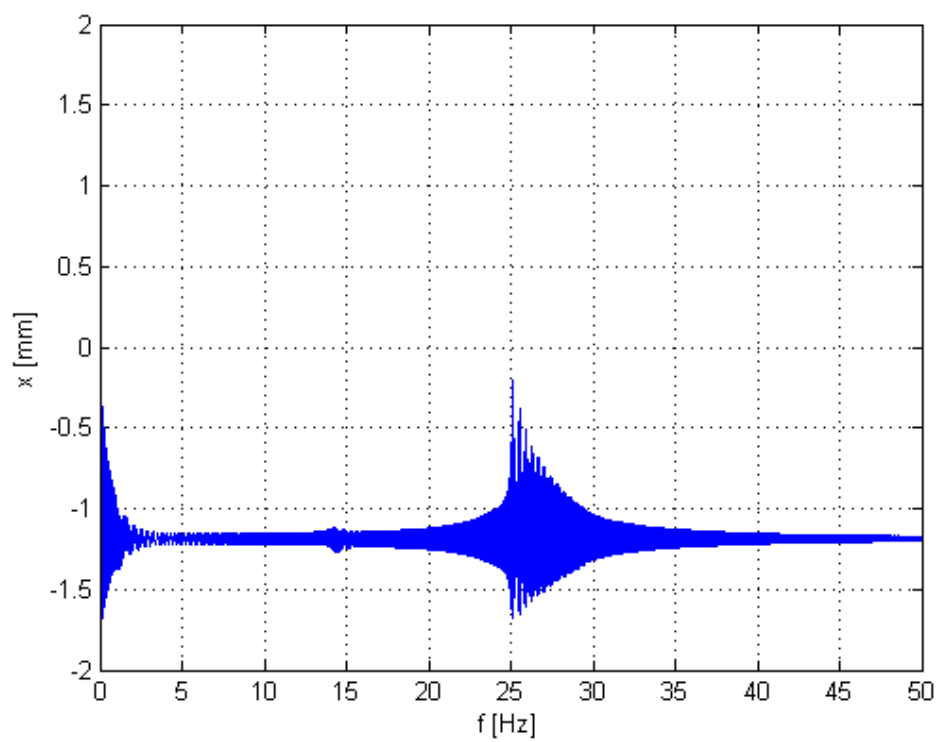
Obr. 45 a Obr. 46 porovnávají chování generátoru bez a s přidanou nelineární tuhostí. V první řadě je vidět, že přidaná nelineární tuhost způsobila rovnovážnou polohu mimo střed a také snížení vlastní frekvence. Amplituda kmitání v rezonanci je nižší, avšak šířka rezonance je výrazně vyšší, což je požadovaný efekt.

Na Obr. 47 a Obr. 48 vidíme, že při zvýšení budící amplitudy, dochází již k přeskmitávání do druhé stabilní polohy a ke kmitání mezi stabilními polohami. Amplituda je tedy vysoká a dále bude zásadní provést energetickou analýzu.

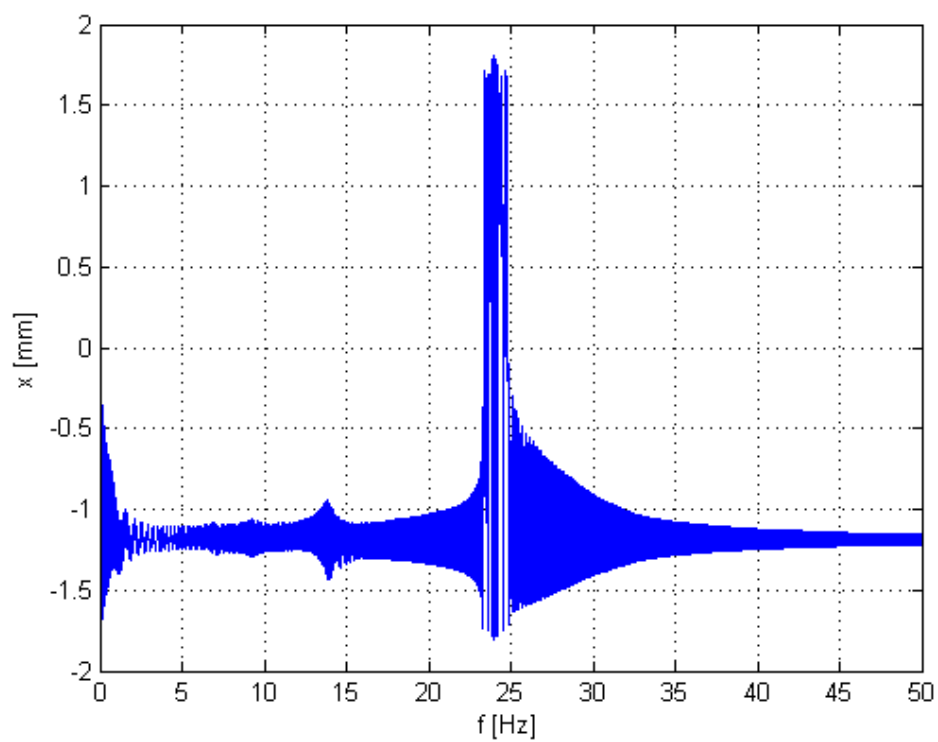
Při dalším zvyšování budící amplitudy již dojde k pravidelnému kmitání mezi stabilními polohami a dostáváme tímto způsobem velké výchylky v širokém pásmu. Obr. 49 ukazuje tuto rozšířenou rezonanci, která je ve srovnání s lineárním generátorem na Obr. 50 nejen nesrovnatelně širší, ale má dokonce i větší amplitudu. Důvod lze hledat svým způsobem v tom, že kolem středu nepůsobí síla, která by pohyb brzdila, ta působí až na konci, kde tvoří rezonanční vazbu. Důležité bude dále energetické srovnání. Důležité je ještě poznamenat, že kmitání při nejvyšším buzení je pouze modelové, jelikož by při něm došlo k destrukci nosníku.



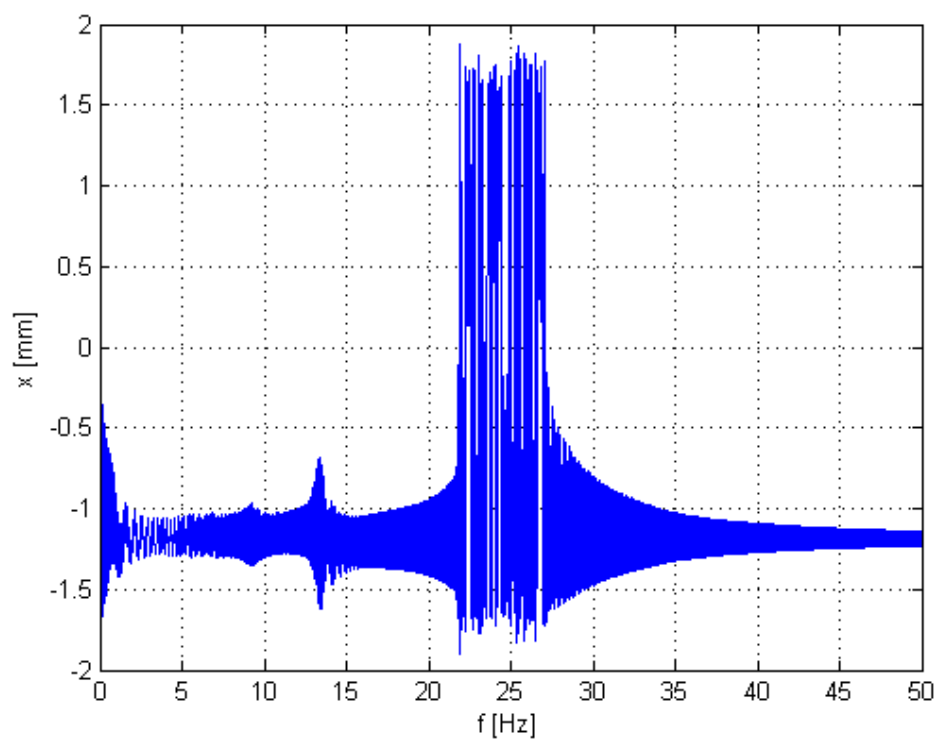
Obr. 45: Průběh výchylky při buzení 0,1 g bez přidané nelinearity



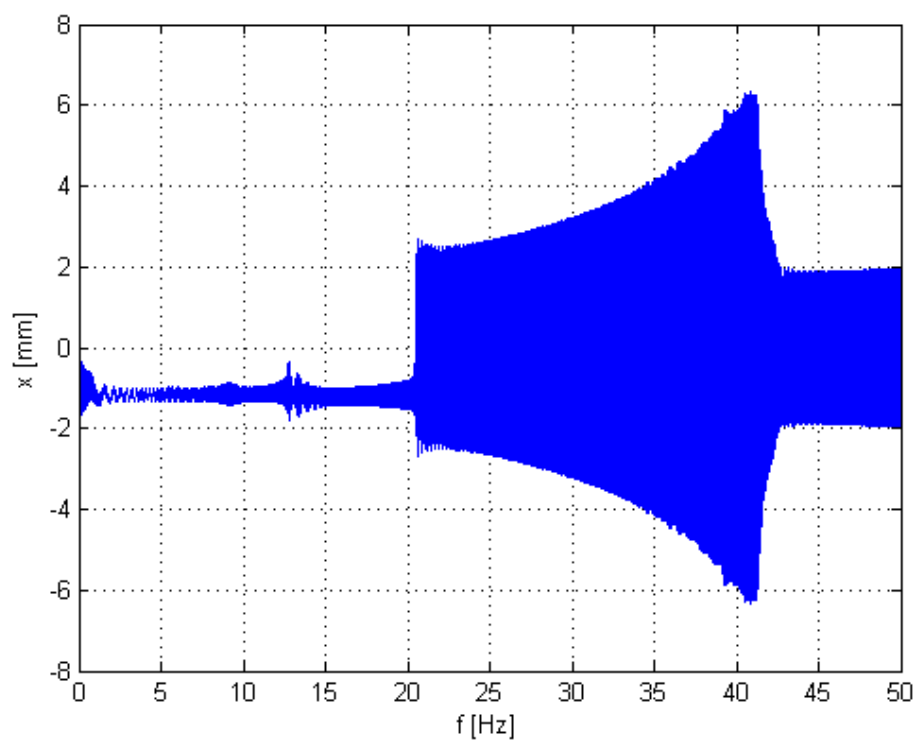
Obr. 46: Průběh výchylky při buzení 0,1 g s přidanou nelinearitou



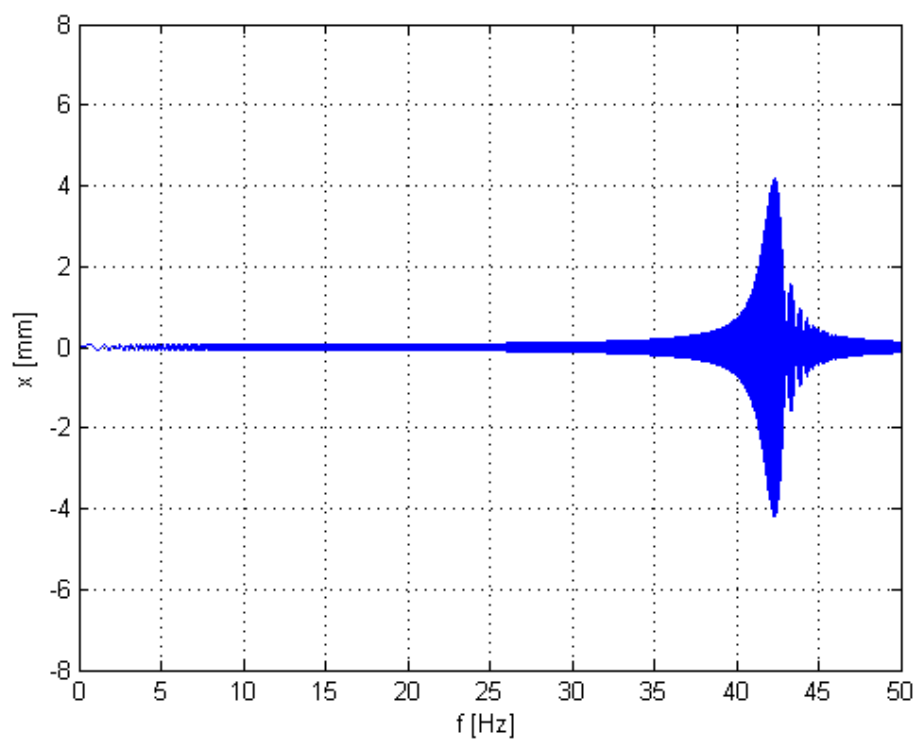
Obr. 47: Průběh výchylky při buzení 0,2 g s přidanou nelinearitou



Obr. 48: Průběh výchylky při buzení 0,3 g s přidanou nelinearitou



Obr. 49: Průběh výchylky při buzení 0,4 g s přidanou nelinearitou

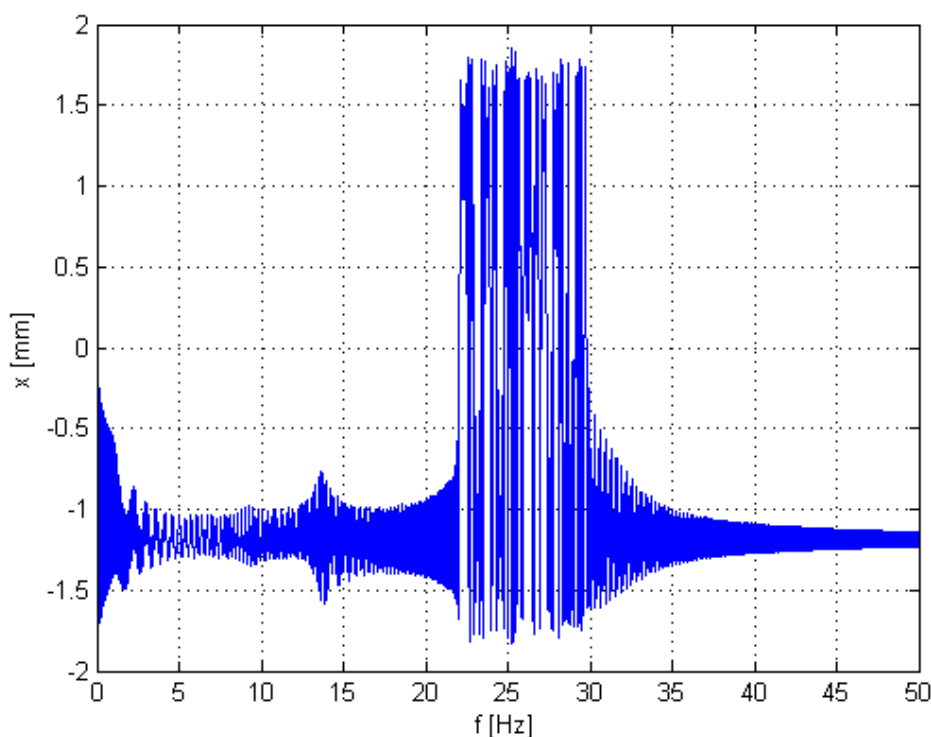


Obr. 50: Průběh výchylky při buzení 0,4 g bez přidané nelinearity

7.3.2 Změna rychlosti přejezdu

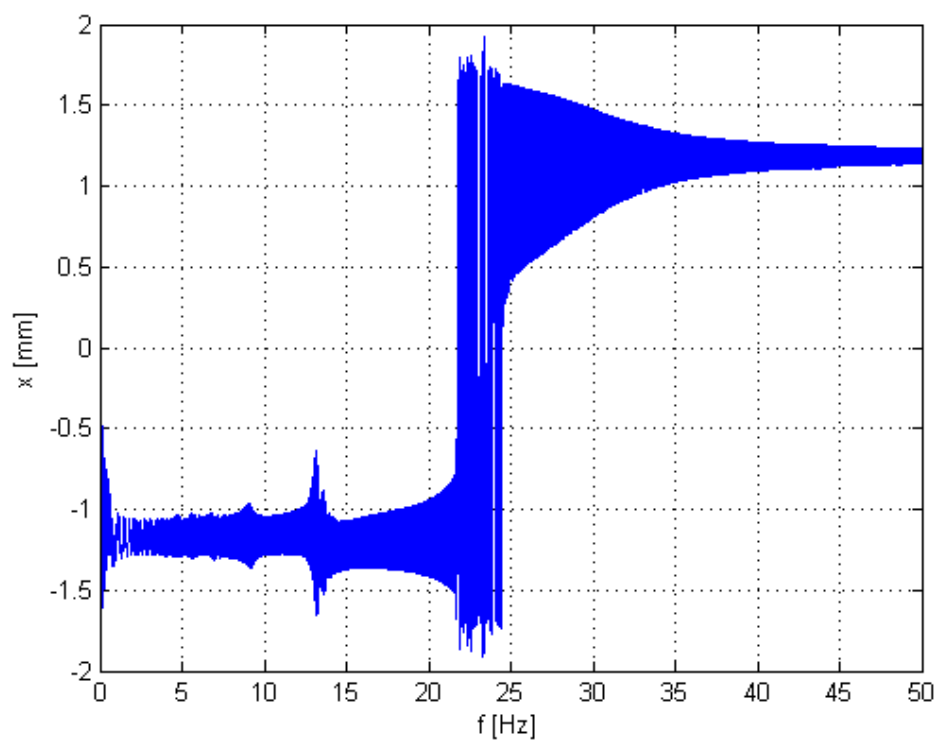
Dále je vhodné vyzkoušet vliv změny rychlosti přejezdu. Pro tyto simulace byla vybrána budící amplituda 0,3 g, která již byla simulována pro rychlost přejezdu 1 Hz / s na Obr. 48. Simulačně tedy bylo testováno chování při zvýšení i snížení rychlosti přejezdu.

Simulaci pro vyšší rychlost přejezdu zobrazuje Obr. 51. Oproti nižší rychlosti přejezdu je patrné déle trvající kmitání mezi rovnovážnými polohami. To lze v tomto případě jednoznačně přisoudit ustalování. Amplituda kmitání zůstala téměř nezměněna.



Obr. 51: Průběh výchylky při rychlosti přejezdu 2 Hz / s a amplitudě buzení 0,3 g

Naopak pomalejší přejezd ukazuje Obr. 52. Při nižší rychlosti přejezdu došlo k rychlejšímu ustálení překmitávání mezi dvěma rovnovážnými polohami. K ustálení navíc došlo na druhé rovnovážné poloze než na počátku. Z těchto jevů je patrné, že v tomto nelineárním generátoru se bude silně projevovat deterministický chaos, kdy nepatrná změna nebo nepatrný šum mohou způsobit překmit mezi rovnovážnými polohami a tím velkou rychlost a tedy i generovanou energii. Stejně jako v předchozí podkapitole, i zde je třeba se odkázat na simulace se zátěží, které ozřejmí možnosti zisku elektrické energie z generátoru.



Obr. 52: Průběh výchylky při rychlosti přejezdu $0,5 \text{ Hz / s}$ a amplitudě buzení $0,3 \text{ g}$

Ze simulací volného generátoru bez zátěže tedy vyplývá, že k rozšíření rezonance dochází a navíc je zde chaotické kmitání mezi dvěma rovnovážnými polohami. Tyto jevy směřují k požadovanému cíli zvýšení generované elektrické energie. Dalším krokem musí tedy být simulace generátoru se zátěží.

8 Simulační porovnání lineární a nelineární verze generátoru Midé V21BL

V kap. 7 je ukázáno chování generátoru s nelineární tuhostí pro různé režimy buzení bez zátěže. Jedná se o první přiblížení k nahlédnutí do vlivu nelinearity. Dalším krokem, který bude učiněn v této kapitole, je simulace generátoru s připojenou zátěží a dále potom porovnání generované energie s lineárním generátorem.

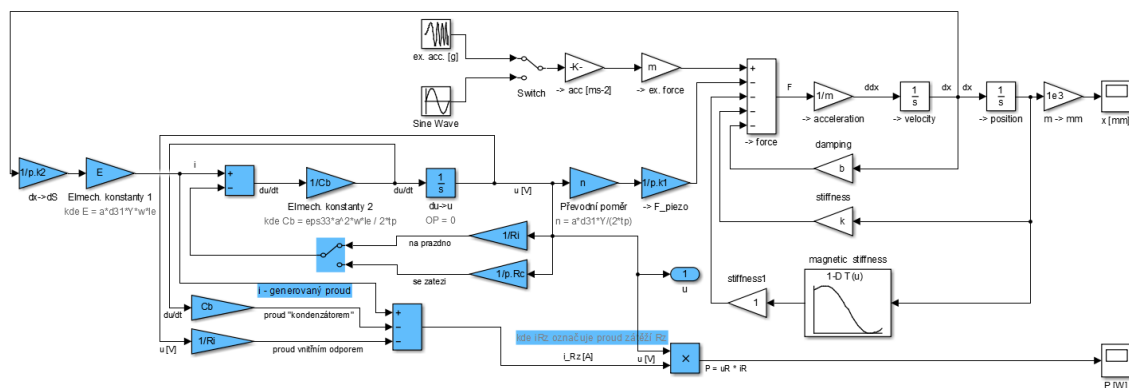
8.1 Model generátoru se zátěží

Model generátoru byl použit z [11], kde je však odvozen pro nosník bez přidané nelineární tuhosti. Model vychází z elektromechanické analogie a je zpracován pro shodný nosník, jaký byl použit k experimentům i výpočtům v této práci. Model je tedy potřeba zpracovat tak, aby bylo možné snadno doplnit nelinearitu.

8.1.1 Úprava modelu pro nelineární tuhost

S výhodou můžeme vyjít ne z rovnic, které sami o sobě nedávají moc představu u procesech, ale z modelu v prostředí Simulink, kde je názorně vidět průběh signálů a jejich změny. Vhodné úpravy v tomto modelu lze převést na algebraické úpravy rovnic, ze kterých je blokový model složen. De facto je model s rovnicemi ekvivalentní, pouze jinak zobrazený/zapsaný.

V této práci byl již odvozen model nosníku bez připojené zátěže (Obr. 27), který byl dále doplněn o nelineární tuhost (Obr. 44). V modelu generátoru z [11] si můžeme povšimnout podobné struktury, kde však není uvažována proměnná poloha, ale přetvoření. Přetvoření a poloha jsou v tomto případě přímo úměrné a lze je snadno přepočítat. V modelu, jehož detail je na Obr. 53 vidíme v červeném bloku přepočet přetvoření na polohu, pomocí konstanty k_2 , kterou lze dohledat v dané práci. Stejně tak zelené bloky, které reprezentují hmotnost, tlumení a tuhost, lze za použití konstant k_1 a k_2 přepočítat na hodnoty redukovaných parametrů používaných v této práci a tedy k nim jednoduše přidat nelineární tuhost od magnetů.



Obr. 55: Model generátoru s přidanou magnetickou tuhostí a zátěží.

S takto upraveným modelem lze již provádět simulace se zadaným buzením a porovnávat výstupní výkon pro různé zátěže a především pro různou přidanou nelinearitu.

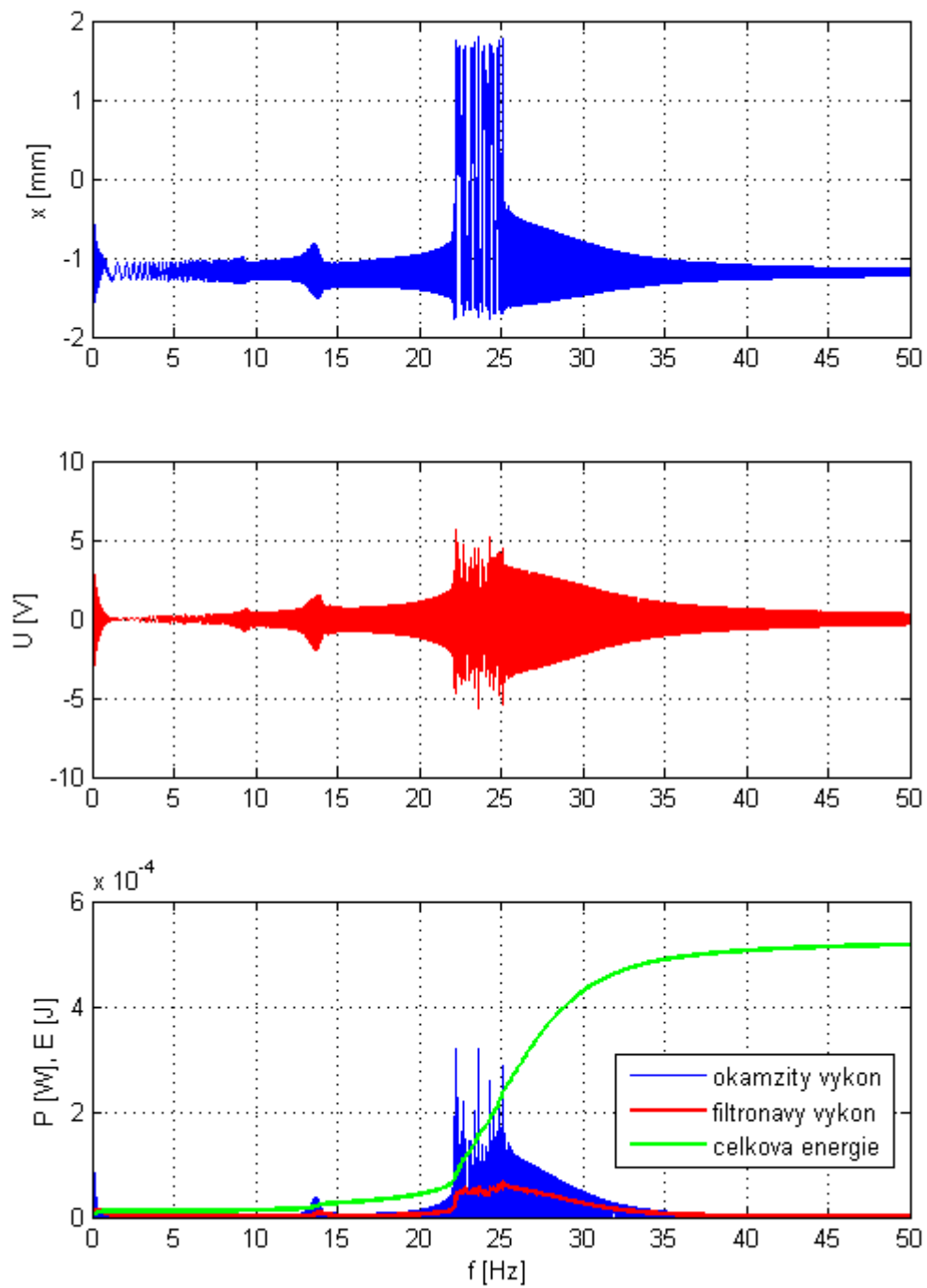
8.2 Nalezení ideální elektrické zátěže

Zásadním krokem návrhu generátoru je volba elektrické zátěže. Pro první experimenty se běžně využívá prostý rezistor. Jedinou proměnou je tedy hodnota odporu. Tu je třeba nalézt za pomoci simulací pro různé zátěžné odpory. Než zde bude ukázána závislost výkonu na zátěžném odporu, je třeba se zamyslet nad jedním rysem generátoru se dvěma stabilními polohami.

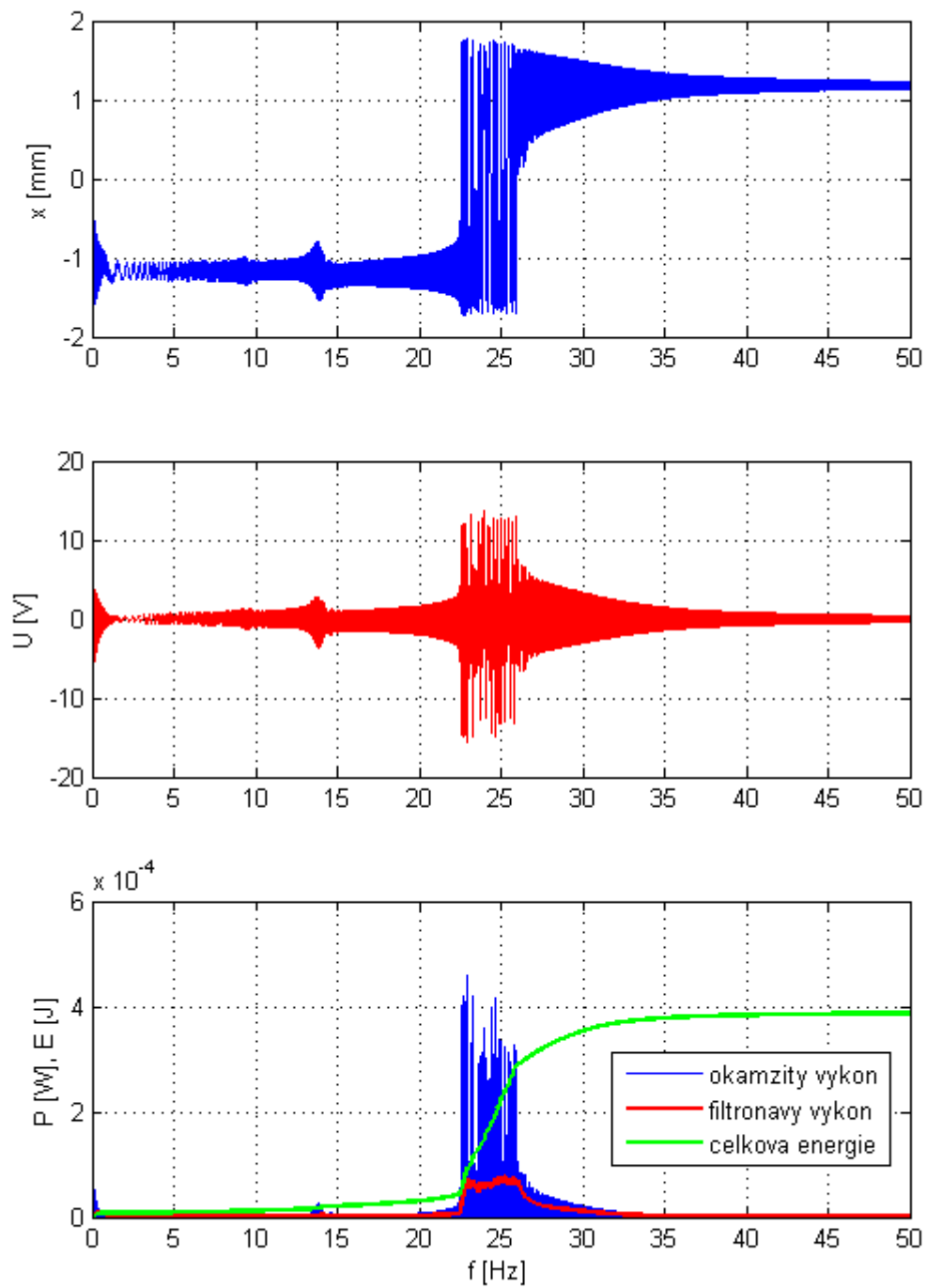
Odebíraný proud z generátoru tvoří v podstatě tlumení. V případě lineárního generátoru snížení odporu způsobí zvýšení proudu, tedy zvýšení tlumení a tím pádem menší výchylky a rychlosti. Jedná se tedy o jednoduchou úlohu hledání maxima odebíraného výkonu. U nelineárního generátoru bude již situace značně komplikovaná. Jak vyplývá z kap. 7, generátor dle buzení pracuje v různých režimech. Hodnota ideálního odporu bude tedy jistě záviset na aktuálním provozním režimu, respektive bude sama přispívat k ovlivnění režimu kmitání, stejně jako buzení.

První simulace byly provedeny pro buzení 0,3 g a rychlost přejezdu 1 Hz / 1 s, tedy stejně jako na Obr. 48, avšak s připojenou zátěží. Simulace byly provedeny pro zátěž 100 a 500 kΩ. Výsledky simulací jsou na Obr. 56 a Obr. 57. V celém průběhu přejezdu přináší více energie zátěž 100 kΩ, avšak část, kdy generátor překmitává mezi dvěma stabilními polohami je užší a výkon v ní nižší, takže pro užší spektrum budících vibrací by byla zřejmě vhodnější zátěž 500 kΩ.

Volba vhodné elektrické zátěže tak není zcela triviálním úkolem a je třeba zvolit nějakou metodiku. Dále je z uvedeného patrné, že při použití elektroniky s proměnnou impedancí, by bylo možné generátor uzpůsobovat pro různé režimy buzení. Tato idea je otevřenou pro další výzkum, avšak v této práci pro její rozpracování není prostor.



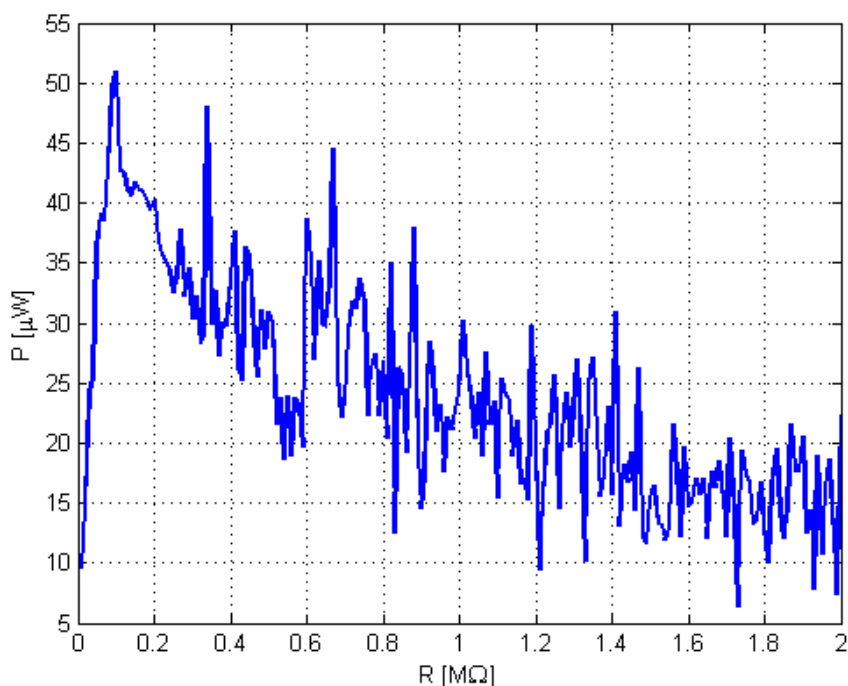
Obr. 56: Průběh výchylky a výkonu pro zátěžný odpor $100\text{ k}\Omega$



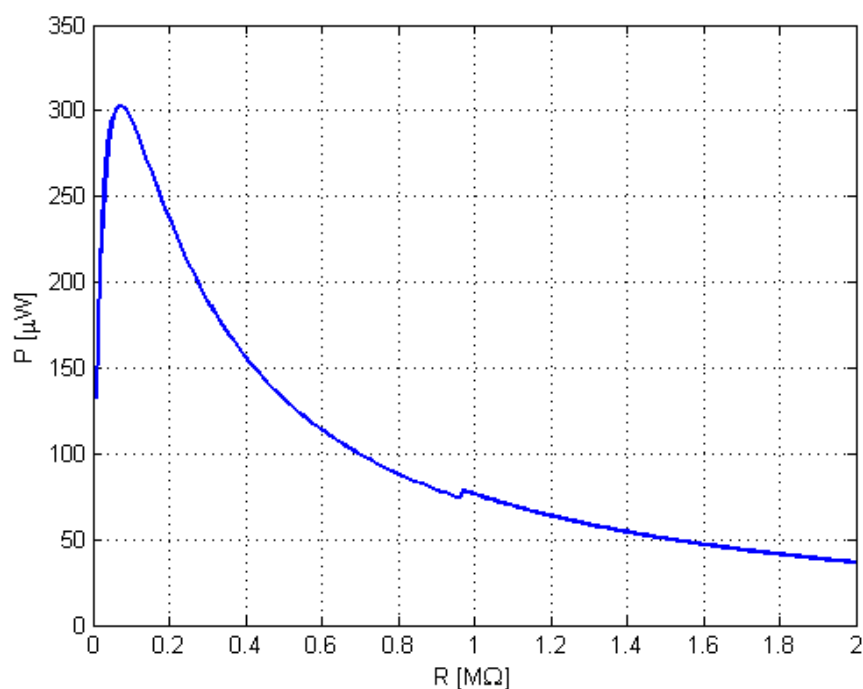
Obr. 57: Průběh výchylky a výkonu pro zátěžný odpor $500 \text{ k}\Omega$

S ohledem na další simulace, jejich povahu a také následný experiment, potažmo využití generátoru, je vhodné naladit elektrickou zátěž pro maximální výkon v rozmezí buzení 20 – 30 Hz. Mimo toto pásmo je energetický zisk mizivý a nelze předpokládat využití generátoru. Pro porovnání výstupní energie je tedy vhodné využít přejezdu od frekvence 20 Hz po 30 Hz, s rychlostí přejezdu 0,5 Hz / 1 s. Bude se tedy jednat o 20 s simulaci, jejímž výstupem bude průměrný výkon. Tato simulace bude provedena pro různé hodnoty zátěže, takže výstupem bude závislost výstupního výkonu na zátěži.

Výstup takové simulace ukazuje Obr. 58, z něhož je patrné, že pro nelineární generátor, který vykazuje silný deterministický chaos, nemá závislost výkonu na odporu zátěže jediný extrém. V celkovém trendu vidíme maximum pro odpor 100 k Ω , avšak pro stoupající odpor stále existují body s poměrně vysokým průměrným výkonem. Na Obr. 59 je pro srovnání stejná závislost pro lineární generátor, pořízená samozřejmě pro patřičně upravený rozsah budících frekvencí 40 – 45 Hz. Maximum je zde pro stejný odpor, avšak maximum je jediné a pro zvyšující se odpor se výkon jednoznačně snižuje. Pro další experimenty tedy bude uvažován odpor 100 k Ω .



Obr. 58: Závislost výstupního výkonu na odporu zátěže pro nelineární generátor



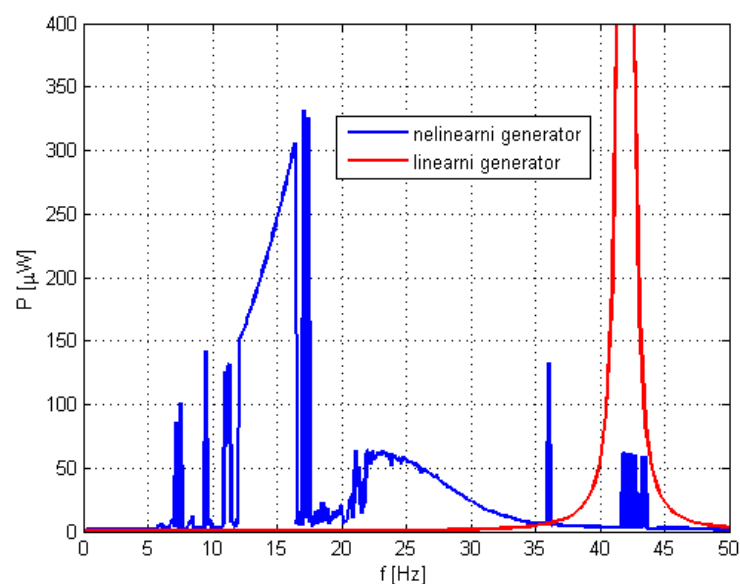
Obr. 59: Závislost výstupního výkonu na odporu zátěže pro lineární generátor

8.3 Porovnání výkonu lineárního a nelineárního generátoru

Optimální odporová zátěž je stanovena a lze tedy přistoupit k porovnání generované energie, potažmo průměrného výkonu. Jak je patrné z předchozího, přejezdy nejsou zcela vhodné, protože jejich rychlost silně ovlivní výsledky. Jako vhodné se tedy jeví simulovat buzení danou frekvencí po určitou dobu, určit průměrný výkon a toto měření opakovat pro různé frekvence.

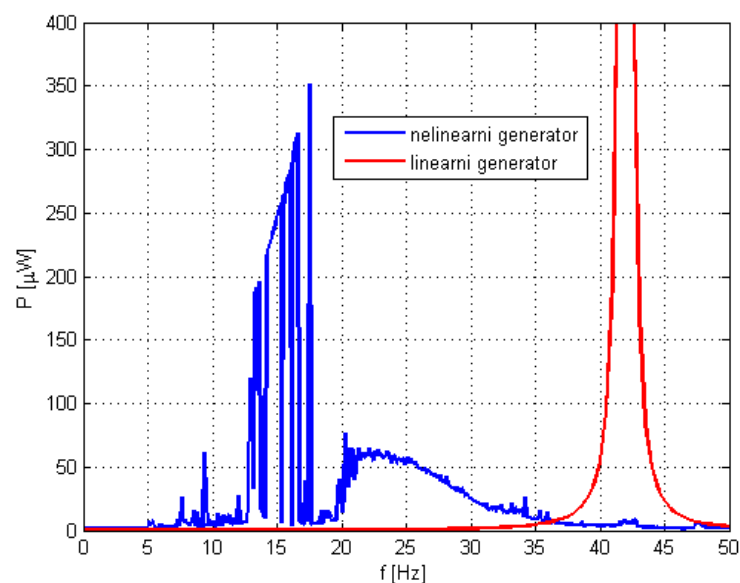
Parametry simulace byly jako v předchozím amplituda buzení 0,3 g, zátěž 100 kΩ, doba každé simulace byla 10 s a simulovány byly budící frekvence od 0 do 50 Hz s krokem 0,1 Hz. Výsledný průběh zobrazuje Obr. 60. Ve srovnání s lineárním generátorem je i nejvyšší maximum výkonu nelineárního generátoru výrazně nižší. Zatímco pro nelineární generátor je maximum okolo 330 μW, lineární generátor měl v rezonanci 1200 μW. Mimo rezonanci je však výkon lineárního generátoru zcela minimální.

U nelineárního generátoru je patrný zvýšený výkon v oblasti kolem 25 Hz, což se z předchozích simulací jeví jako rezonance. Dále se zde však objevil mnohem vyšší výkon v oblasti kolem 15 Hz, kde bylo v předchozích simulacích pouze nepatrné zvýšení amplitudy. Také se zde nachází velké množství osamocených maxim. Z tohoto výsledku lze usuzovat silně chaotické chování. Zatímco simulace byla vždy pro přesně sinusové buzení, ve skutečnosti se bude vždy jednat o silně zašumělý průběh a lze tedy očekávat větší množství různých maxim.



Obr. 60: Srovnání výstupního výkonu lineárního a nelineárního generátoru

Simulačně lze přidat k buzení šum. Takovou simulaci ukazuje Obr. 61. Je patrné, že se udržely „rezonance“ v okolí 25 a 15 Hz. Otázkou je však chování při skutečném buzení a se skutečnými fyzikálními vlivy. Model totiž zanedbává drobné vlivy, jako je tlumení okolním vzduchem, a taktéž model magnetického obvodu je pouze přibližný. Následující kapitola se tedy pokusí ukázat chování experimentálně vyrobeného vzorku na skutečných vibracích.



Obr. 61: Srovnání výstupního výkonu lineárního a nelineárního generátoru pro buzení s přidaným šumem

9 Experimentální měření generátoru Midé V21BL s přidanou nelineární tuhostí

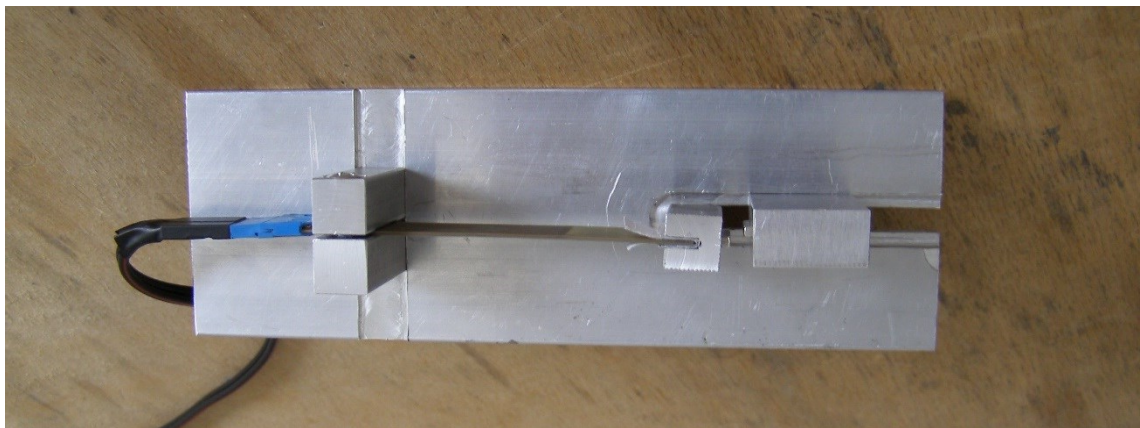
Po provedení simulací nelineárního generátoru je třeba přistoupit k realizaci experimentu. V následujících kapitolách bude ukázána konstrukce experimentálního vzorku, provedená měření a porovnání s lineárním generátorem, který bude shodný s nelineárním, avšak bude odpojen přídatný magnet, jak bude popsáno dále.

9.1 Konstrukce experimentálního vzorku

Základem experimentálního vzorku je komerční generátor Midé V21BL [13]. Pro jeho použití je třeba vždy vyrobit uložení, v tomto případě navíc doplněné o magnety pro nelineární tuhost. Požadavek na uložení magnetů lze formulovat tak, aby bylo možné magnetickou tuhost snadno ladit i úplně zrušit. Z Obr. 31 je patrné, že stačí udělat pevný magnet posuvný v ose generátoru, s možností úplného vysunutí.

Pro výrobu uložení je třeba využít neferomagnetického materiálu, aby neovlivňoval magnetickou nelinearitu. Jako vhodný materiál lze použít hliník, jelikož v aplikaci nejsou zvýšené nároky na pevnost.

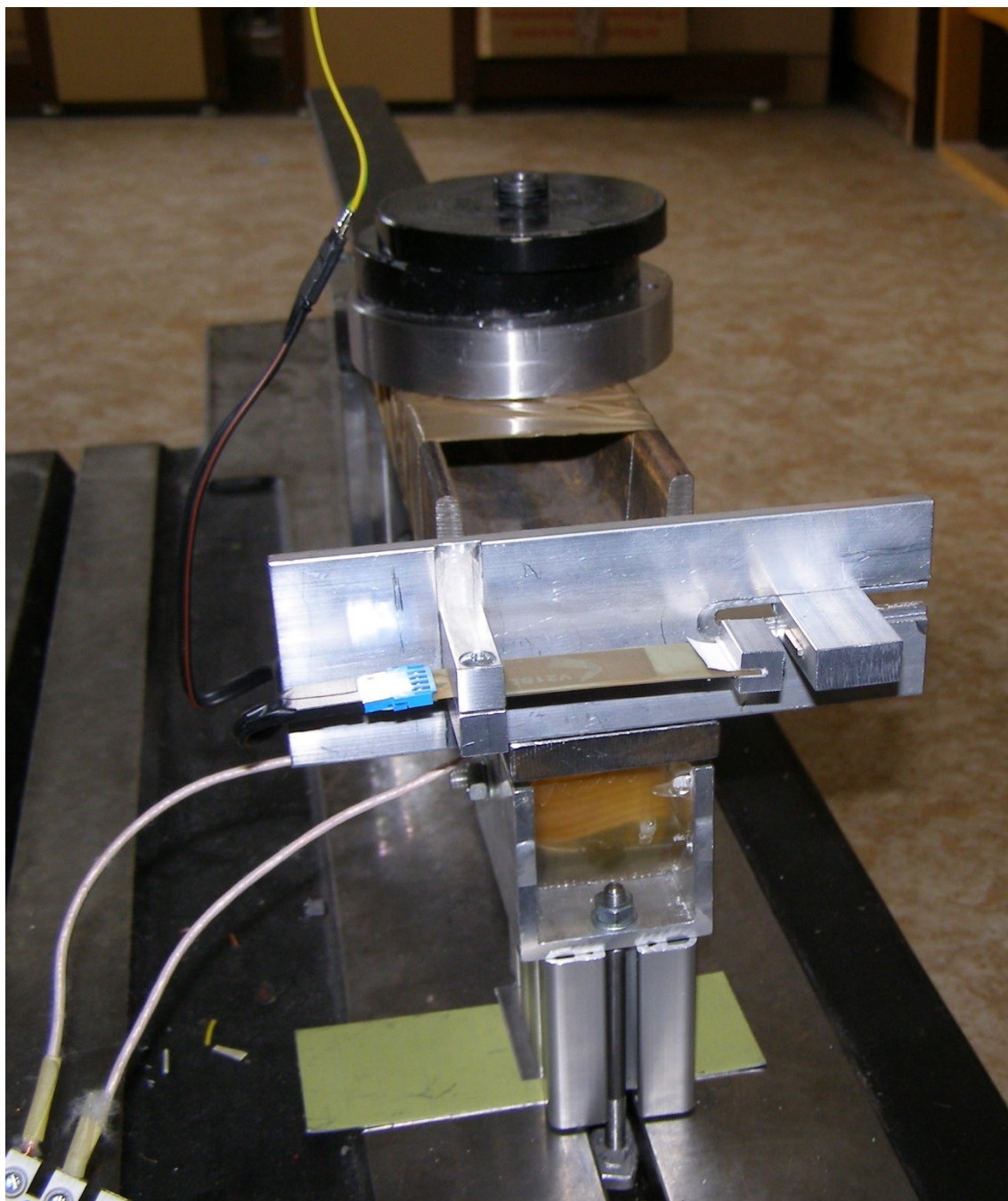
Z výše uvedených požadavků vznikla poměrně triviální konstrukce uložení generátoru, zobrazená na Obr. 62, která poskytuje dobré možnosti uchycení k budící základně a umožňuje ladění i naprosté odstranění nelinearity.



Obr. 62: Experimentální vzorek generátoru

9.2 Kvazi-periodické buzení

Měření bylo provedeno na budícím zařízení, u nějž nelze generovat libovolné harmonické buzení [18] a které je navíc ovlivňováno buzeným generátorem. Při měřeních se ukázalo, že toto zpětné ovlivnění od nelineárního generátoru je mnohem výraznější než u lineárního generátoru. Opět se tedy ukazuje, že nelineární generátor přináší do energy harvesting mnohé nové vlivy. Měřicí soustavu ukazuje Obr. 63.



Obr. 63: Experimentální vzorek generátoru na měřícím zařízení

Z uvedeného tedy vyplývá, že není dost dobře možné provést s dostupným budícím zařízením experiment podobného ražení, jako je numerická simulace, jejíž výsledek zobrazuje Obr. 61. Lze však provést experiment v některých jejích částech a nahlédnout do chování generátoru.

Posledním významným vlivem, který je potřeba u experimentu zmínit, je vliv tíhového pole. V simulacích nebyla tíha uvažována, což odpovídá případu vodorovného kmitání generátoru. Experiment je však možný pouze pro svislé kmitání, tedy ve směru kmitání působí tíhové zrychlení, které má dále vliv na tuhost. V případě lineárního generátoru to vede pouze k posunutí rovnovážné polohy, avšak v případě nelineárního generátoru to ovlivní i průběh tuhosti v okolí rovnovážné polohy. V případě bistabilního to dokonce způsobí, že každá rovnovážná poloha je jiná.

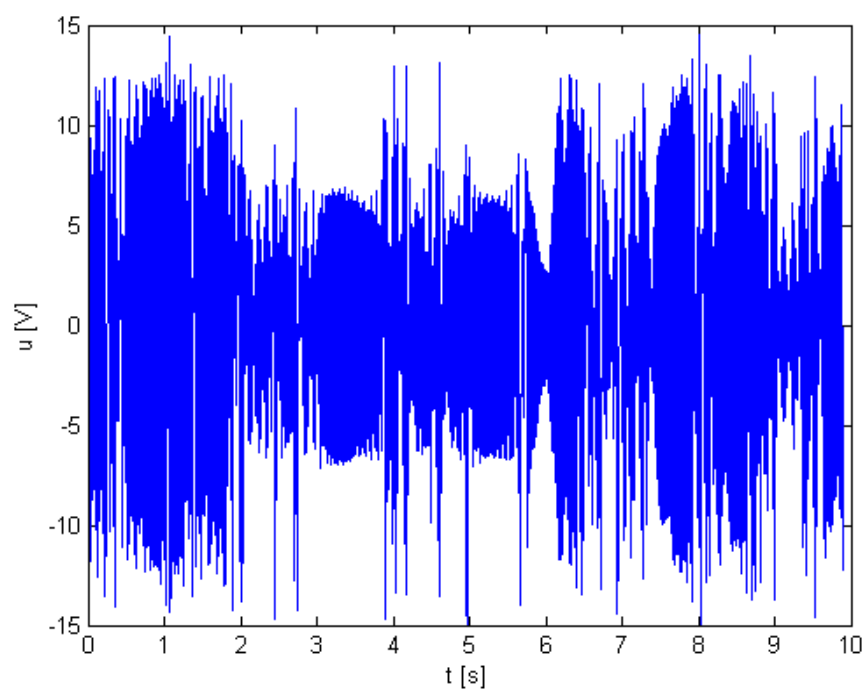
9.2.1 Buzení nízkými frekvencemi

Při buzení frekvencí 12 Hz bylo možno najít tři režimy, a sice v horní stabilní poloze, v dolní stabilní poloze a překmitávání mezi těmito polohami. Ke změně režimu kmitání docházelo při rázu, nebo jiné vnější vibraci. Výstupní energie z dolní a horní stabilní polohy se lišila, a to právě kvůli působení tíhové síly. Zatímco z horní polohy byl průměrný výkon $90 \mu\text{W}$, z dolní polohy to bylo $160 \mu\text{W}$. V případě kmitání mezi rovnovážnými polohami byl průměrný výkon nejvyšší, a sice $500 \mu\text{W}$.

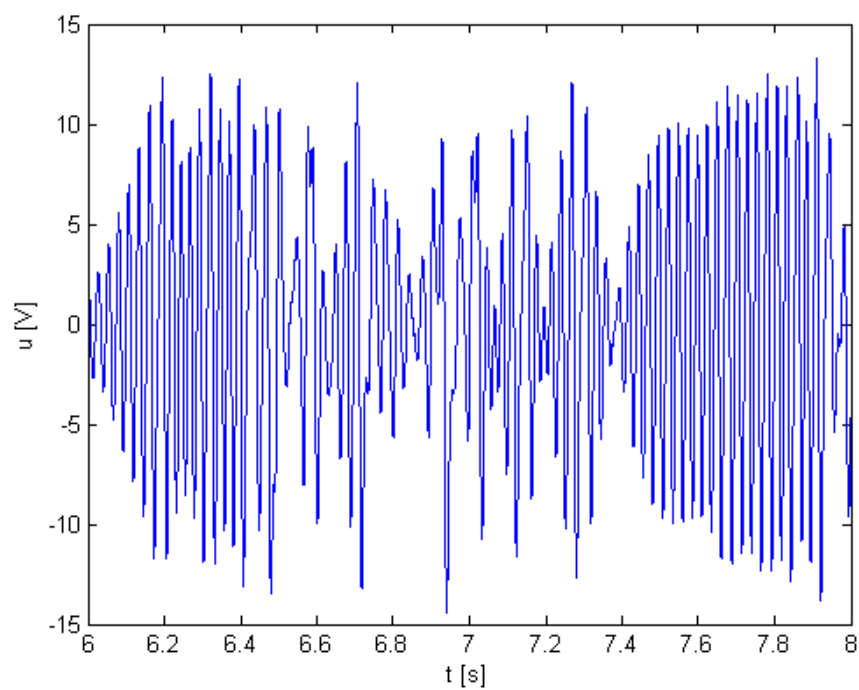
Při zvýšení budící frekvence na 13 Hz už existoval prakticky pouze jeden režim kmitání, a to krátkodobé ustalování ve stabilních polohách s číselnými přeskoky. Průměrný výkon byl $350 \mu\text{W}$ a průběh výstupního napětí je vidět na Obr. 64. Z detailu průběhu na Obr. 65 je patrné střídání kmitání mezi polohami, následné ustálení a pouhé jednoduché přeskmitnutí. Matoucí je, že kmitání v obou polohách je na průběhu napětí nerozlišitelné, jelikož napětí odpovídá rychlosti a tedy kmitání kolem rovnovážné polohy je v napětí vždy kolem nuly. Překmit do vyššího napětí odpovídá změně rovnovážné polohy.

Při dalším zvýšení budící frekvence na 14 Hz a dále už se objevovaly kmity pouze kolem rovnovážné polohy, s tím že se zvyšující se frekvencí se měnila výhodnost jedné či druhé rovnovážné polohy.

Z Obr. 65 je patrné, že generátor nekmitá na budící frekvenci 13 Hz, ale na frekvenci vyšší, okolo 38 Hz. Tato frekvence se blíží třetí harmonické od budící, takže buzení může být ve skutečnosti způsobeno jí. Nabízí se tedy experiment s vyšší budící frekvencí.



Obr. 64: Průběh výstupního napětí generátoru při buzení 13 Hz

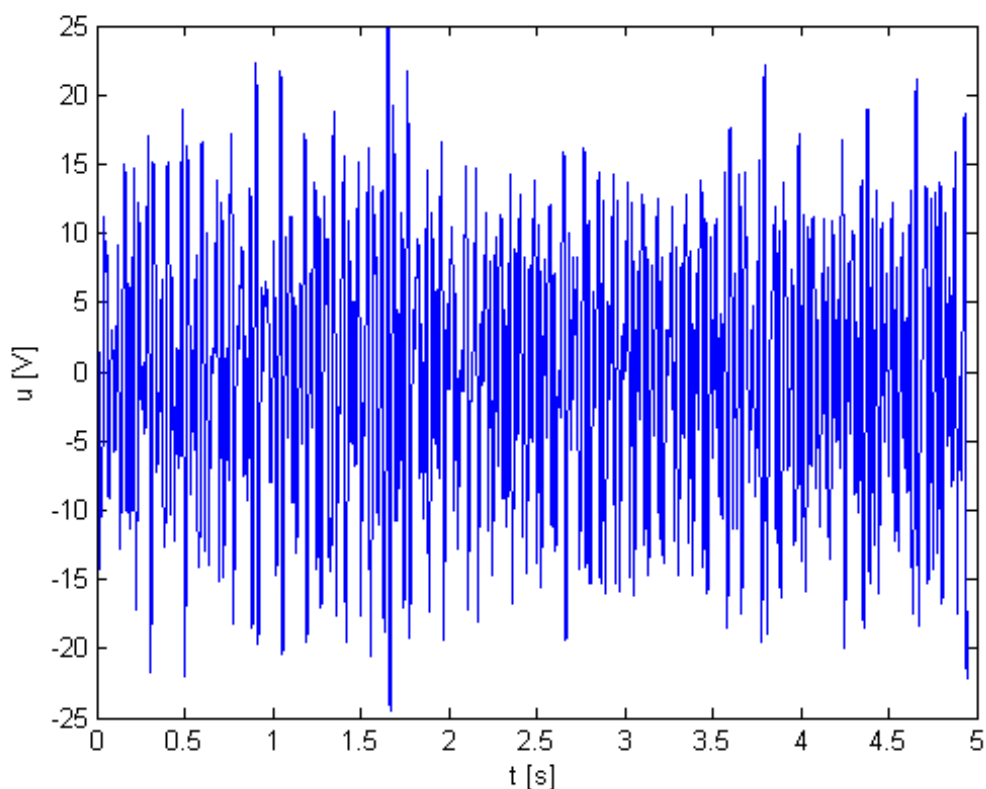


Obr. 65: Detail průběhu výstupního napětí generátoru při buzení 13 Hz

9.2.2 Buzení vysokými frekvencemi

Experiment byl dále prováděn s buzením 35, 36 a 37 Hz. Nejvyšší výkon a chaotické kmitání přinesla frekvence 36 Hz, která je třetím násobkem frekvence 12 Hz, při které však generátor vykazoval i ustálené kmitání, v jedné nebo druhé stabilní poloze. Nelze tedy jednoduše říci, že při buzení 12 Hz docházelo k vybuzení generátoru třetí harmonickou frekvencí, ale docházelo k mnohem složitější interakci.

Při buzení 36 Hz byl průměrný výkon $850 \mu\text{W}$, a jak je patrné z Obr. 66, kmitání bylo zcela chaotické, respektive se jedná o deterministický chaos, tedy kmitání, které zcela odpovídá analytickým vztahům, avšak má tolik ovlivňujících parametrů, že vnějšímu pozorovateli se zdá chování zcela nahodilé. Jedná se o velice složitou strukturu, kterou je zapotřebí dále zkoumat.



Obr. 66: Průběh výstupního napětí generátoru při buzení 36 Hz

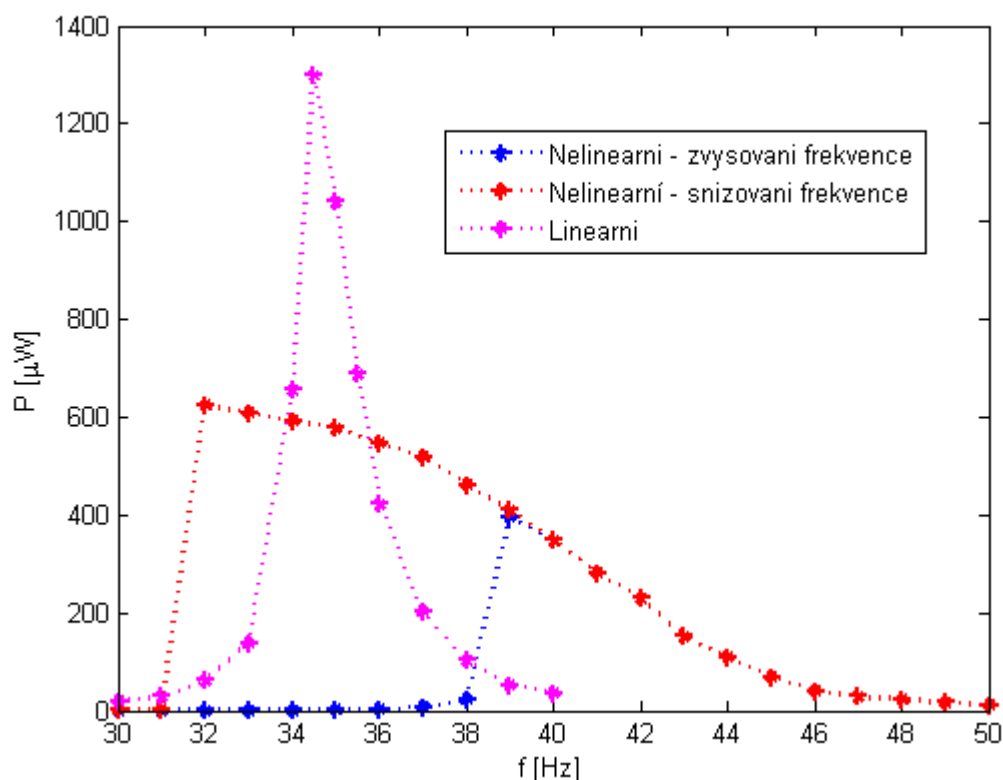
9.2.3 Srovnání s lineárním generátorem

Nakonec bylo provedeno srovnání s lineárním generátorem, kdy po odstranění vnějšího magnetu byl průměrný výkon v rezonanci $1600 \mu\text{W}$, avšak rezonanci bylo třeba ladit s přesností na desetinu Hz a při drobném rozladění výkon prudce klesal.

9.3 Buzení se změnou frekvence

Jak již bylo řečeno v kap. 9.2, v experimentu se oproti simulacím uplatňovala ještě tíhová síla, která měla za následek rozdílnou povahu jinak symetrických rovnovážných poloh. Během experimentu tak bylo zjištěno, že ve spodní stabilní poloze, je vlastní frekvence generátoru 34,5 Hz a charakteristika tuhosti je typicky měknoucí. Na základě tohoto zjištění byl proveden experiment přejezdu se skokovou změnou frekvence, z důvodu že experimentální soustava neumožňuje plynulou změnu.

Byl proveden přejezd se zvyšující a poté snižující frekvencí, při regulované velikosti buzení 250 mg RMS. Stejně tak bylo provedeno bez magnetu, tedy pro lineární generátor. Výsledky experimentu ukazuje Obr. 67. Zde je vidět, že při přejezdu se snižující frekvencí dochází ke značnému rozšíření pásma. Výkon je v maximu poloviční, avšak širší pásma ve vysoké amplitudě tří až čtyřnásobná. Při přejezdu se zvyšující se frekvencí je však amplituda třetinová a širší pásma srovnatelná. Oblast s dvěma výstupními výkony je tedy oblast, která může přinést výsledky přínosné, avšak také výsledky zcela mizerné, v závislosti, na které charakteristice se kmitání ustálí. Pro přejezd je situace zřejmá. Otázkou je, jak by generátor reagoval v reálném prostředí s frekvencemi v rezonančním pásmu. Uplatňuje se zde opět deterministický chaos a situaci by bylo potřeba dále rozebírat stochastickými metodami, což přesahuje rozsah práce.



Obr. 67: Výstupní výkon nelineárního generátoru v závislosti na budicí frekvenci pro různý směr změny frekvence a srovnání s lineárním generátorem

10 Závěr

Rešerše současných přístupů ve využití nelinearity pro energy harvesting ukázala, že existují rozmanité způsoby aplikace nelinearity, avšak obecně lze říci, že se zatím jedná o první pokusy o nahlédnutí do problému a neexistuje ucelený rozbor chování. Tento fakt vychází i ze skutečnosti, že nelinearita může mít obecně libovolný průběh a je tedy prakticky nemožné vytvořit nějakou obecnou metodiku pro její rozbor.

Ze vstupní analýzy vyplynul další postup návrhu, a sice využití piezoelektrického nosníku s přidanými magnety. Postavení těchto magnetů přichází v úvahu několik, a proto byly stanoveny 4 topologie, pro které byl proveden magnetický výpočet a vybrána vhodná topologie s vhodnými parametry pro další postup návrhu. Vytvoření modelu nosníku a návrh parametrů musel jít ruku v ruce s magnetickými výpočty. Jednalo se tedy o mechatronický přístup, kdy byl souběžně řešen model a jeho doplňování o nově navržené vlivy, tedy přidanou nelinearitu. V tomto bodě se povedlo navrhnout vhodný nelineární generátor, který byl simulován bez elektrické části, tedy jako pouhý nosník s přidanými magnety.

Dále následovala výkonová analýza. Model musel být doplněn o část s piezoelektrickým jevem, který byl převzat z DP jiného studenta z předchozího ročníku. Tato část návrhu ověřila funkci nelineárního generátoru a vliv nelinearity na generovaný výkon. Už v této části se projevila komplexnost návrhu a vysoká výpočetní i parametrická citlivost, a tak lze výsledky simulací možné brát spíše jako přibližné.

V posledním kroku byl vytvořen experimentální vzorek generátoru a byla na něm provedena měření. Vybavení laboratoře není bohužel dostatečné pro libovolná měření, ale bylo demonstrováno alespoň několik málo módů buzení, kdy byly demonstrovány jak kmitání v jedné stabilní poloze, tak deterministický chaos při překmitávání mezi dvěma stabilními polohami.

Simulace i experimenty potvrdily, že nelineární přístup nepřináší vyšší výkonové špičky, avšak je schopen rozšířit pásmo rezonance a přinést další přínosné jevy, jako je možnost bistability, generování energie z rázu nebo více režimů kmitání. Chování nelineárního generátoru je však těžko popsatelné a zatím málo probádané. Spolu s celou problematikou nelineární dynamiky je tedy velice vhodným předmětem dalšího studia a vývoje.

11 Seznam použitých zdrojů

- [1] S. Neiss, F. Goldschmidtboeing, M Kroener, and P. Woias, “Analytical model for nonlinear piezoelectric energy harvesting devices,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 10, p. 105031, Oct. 2014.
- [2] S. Stoykov, G. Litak, and E. Manoach, “Vibration energy harvesting by a Timoshenko beam model and piezoelectric transducer,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 224, no. 14–15, pp. 2755–2770, Nov. 2015.
- [3] J. M. Kluger, T. P. Sapsis, and A. H. Slocum, “Robust energy harvesting from walking vibrations by means of nonlinear cantilever beams,” *J. Sound Vib.*, vol. 341, pp. 174–194, Apr. 2015.
- [4] G. Litak, M. I. Friswell, and S. Adhikari, “Regular and chaotic vibration in a piezoelectric energy harvester,” *Meccanica*, Sep. 2015.
- [5] Z. Hadas, V. Vetiska, R. Huzlik, and V. Singule, “Model-based design and test of vibration energy harvester for aircraft application,” *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 4–5, pp. 831–843, Jan. 2014.
- [6] S. Bradai, S. Naifar, C. Viehweger, O. Kanoun, and G. Litak, “Nonlinear analysis of an electrodynamic broadband energy harvester,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 224, no. 14–15, pp. 2919–2927, Nov. 2015.
- [7] R. Gherca and R. Olaru, “Power analysis for an electromagnetic generator with magnets destined to vibration energy harvesting,” in *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2012, pp. 485–490.
- [8] Z. Lin, J. Yang, J. Zhao, N. Zhao, J. Liu, Y. Wen, and P. Li, “Enhanced Broadband Vibration Energy Harvesting Using a Multimodal Nonlinear Magnetoelectric Converter,” *J. Electron. Mater.*, May 2016.
- [9] J. Curie and P. Curie, “Développement, par pression, de l’électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées,” *Comptes rendus l’Académie des Sci.*, p. 91:294, 1880.
- [10] O. Sandru, “New Discovery Makes Piezoelectric Materials 25% More Efficient,” 2012. [Online]. Available: <http://www.greenoptimistic.com/npl-uk-piezoelectric-discovery-20120307/>. [Accessed: 16-May-2016].
- [11] R. Lán, “Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru,” Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [12] Mide, “PPA Piezo Products.” [Online]. Available: http://info.mide.com/hubfs/datasheets/ppa-piezo-product-datasheet.pdf?__hssc=190384372.4.1462434002168&__hstc=190384372.794a60

115d5e492c9a5bf87c8596e2d6.1455816248896.1455816248896.1462434002168.2&hsCtaTracking=b40269b7-eb42-4234-a7ae-d6b9bfa6f122|8b655df.
[Accessed: 05-May-2016].

- [13] “Midé V21BL.” [Online]. Available: <http://cz.mouser.com/ProductDetail/Mide/V21BL/?qs=nSGccIwVXHs4ieRocAw%3d%3d>.
- [14] C. Kratochvíl and J. Slavík, *Mechanika těles - Dynamika*. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2007.
- [15] Apc International Ltd. and American Piezo Ceramics Inc., *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. Duck Run, 2002.
- [16] P. Janíček, *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I*. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2004.
- [17] “Distributor Magsy.” [Online]. Available: <http://www.magsy.cz/>. [Accessed: 21-Mar-2016].
- [18] Z. Hadas and F. Ksica, “Model-based design of testing electromagnetic shaker with flexible beam,” in *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 2014, pp. 393–398.

12 Seznam obrázků

Obr. 1: Vize rozšíření pásma rezonance	10
Obr. 2: Schéma Duffingova oscilátoru s piezoelektrickou přeměnou energie [1].....	11
Obr. 3: Vliv nelineárního členu na Duffingův oscilátor [1]	12
Obr. 4: Realizace nelinearity pomocí dorazu piezonosníku [2].....	12
Obr. 5: Mechanická realizace nelinearity [3].....	13
Obr. 6: Srovnání lineárních a nelineárních generátorů z aplikace [3]	13
Obr. 7: Využití působení tíhové síly pro realizaci nelinearity [4]	14
Obr. 8: Vznik a poloha 2 rovnovážných poloh v závislosti na přidaném závaží [4].....	15
Obr. 9: Původní elektromagnetický generátoru (a) a verze s přidaným externím magnetem (b) [6]	16
Obr. 10: Srovnání výstupního napětí původního generátoru s generátorem doplněným o externí magnet [6]	16
Obr. 11: Vibrační generátor s přidanou laditelnou nelineární tuhostí od magnetů [7] ...	17
Obr. 12: Závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různé buzení [7]	18
Obr. 13: Model piezogenerátoru s více stupni volnosti a přidanými magnety [8]	18
Obr. 14: Průběh síly od jednotlivých magnetů [8].....	19
Obr. 15: Amplitudofrekvenční charakteristika generátoru [8]	20
Obr. 16: Generované napětí z jednotlivých kanálů pro různé budící frekvence [8].....	20
Obr. 17: Schéma piezoelektrického generátoru s elektrickou zátěží [10]	21
Obr. 18: Piezogenerátor ve formě nosníku od firmy Midé [12]	22
Obr. 19: Přehled piezogenerátorů dodávaných firmou Midé [12].....	22
Obr. 20: Schéma generátoru s přidanými magnety.....	23
Obr. 21: Schéma topologie 1 – dva odpuzující se magnety.....	23
Obr. 22: Schéma topologie 2 – dva přitahující se magnety	23
Obr. 23: Schéma topologie 3 – tři přitahující se magnety	24
Obr. 24: Schéma topologie 4 – tři odpuzující se magnety.....	24
Obr. 25: Schéma redukce parametrů nosníku	25
Obr. 26: Průběh tlumeného kmitání nosníku s vykreslenou obálkou.	27
Obr. 27: Linearizovaný model generátoru v programu Simulink.....	28
Obr. 28: Zobrazení procesu návrhu magnetů pro nelineární tuhost	29
Obr. 29: Postup návrhu ve V-cyklu	30
Obr. 30: Magnetický výpočet v programu FEMM spouštěný z programu MATLAB... 31	31
Obr. 31: Změna parametru δ v topologii 1	32
Obr. 32: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 1, pro různé parametry δ	33
Obr. 33: Změna parametru δ v topologii 2	33
Obr. 34: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 2, pro různé parametry δ	34
Obr. 35: Změna parametrů δ a Δ v topologii 3	35
Obr. 36: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 1,5$ mm a pro různé parametry δ	35
Obr. 37: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 2$ mm a pro různé parametry δ	36

Obr. 38: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 3, pro parametr $\Delta = 2,5$ mm a pro různé parametry δ	37
Obr. 39: Změna parametrů δ a Δ v topologii 4	38
Obr. 40: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 1,5$ mm a pro různé parametry δ	38
Obr. 41: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 2$ mm a pro různé parametry δ	39
Obr. 42: Průběh síly od magnetů a výsledná tuhost pro topologii 4, pro parametr $\Delta = 2,5$ mm a pro různé parametry δ	40
Obr. 43: Průběh síly od magnetů pro parametr $\delta = 2,3$ mm, který byl zvolen pro další simulace chování generátoru.	42
Obr. 44: Model nosníku s doplněnou nelineární tuhostí od magnetů	43
Obr. 45: Průběh výchylky při buzení 0,1 g bez přidané nelinearity	44
Obr. 46: Průběh výchylky při buzení 0,1 g s přidanou nelinearitou	44
Obr. 47: Průběh výchylky při buzení 0,2 g s přidanou nelinearitou	45
Obr. 48: Průběh výchylky při buzení 0,3 g s přidanou nelinearitou	45
Obr. 49: Průběh výchylky při buzení 0,4 g s přidanou nelinearitou	46
Obr. 50: Průběh výchylky při buzení 0,4 g bez přidané nelinearity	46
Obr. 51: Průběh výchylky při rychlosti přejezdu 2 Hz / s a amplitudě buzení 0,3 g	47
Obr. 52: Průběh výchylky při rychlosti přejezdu 0,5 Hz / s a amplitudě buzení 0,3 g	48
Obr. 53: Detail modelu lineárního generátoru se zátěží z [11]	50
Obr. 54: Upravená separovaná část piezoelektrického jevu z modelu [11].	50
Obr. 55: Model generátoru s přidanou magnetickou tuhostí a zátěží.	51
Obr. 56: Průběh výchylky a výkonu pro zátěžný odpor 100 k Ω	52
Obr. 57: Průběh výchylky a výkonu pro zátěžný odpor 500 k Ω	53
Obr. 58: Závislost výstupního výkonu na odporu zátěže pro nelineární generátor	54
Obr. 59: Závislost výstupního výkonu na odporu zátěže pro lineární generátor	55
Obr. 60: Srovnání výstupního výkonu lineárního a nelineárního generátoru	56
Obr. 61: Srovnání výstupního výkonu lineárního a nelineárního generátoru pro buzení s přidaným šumem	56
Obr. 62: Experimentální vzorek generátoru	57
Obr. 63: Experimentální vzorek generátoru na měřícím zařízení	58
Obr. 64: Průběh výstupního napětí generátoru při buzení 13 Hz	60
Obr. 65: Detail průběhu výstupního napětí generátoru při buzení 13 Hz	60
Obr. 66: Průběh výstupního napětí generátoru při buzení 36 Hz	61
Obr. 67: Výstupní výkon nelineárního generátoru v závislosti na budící frekvenci pro různý směr změny frekvence a srovnání s lineárním generátorem	62

13 Seznam příloh

Příloha-A_____Skripty pro výpočet magnetické síly

Příloha-B_____Model nelineárního generátoru v programu Simulink
a skript pro simulaci přejezdů