



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 MAGNETICKÉ PRUŽINY PRO VIBRAČNÍ MIKROSBĚRAČ

MAGNETIC SPRING DESIGN FOR VIBRATION ENERGY HARVESTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kobík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Martin Kobík**
Studijní program: Mechatronika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Rubeš, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Návrh magnetické pružiny pro vibrační mikrosběrač

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrační mikrosběrače jsou zařízení pro získávání malého množství energie z vibrací. Jejich součástí je zpravidla magnetická pružina, která je potřeba pro fungování zařízení v rezonanci, kdy dodává maximální množství energie. Magnetická pružina se skládá z alespoň 2, častěji ale 3 a více magnetů, které vytváří sílu závislou na výchylce. Různou kombinací magnetů lze dosahovat různého průběhu síly. Popis zákonitostí mezi topologií magnetů a výsledným průběhem síly je zajímavý úkol, který může přinést vzhled do problematiky.

Cíle bakalářské práce:

1. Tvorba parametrického výpočtového modelu magnetické pružiny.
2. Analýza vlivu parametrů magnetů na průběh síly pružiny.
3. Výroba demonstračního zařízení magnetické pružiny a validace modelu.

Seznam doporučené literatury:

LIAO, Haojun, Tingcong YE, Yu PANG, Ciaran FEENEY, Lei LIU, Zhengmin ZHANG, Chitta SAHA a Ningning WANG. Modelling and Optimization of a Magnetic Spring Based Electromagnetic Vibration Energy Harvester. Journal of electrical engineering & technology [online]. Singapore: Springer Singapore, 2022, 17(1), 463-474 [cit. 2022-11-01]. ISSN 1975-0102. Dostupné z: doi:10.1007/s42835-021-00904-4

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem magnetické pružiny, která by mohla být použita v energy harvesteru. Je vytvořen parametrický výpočtový model, který umožní simulovat průběh síly pružiny se zvolenými parametry, jako jsou pozice a rozměry magnetů. Dále jsou v práci zavedeny dva koeficienty pro hodnocení průběhu síly – koeficient nelinearity a koeficient linearizované tuhosti. V práci jsou pak koeficienty použity k analýze vlivu změny parametrů na průběh síly pružiny. Po analýze jsou vybrány konkrétní hodnoty parametrů pro stavbu demonstračního zařízení. Výpočtový model je nakonec demonstračním zařízením experimentálně validován.

Abstract

The thesis is concerned with a design of a magnetic spring which could be used in an energy harvester. A parametric computational model is created, which allows to simulate the spring's force-displacement relationship with chosen parameters, such as the position and dimensions of the magnets. Furthermore two coefficients are defined for evaluating the force-displacement relationship – the coefficient of nonlinearity and the coefficient of linearized stiffness. The coefficients are further used in the analysis of the effect of the change of parameters on the force-displacement relationship. After the analysis, specific parameters are chosen for the construction of demonstration device. The computational model is finally validated by the demonstration device.

Klíčová slova

vibrační mikrosběrač, magnetická pružina, nelineární pružina, FEMM

Keywords

energy harvester, magnetic spring, nonlinear spring, FEMM

Bibliografická ctace

KOBÍK, Martin. *Návrh magnetické pružiny pro vibrační mikrosběrač* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149948>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ondřej Rubeš

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s dohledem vedoucího práce Ing. Ondřeje Rubeše, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

Martin Kobík

V Brně dne

.....

Poděkování

Chci poděkovat rodičům za podporu při studiu. Velké poděkování patří také Ing. Ondřeji Rubešovi, Ph.D. za vedení práce, konzultace s radami a pomoc s 3D tiskem.

Obsah

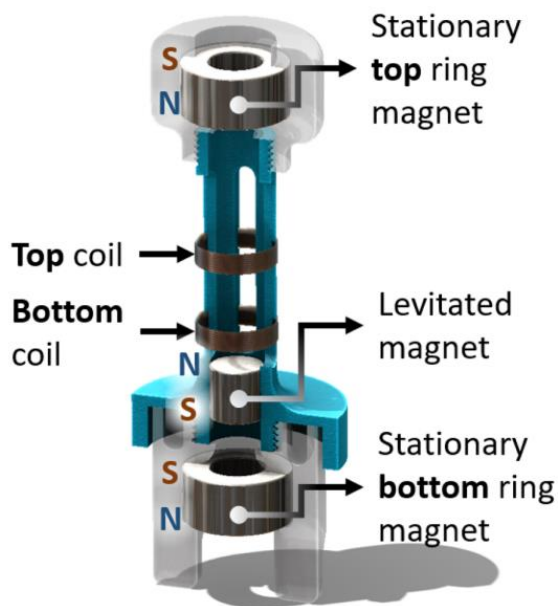
1	Úvod	9
2	Základní popis energy harvesteru	10
2.1	Použití energy harvesteru v posledních letech	10
2.2	Způsoby modelování a validace magnetické pružiny	11
3	Model pružiny a simulace průběhu síly	14
3.1	Srovnání simulací pro různou délku nosníku	16
3.2	Srovnání simulací pro různé vychýlení	17
3.3	Shrnutí rozdílů simulací a volba vhodného typu simulace	18
4	Hodnocení nelineárního průběhu síly	19
4.1	Hodnocení nelinearity	19
4.2	Hodnocení průměrné tuhosti nelineárního průběhu síly	21
5	Analýza vlivu parametrů na průběh síly pružiny	22
5.1	Změna polohy magnetů	22
5.1.1	Změna mezery statických magnetů	22
5.1.2	Posunutí statických magnetů	24
5.2	Změna statických magnetů	25
5.2.1	Změna šířky statických magnetů	25
5.2.2	Změna šířky statických magnetů asymetricky	26
5.2.3	Změna výšky statických magnetů	27
5.3	Změna pohyblivého magnetu	28
5.3.1	Změna šířky pohyblivého magnetu	29
5.3.2	Změna šířky pohyblivého magnetu asymetricky	30
5.3.3	Změna výšky pohyblivého magnetu	31
5.4	Současná změna všech magnetů	32
5.4.1	Změna šířky všech magnetů	32
5.4.2	Změna výšky všech magnetů	33
5.4.3	Změna délky hrany čtvercového průřezu magnetů	34
5.5	Změna orientace magnetů	35
5.5.1	Změnu šířky všech magnetů s jinou orientací	35
5.5.2	Změna šířky pohyblivého magnetu asymetricky s jinou orientací	36
5.5.3	Posunutí statických magnetů s jinou orientací	37
5.6	Vliv změny velikosti všech parametrů magnetů na průběh síly	38
6	Výroba demonstračního zařízení pružiny a validace modelu	39
7	Závěr	43

1 Úvod

S postupem času roste snaha o automatizaci ve všech možných oblastech technologie. Jednou z těchto oblastí jsou senzory, které snímají průmyslové stroje, životní prostředí, nebo jsou použity v lékařských implantátech. Běžně se tyto senzory a další nízkoenergetické přístroje pohání bateriemi, nebo jsou kabelem připojeny ke zdroji. To sebou přináší řadu nevýhod. Baterie mají určitou životnost a musí se měnit, což vyžaduje obsluhu. Byla tedy motivace vyvinout přístroj který by čerpal energii z okolí. Senzory by se pak nemuseli dobíjet a byly by plně automatické.

Pro bezdrátové senzory a další nízkoenergetická zařízení jako člověkem-nošená elektronika byl vyvinut mikro sběrač anglicky energy harvester. Jedná se o zařízení, které získává malé množství energie z okolí. Vibrační energy harvester je schopný přeměnit energii okolních vibrací na užitečnou elektrickou energii. Energy harvester může prodloužit životnost baterie předem zmíněných zařízení, anebo potřebu baterií zcela eliminovat.

V energy harvesterech se často využívá magnetická pružina, která je předmětem této práce. Cílem práce je vytvořit výpočtový model magnetické pružiny, analyzovat vliv parametrů, jako pozice a rozměry magnetů, na průběh síly pružiny a nakonec model validovat demonstračním zařízením.



Obr. 1 Magnetická pružina energy harvesteru, převzato z [1]

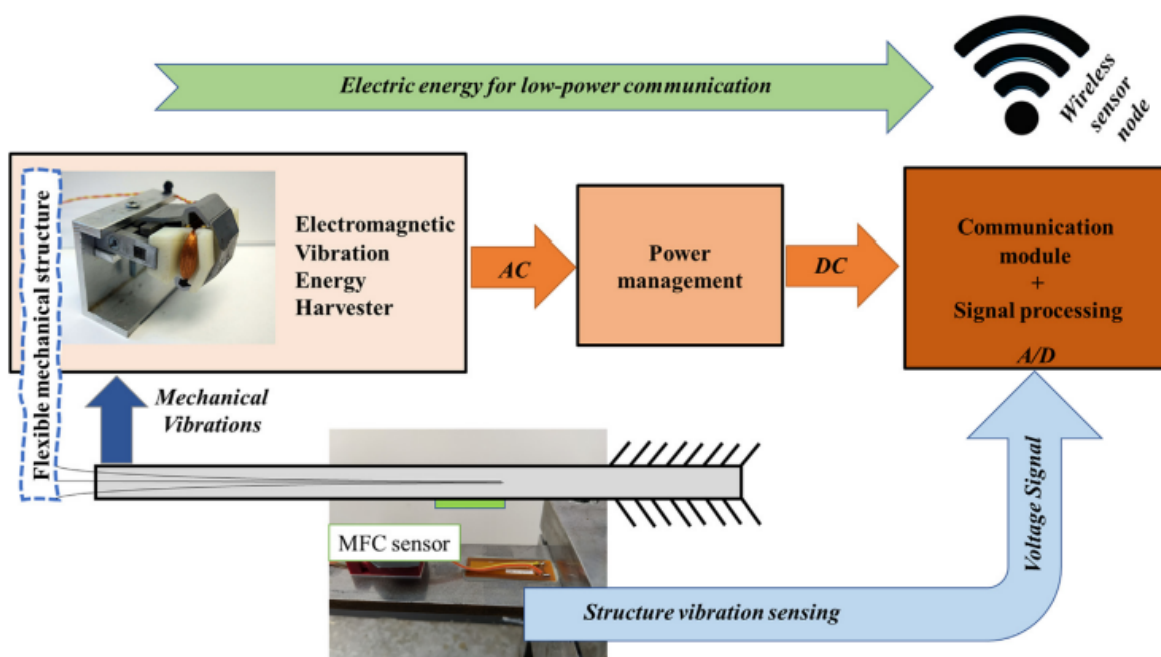
2 Základní popis energy harvesteru

Ve vibračních energy harvesterech se obvykle nachází pružina s přidanou hmotou, která je rozkmitána vibracemi okolí. Kinetická energie rozkmitané hmoty se pak přemění na užitečnou elektrickou energii například elektromagnetickou indukcí [1], piezoelektrickým jevem [2], nebo dalšími metodami.

Energy harvesery jsou účinné na určitém pásmu frekvencí, kdy je budící frekvence blízka vlastní frekvenci pružiny s přidanou hmotou. V případě lineární pružiny je toto pásmo relativně úzké. Buzení má většinou široké spektrum frekvencí a použití lineární pružiny tak není příliš efektivní [1]. Z tohoto důvodu se v energy harvesterech nabízí využít pružinu s nelineárním průběhem síly. Ta může mít širší pásmo rezonančních frekvencí, při kterých má energy harvester vysokou účinnost [2]. Jedním způsobem realizace nelineární tuhosti je použití magnetické pružiny.

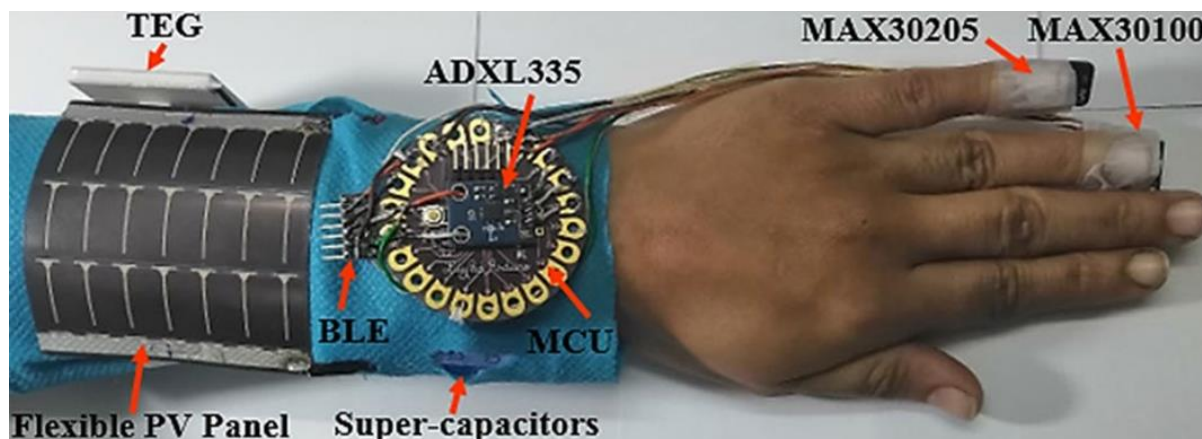
2.1 Použití energy harvesteru v posledních letech

V roce 2020 byl navrhnout bezdrátový senzor napájený vibračním energy harvestrem. Senzor využívá piezoelektrického jevu k monitorování vibrací a elektromagnetické indukce pro napájení samotného senzoru. [2]



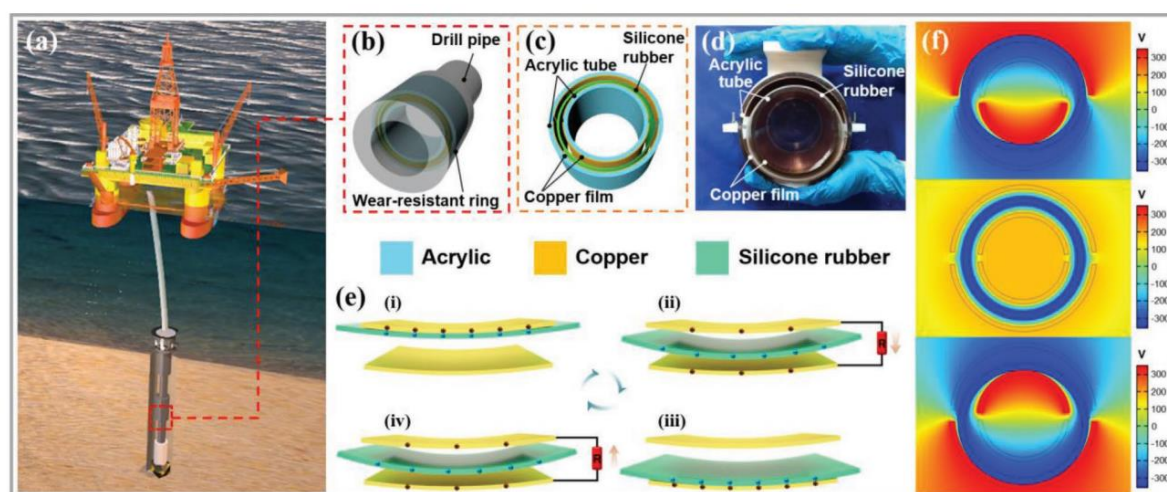
Obr. 2 Architektura sebe-napájecího senzoru, převzato z [2]

Ve stejném roce byl vyvinut systém medických senzorů pro monitorování životních funkcí jako tlukotu srdce a tělesné teploty. Systém je napájen hybridním fotovoltaickým-termoelektrickým energy harvesterem, který prodlouží jeho životnost. Energy harvester získává energii ze slunce a tepla z lidského těla, které zároveň monitoruje [3].



Obr. 3 Prototyp systému medických senzorů, převzato z [3]

V roce 2022 byl navrhnut autonomní sensor AT-TENG pro monitorování vrtání v pobřežních vodách. Sensor je embedeed neboli zabudován ve vrtacím potrubí, kde vytváří střídavý elektrický signál úměrný vibracím. AT-TENG tak monitoruje vibrace a zároveň z nich získává užitečnou energii [4].

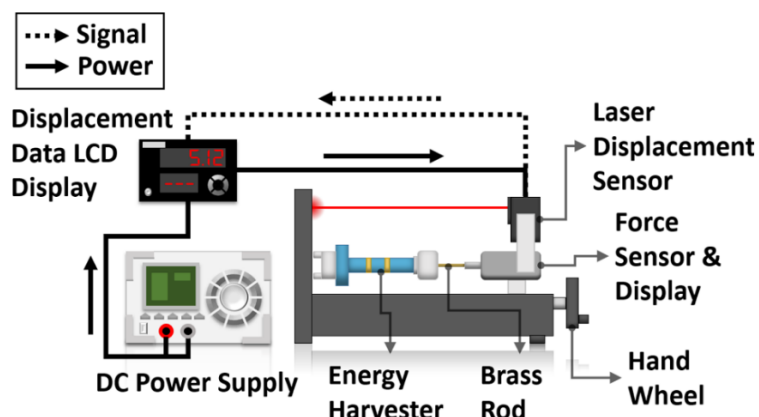


Obr. 4 AT-TENG senzor ve vrtacím potrubí, převzato z [3]

2.2 Způsoby modelování a validace magnetické pružiny

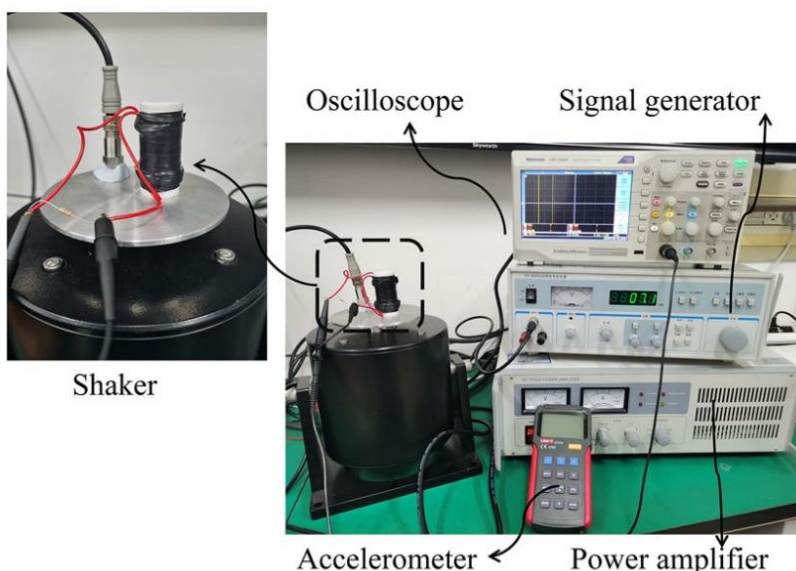
V roce 2020 byl navržen vibrační energy harvester s nelineární magnetickou pružinou. V práci byl použit zjednodušený analytický matematický model pro výpočet síly působící na magnet a aproximovaného koeficientu tlumení. Pro validaci analytického modelu průběhu síly bylo vytvořeno zařízení s energy harvesterem, laserovým senzorem vzdálenosti a silovým senzorem. Na pohyblivý magnet je připevněna tyč, která prochází dírou ve statickém magnetu.

Na tyči jsou senzory vzdálenosti a síly. Pohyblivý magnet pružiny byl nastaven do určité polohy, senzory pak změřily vychýlení magnetu a sílu působící na magnet. Změřením hodnot pro různé vychýlení byl model validován [1].



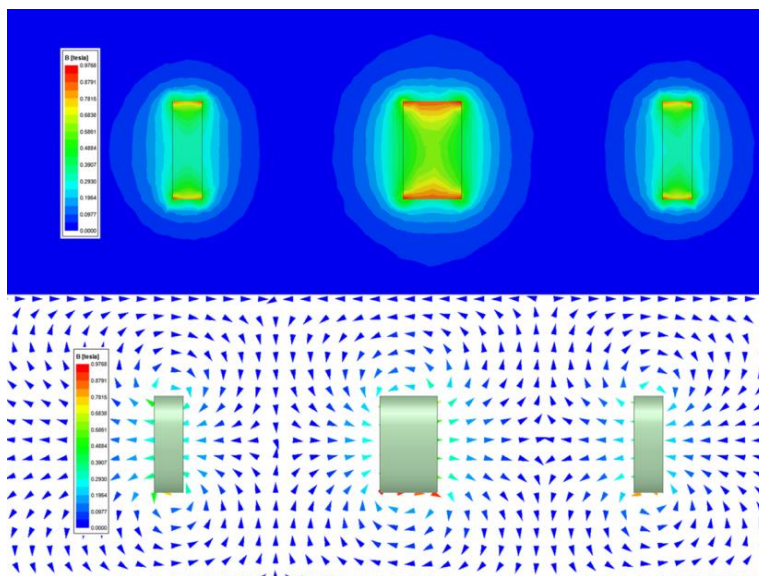
Obr. 5 Experimentální sestava pro měření síly a vychýlení magnetické pružiny, převzato z [1]

V roce 2021 byla navržena magnetická pružina pro energy harvester. Pružina byla modelována metodou konečných prvků a programem Simulink. Metodou konečných prvků byla simulována závislost síly pružiny na vychýlení. Simulované hodnoty se dále proložily funkcí. Dynamika energy harvesteru jako závislost výstupního napětí na frekvenci se modelovala v Simulinku. Model byl validován testovacím zařízením, skládajícího se z prototypu energy harvesteru, akcelerometru, vibračního generátoru, generátoru signálu, operačního zesilovače a osciloskopu [5].



Obr. 6 Experimentální sestava, převzato z [4]

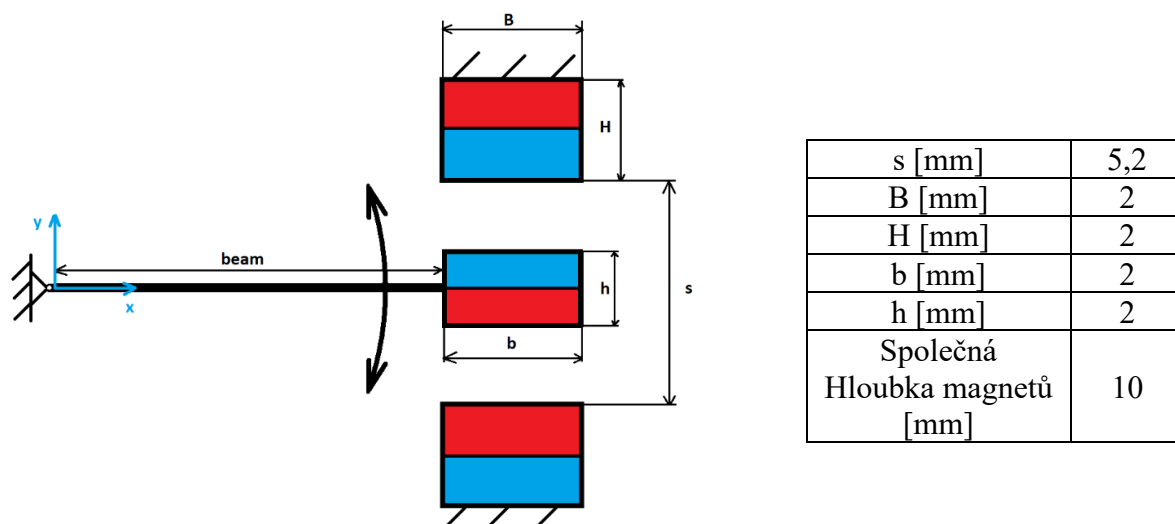
V roce 2021 byl numericky analyzován energy harvester s nelineární magnetickou pružinou. Model byl vytvořen v programu ANSYS Maxwell. Program vypočetl nelineární průběh magnetické síly a magnetický tok cívky harvesteru [6].



Obr. 7 Magnetické pole 3 magnetů v programu ANSYS Maxwell, převzato z [6]

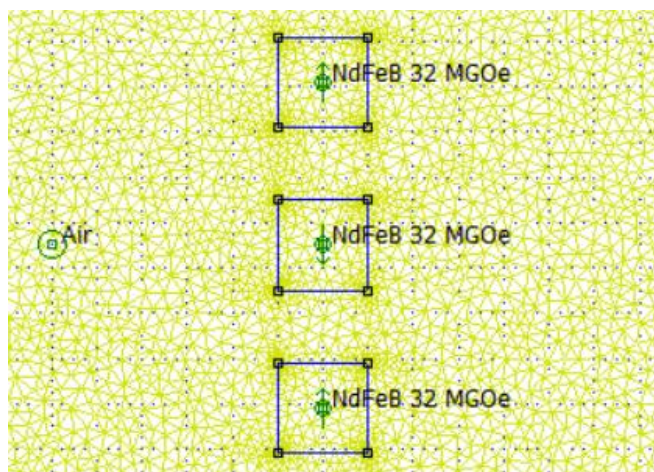
3 Model pružiny a simulace průběhu síly

Pružina se skládá ze 2 statických magnetů a 1 pohyblivého magnetu. Ten se otáčí kolem rotační vazby a kmitá mezi statickými magnety. Statické magnety jsou orientovány tak, aby se od nich rotační magnet odpuzoval. Základní sestava pružiny je vidět na Obr. 8. Rozměry parametrů základní sestavy byly inspirovány prací [7].



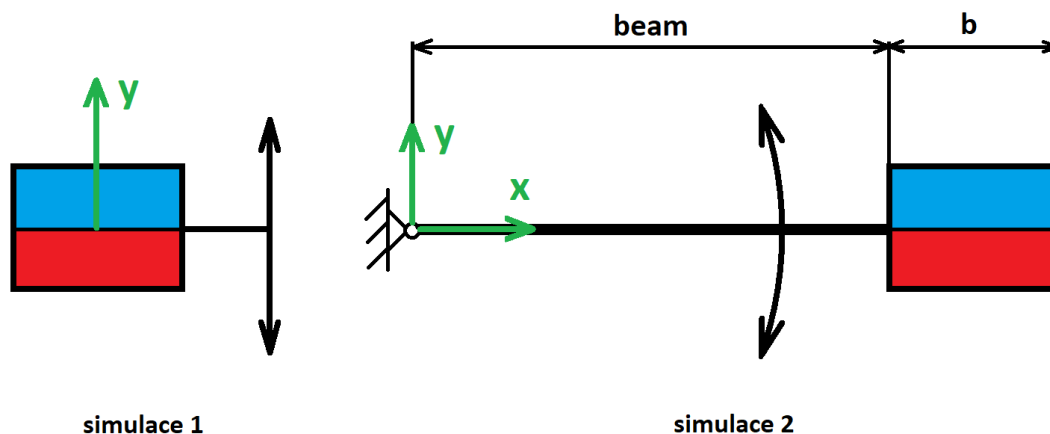
Obr. 8 Základní sestava pružiny

Pružina byla modelována v programu FEMM 4.2, který vypočte magnetickou sílu působící na pohyblivý magnet metodou konečných prvků. Pro získání průběhu síly byl napsán matlab kód. Ten vychýlí pohyblivý magnet, nechá program FEMM vypočítat sílu a uloží hodnoty. Proces zopakuje pro zvolený počet bodů tak, aby pokryl vychýlení od rovnovážné polohy k jedné úvrati. Díky symetrii úlohy stačí vypočítat polovinu celkového průběhu síly, čímž se zkrátí výpočetní čas.

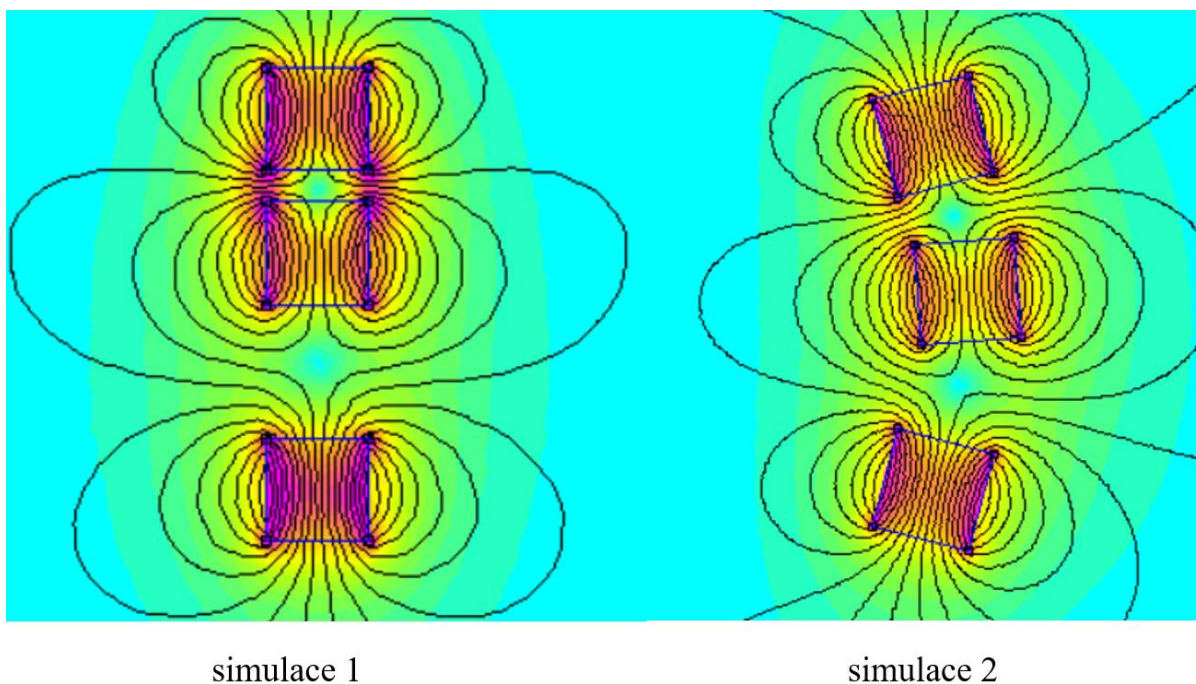


Obr. 9 Síť metody konečných prvků programu FEMM 4.2

Pružina byla simulována 2 způsoby, z nichž byl 1 způsob vybrán pro zbytek práce. V simulaci 1 se prostřední magnet pohybuje translačně z jedné úvratě do druhé. V simulaci 2 koná rotační pohyb okolo rotační vazby. Statické magnety jsou navíc pootočené tak, aby na ně pohyblivý magnet dosedl v maximální výchylce plochou na plochu. Simulace 1 je lehčí na modelování. V simulaci 2 odpovídá pohyb středního magnetu přesněji reálné pružině.



Obr. 10 Schéma simulací



Obr. 11 simulace v programu FEMM 4.2 s vykresleným magnetickým polem

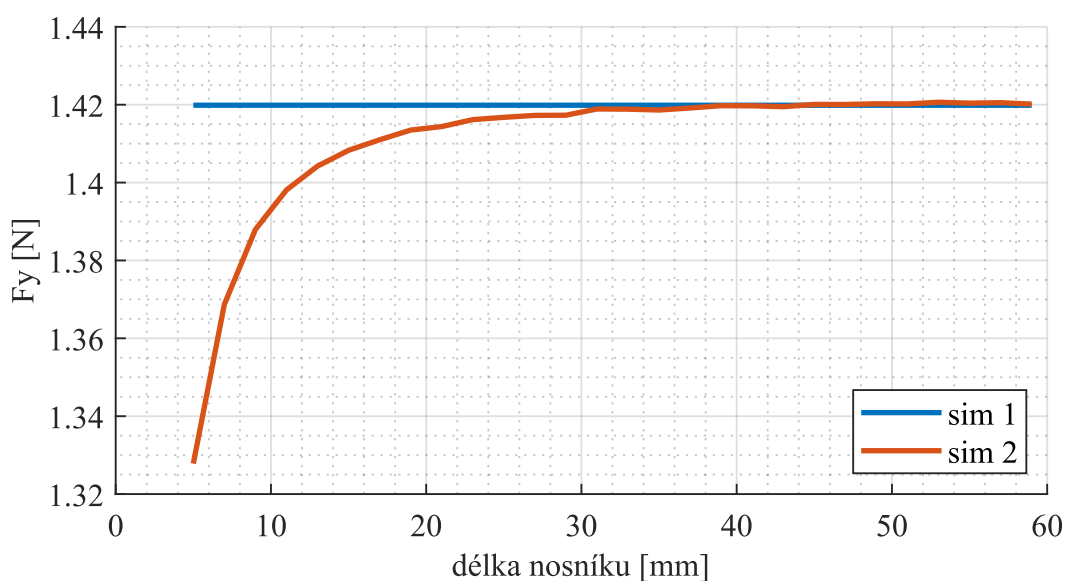
V simulacích je srovnávána síla F_y a moment M . Síla F_y je celková síla působící na pohyblivý magnet. Moment je pro každou simulaci počítán jinak. Pro simulaci 1 se počítá jako násobek síly F_y a délky ramene „beam“ viz. Obr. 8.

$$M_1 = F_{y1}(\text{beam} + b/2)$$

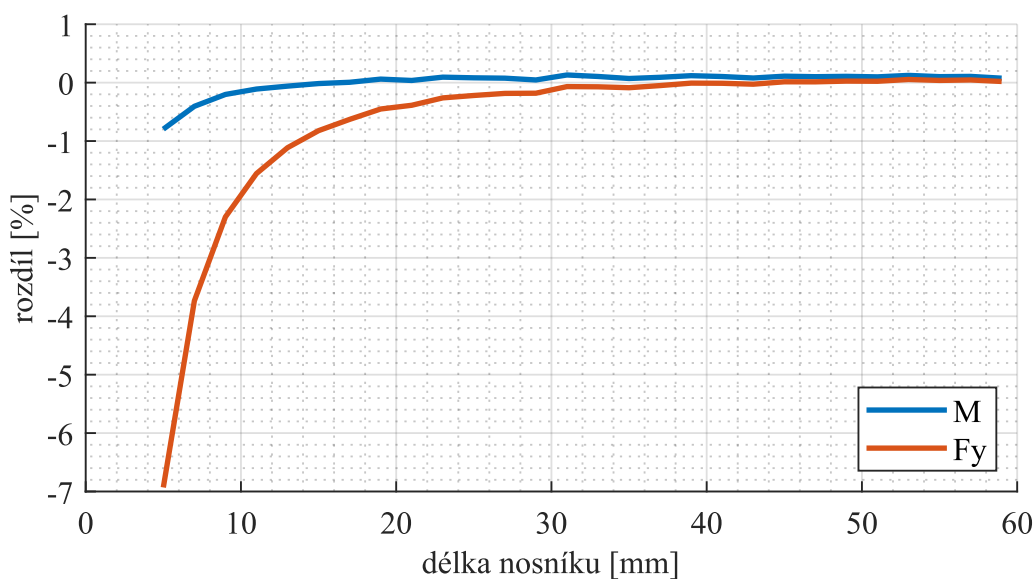
Pro simulaci 2 vypočítá moment program FEMM 4.2 jako celkový moment působící na pohyblivý magnet k rotační vazbě. Moment se v tomto případě nedá spočítat pouze ze síly F_y . Na magnet působí kvůli natočení i síla v ose x . Síly jsou navíc programem počítány jako celkové síly v daném směru, jejich působíště nemusí být v těžišti magnetu.

3.1 Srovnání simulací pro různou délku nosníku

Byla simulována závislost síly F_y a momentu M na délce nosníku. U obou simulací byl střed pohyblivého magnetu vychýlen do poloviny maximálního vychýlení v ose y . Z dat byl vytvořen graf závislosti síly na délce nosníku a graf rozdílu síly v procentech. Pro moment je zobrazen pouze graf rozdílu v procentech. Průběhy jsou totiž tak podobné, že z grafu velikosti momentu by nebylo nic vidět.



Obr. 12 Závislost síly F_y na délce nosníku pro obě simulace



Obr. 13 Závislost rozdílu simulací v momentu a síle F_y na délce nosníku

$$\text{rozdíl } Fy = \frac{F_{y2} - F_{y1}}{F_{y2}}, \text{ rozdíl } M = \frac{M_2 - M_1}{M_2}$$

Rozdíl simulací se snižuje s rostoucí délkou nosníku a blíží se nule. Procentuální rozdíl momentu je nižší než rozdíl síly. Rozdíl momentu je pro nás podstatnější, protože u porovnání momentu nezanedbáváme sílu v ose x ani působišť sil. Moment tak popisuje zatížení magnetu přesněji než samotná síla Fy .

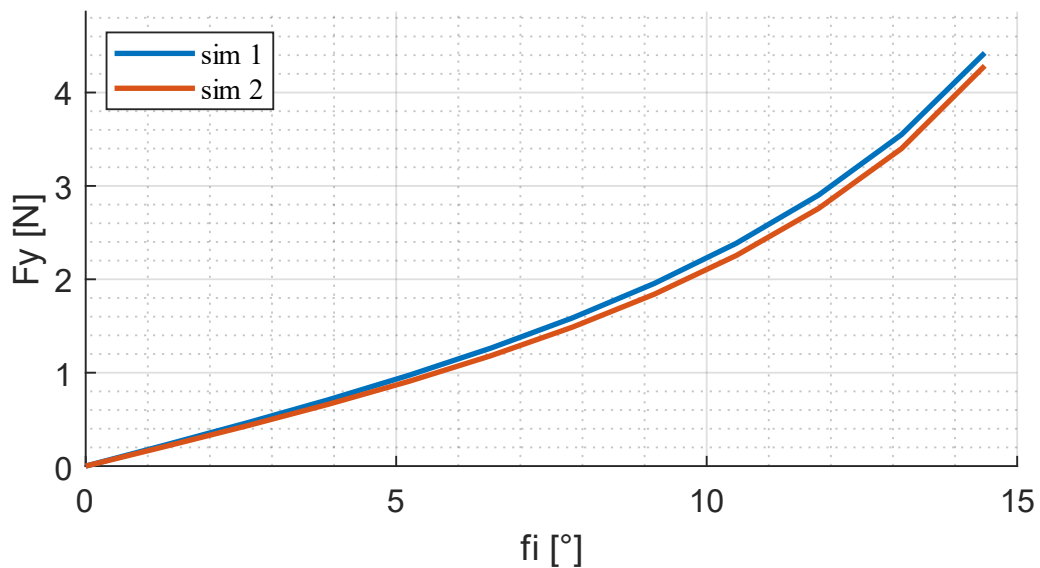
Pro délky 35 mm a více je síla Fy stejná v obou simulacích. Od 10 mm je rozdíl sil do 2 %. Pro délky 10 mm a více se rozdíl momentů pohybuje kolem ± 0.2 %.

3.2 Srovnání simulací pro různé vychýlení

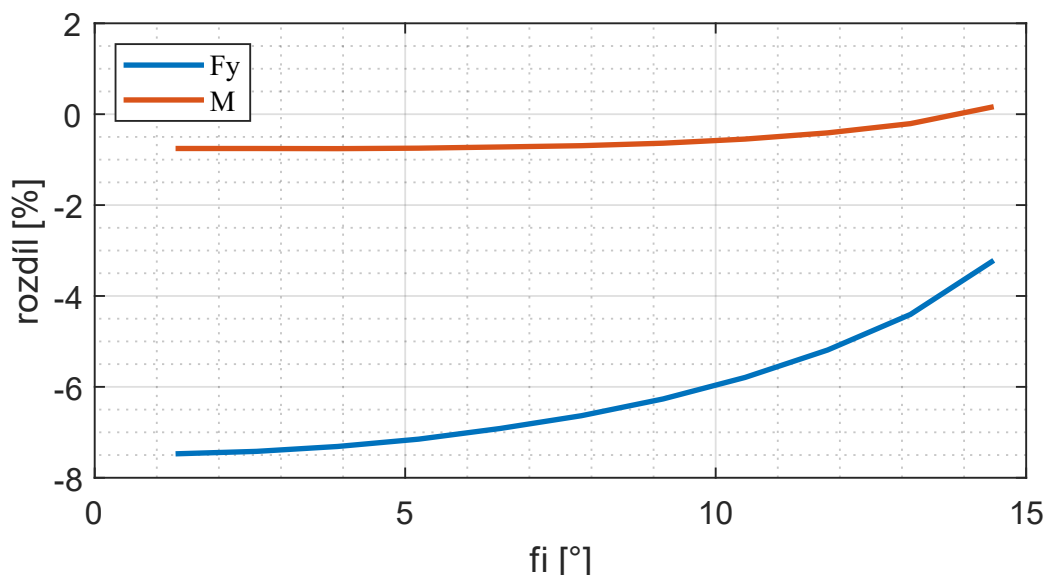
Rozdíly sil a momentů byly v předchozí podkapitole malé. Byla tedy vybrána délka nosníku 5 mm, kde bude rozdíl nejlépe vidět. Pro tuto délku byla simulována závislost síly Fy na celé úhlové výchylce. V simulaci 1 je translační výchylka přepočtena na úhlovou:

$$\varphi = \text{asin}(y / (\text{beam} + b/2))$$

Jedná se o malé úhly, takže polovina translační výchylky je přibližně polovina úhlové výchylky.



Obr. 14 Závislost síly Fy na úhlovém vychýlení pro obě simulace



Obr. 15 Závislost rozdílu simulací na úhlové výchylce pro moment a sílu F_y

Rozdíl ve velikosti F_y roste s výchylkou. Maximální rozdíl F_y v procentech je 7,5 %. Ten však nastává při malém vychýlení a téměř nulové síle. Nemá tedy velký význam.

Kvůli malému rozdílu je opět zobrazen pouze rozdíl momentů v procentech. Největší rozdíl je opět při malém vychýlení, nemá tedy velký význam. Momenty se v simulaci liší o méně než 1%, dají se považovat za totožné.

3.3 Shrnutí rozdílů simulací a volba vhodného typu simulace

Simulace se porovnály v síle F_y a momentu v poloviční výchylce pro různé délky nosníku. V délce nosníku 5 mm s největším rozdílem se dále porovnal celý průběh F_y a momentu v závislosti na úhlovém vychýlení.

Rozdíly simulací v momentu i síle se blíží nule s rostoucí délkou nosníku. Od délky nosníku 10 mm je rozdíl v F_y <2 %. Nejvyšší procentuální rozdíl F_y je <7 % a to v nejkratší délce simulovaného nosníku 5 mm a malém vychýlení. Procentuální rozdíl je navíc u malé síly, nemá tedy velký vliv.

Moment nezanedbává sílu v ose x ani působíště sil a popisuje tak zatížení magnetu přesněji než samotná síla F_y . Nejvyšší rozdíl momentu je nižší než 1 % v délce nosníku 5 mm a malém vychýlení. Momenty obou simulací se dají považovat v simulovaných délkách nosníku a vychýlení za totožné (rozdíl <1 %). Dále bude v práci použita simulace 1, protože je jednodušší na modelování.

4 Hodnocení nelineárního průběhu síly

V této kapitole jsou definovány koeficienty nelinearity a linearizované tuhosti. Nelineární průběh síly se dá nahradit těmito dvěma koeficienty. Koeficienty slouží ke snadnému a přehlednému porovnání více průběhů sil.

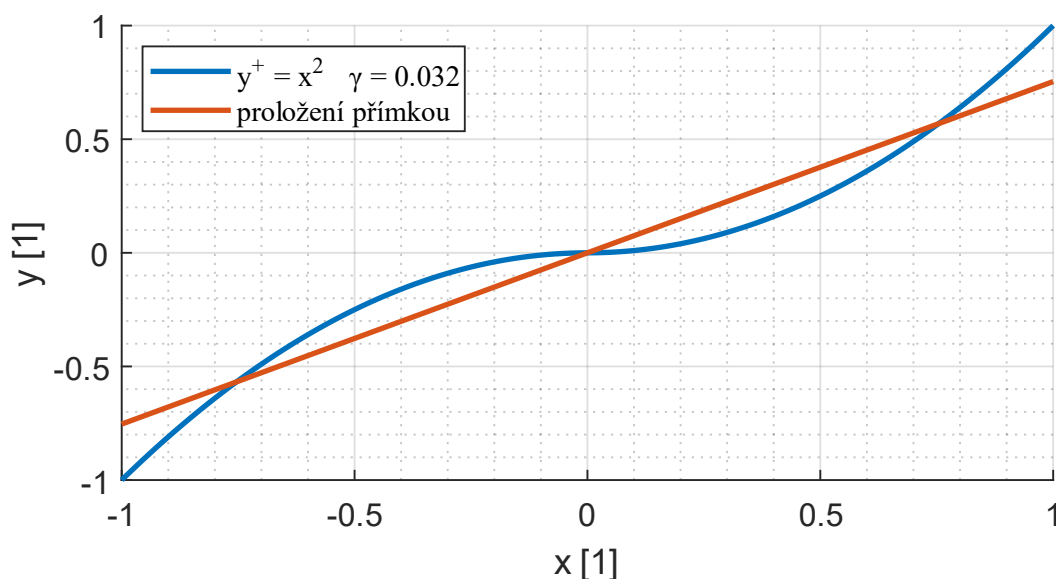
4.1 Hodnocení nelinearity

Pro porovnání průběhů sil je užitečné mít nějakou metriku toho, jak moc je graf nelineární. V této práci je použit koeficient nelinearity, který je definován následovně:

Data průběhu síly se proloží přímkou metodou nejmenších čtverců. Použije se celý průběh síly od 1 úvratě do druhé, aby přímka protínala počátek. Spočítá se koeficient korelace mezi přímkou a daty. Pokud všechna data leží na 1 přímce, koeficient korelace $R = 1$. Jinak bude koeficient vždy menší jak 1. Koeficient nelinearity, značený γ , je pak:

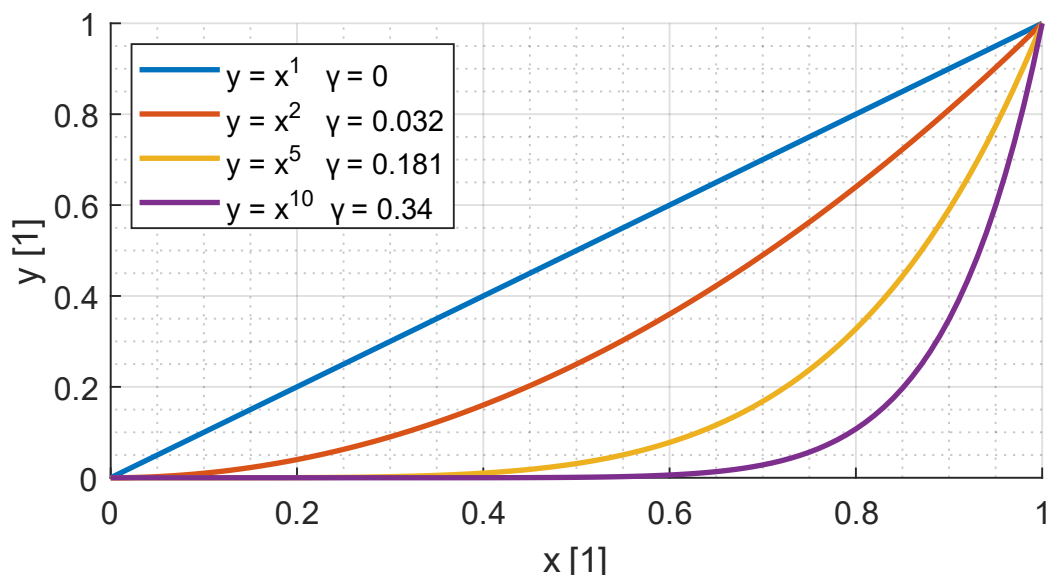
$$\gamma = 1 - R$$

Díky symetrii úlohy stačí simulovat průběh síly od nulové do maximální výchylky. Při výpočtu nelinearity se pak data zkopírují a otočí kolem počátku u 180° , aby se proložil celý průběh. Proces je zobrazen pro „parabolický“ průběh síly na Obr. 16.



Obr. 16 Proložení funkce přímkou procházející počátkem

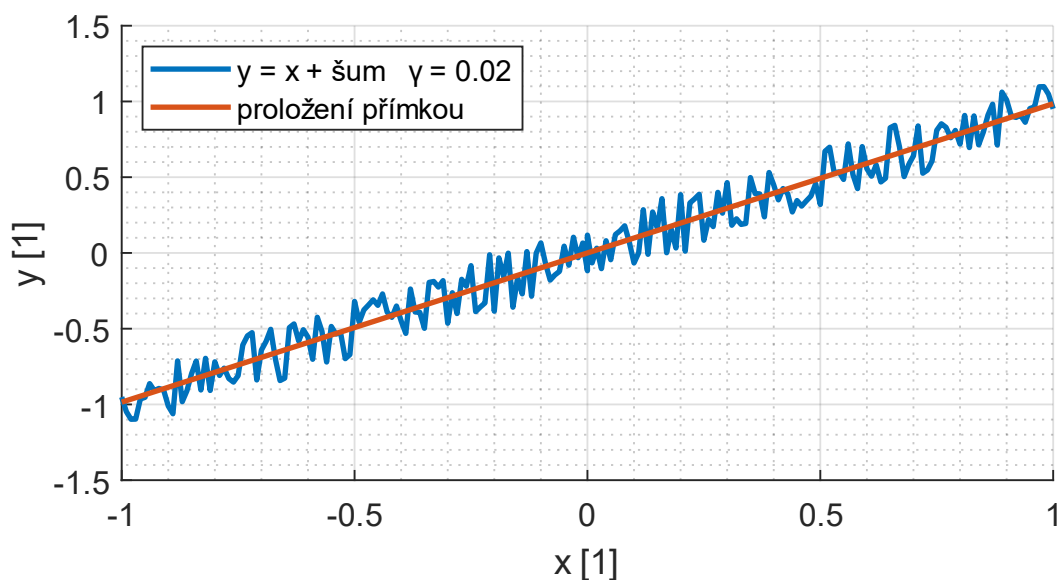
Průběhy sil, které se vyskytují v této práci, jsou liché. Proložení celého průběhu přímkou bude vždy protínat počátek.



Obr. 17 Nelinearita polynomů

γ se zvyšuje s rostoucím stupněm polynomu. Pro lineární průběh je γ nulová.

Koeficient korelace R a tedy i γ hodnotí, jak moc data následují přímkou. Vyšší hodnota γ nemusí nezbytně znamenat, že je průběh nelineární. V případě šumu dostaneme nenulovou hodnotu γ , i když data vycházela z lineárního vztahu.



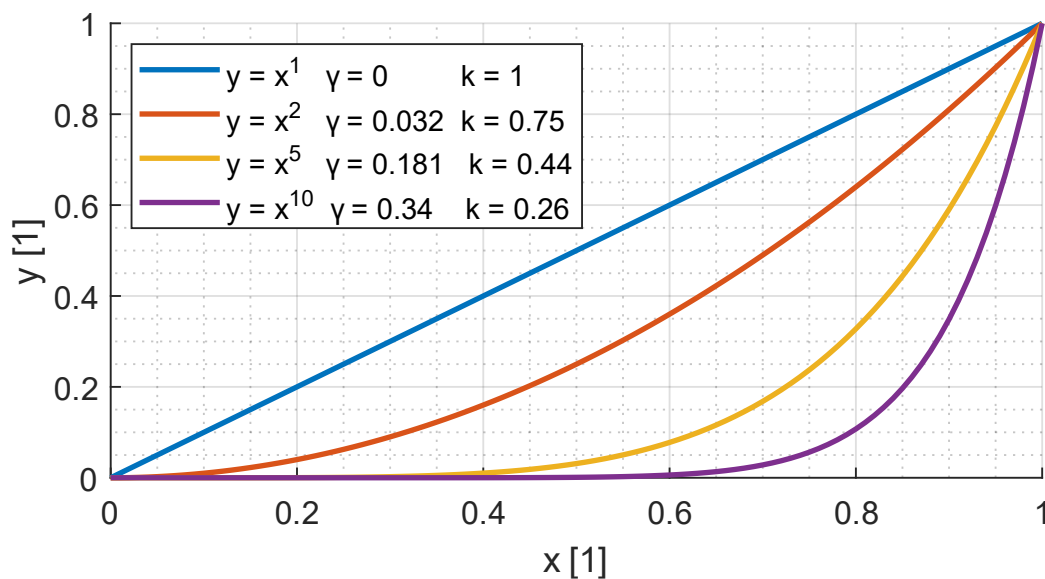
Obr. 18 Nelinearita šumu

Data v sobě mají šum. Nenulová γ naznačuje nelinearitu i když je vztah lineární. Pro použití koeficientu nelinearity u dat se šumem by se musel šum vyfiltrvat, aby byl výsledek přesnější.

Šum v simulovaných průbězích sil není. Průběhy se většinou podobají monotónním polynomům. V tomto případě je tedy γ užitečnou metrikou nelinearity.

4.2 Hodnocení průměrné tuhosti nelineárního průběhu síly

Proložení celého průběhu síly přímkou metodou nejmenších čtverců dostaneme přímku procházející počátkem. Z ní se dá snadno získat její směrnice. Tato směrnice umožňuje vyjádření tuhosti nelineárního průběhu síly jedním číslem. Může být použita k jednoduchému porovnání průběhů sil, aniž by se muselo dívat na celý průběh. V této práci je koeficient linearizované tuhosti značen písmenem „ k “. Hodnota k je kladná, jestliže při vychýlení dojde k vyvolání síly v opačném směru.



Obr. 19 Linearizovaná tuhost a nelinearita polynomů

S rostoucím stupněm polynomu roste γ , linearizovaná tuhost k klesá. Dostaneme tak více nelineární průběh, ale za cenu nižší průměrné síly.

5 Analýza vlivu parametrů na průběh síly pružiny

Kapitola se zabývá vlivem parametrů jako jsou rozměry a pozice magnetů na průběh síly pružiny. Při analýze se mění 1, nebo více parametrů a ostatní parametry mají rozměry základní sestavy viz. Obr. 8.

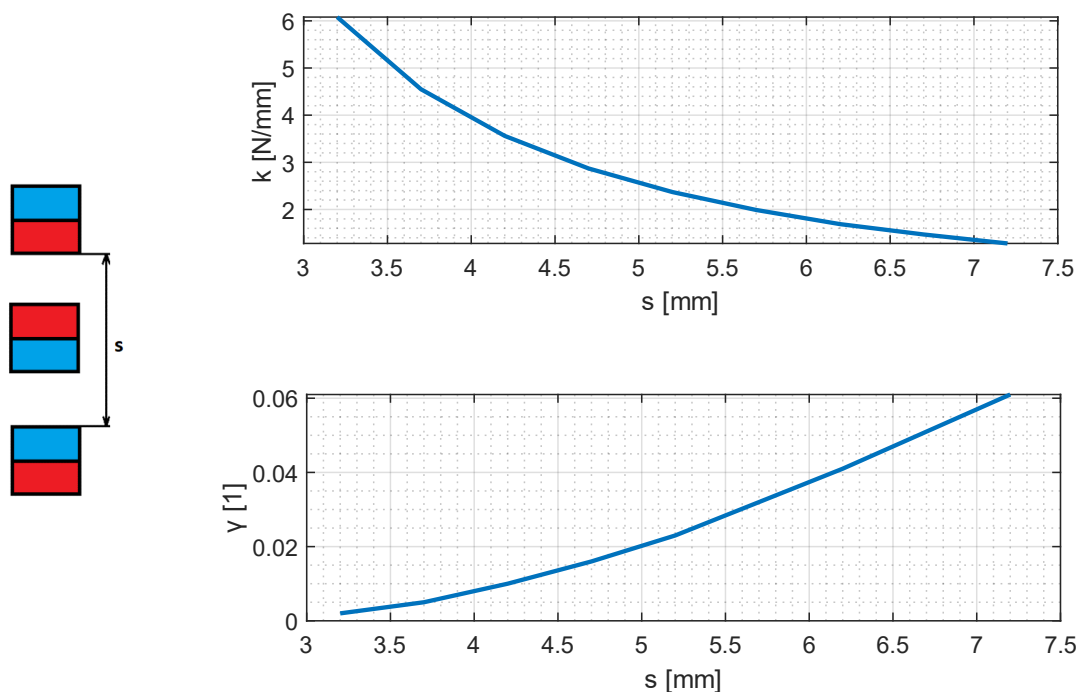
Průběh síly je hodnocen koeficienty nelinearity a linearizované tuhosti viz. kapitola 4. Nelineární průběh síly může rozšířit pásmo frekvencí, při kterých má energy harvester vysokou účinnost. Vyšší nelinearita by tak mohla být užitečná. Co se týče tuhosti, je nežádoucí, aby byla záporná. To by znamenalo, že se k sobě magnety přitahují a pružina by dobře nekmitala.

5.1 Změna polohy magnetů

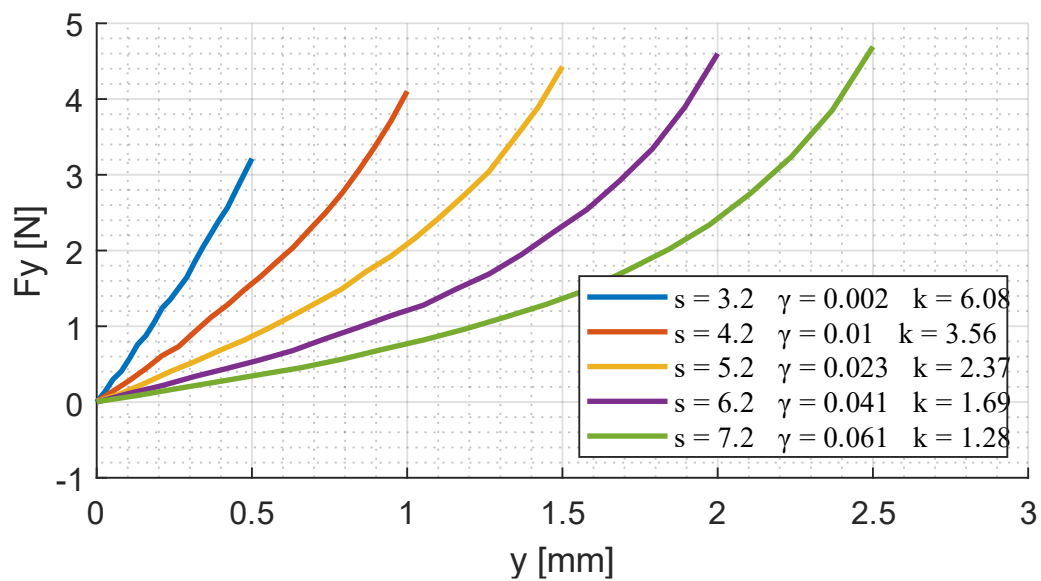
Poloha magnetů má velký vliv na průběh síly. V praxi by se tyto parametry daly lehce změnit při vhodné konstrukci pružiny, aniž bychom museli měnit magnety. Poloha magnetů se dá také zvolit libovolně, oproti např. velikosti magnetů, ve které jsme více limitováni dostupnými magnety.

5.1.1 Změna mezery statických magnetů

S rostoucí mezerou roste nelinearita a klesá tuhost. Tuhost se však snižuje kvůli zvětšení maximální výchylky, nikoliv kvůli poklesu maximální síly. Maximální síla asymptoticky roste viz. Obr. 21. Není vhodné použít malou mezeru. Průběh je příliš lineární a maximální síla je nízká.



Obr. 20 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na mezeře statických magnetů



Obr. 21 Závislost síly pružiny na vychýlení pro různé mezery statických magnetů

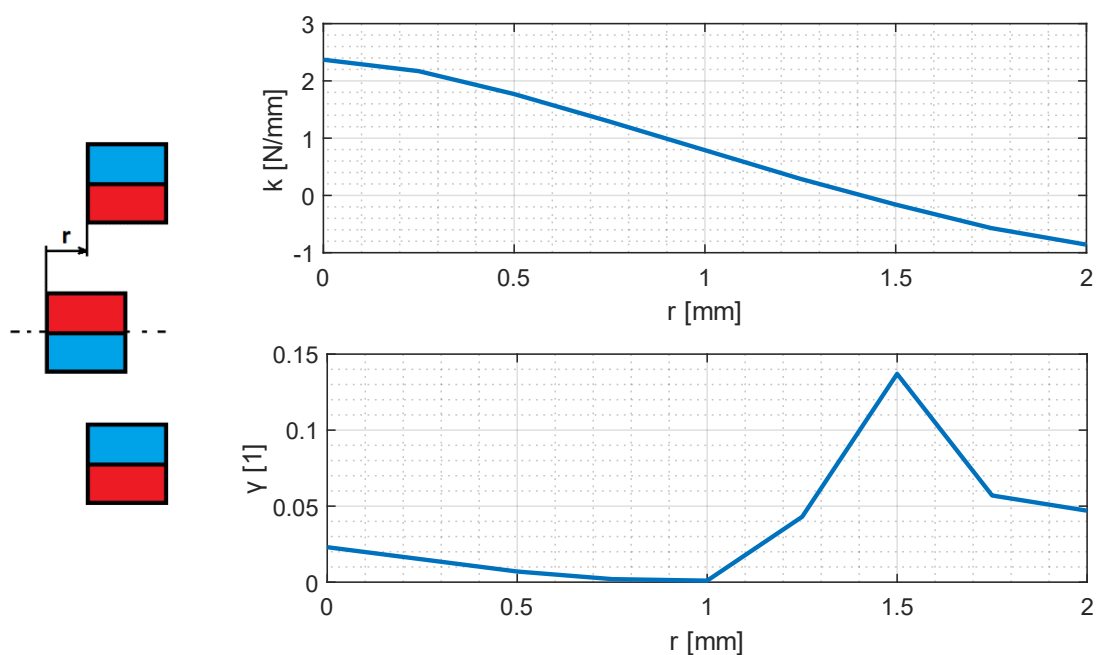
Pro graf obr. 19 platí: $[s] = \text{mm}$, $[k] = \text{N/mm}$

Pro lepší představu byly vykresleny průběhy sil pro různé mezery statických magnetů. Jelikož se mění maximální výchylka, je vhodné brát v úvahu i maximální sílu.

5.1.2 Posunutí statických magnetů

Posunutí statických magnetů snižuje tuhost, která je při velkém posunutí dokonce záporná. Se zápornou tuhostí by se měly magnety snahu přilepit k sobě, což je pro kmitání nepoužitelné. Zajímavé je, že při posunutí 1 mm, což je polovina šířky magnetu, dostaneme velmi lineární průběh.

S dostatečně velkým posunutím by rotační magnet neměl omezenou maximální výchylku a celkový průběh síly by vypadal jinak. U simulovaných hodnot je však průběh pro kmitání nevhodný.



Obr. 22 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na posunutí statických magnetů

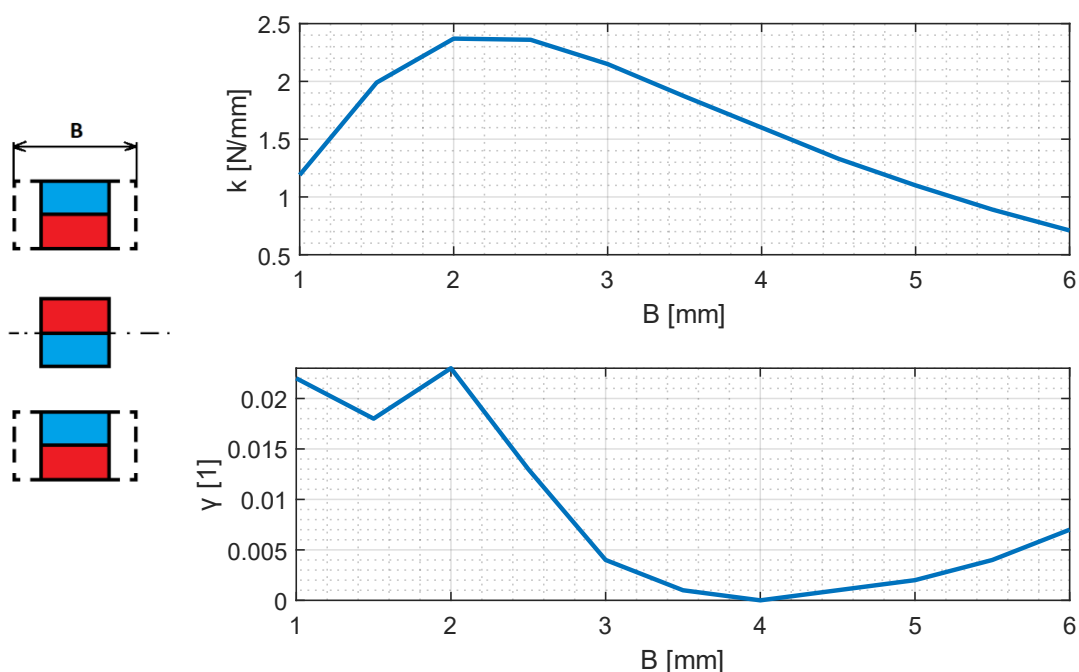
5.2 Změna statických magnetů

Dalším krokem po změně polohy magnetů je změna statických magnetů. Nabízí se zjistit, zda rozdíl velikostí statických magnetů a pohyblivého magnetu přinese „užitečný“, nebo použitelný průběh síly oproti stejné velikosti všech magnetů.

5.2.1 Změna šířky statických magnetů

Nejvyšší nelinearitu i tuhost dostaneme při základní šířce 2 mm. Pro nelineární průběh s rozumně velikou tuhostí není změna šířky statických magnetů užitečná.

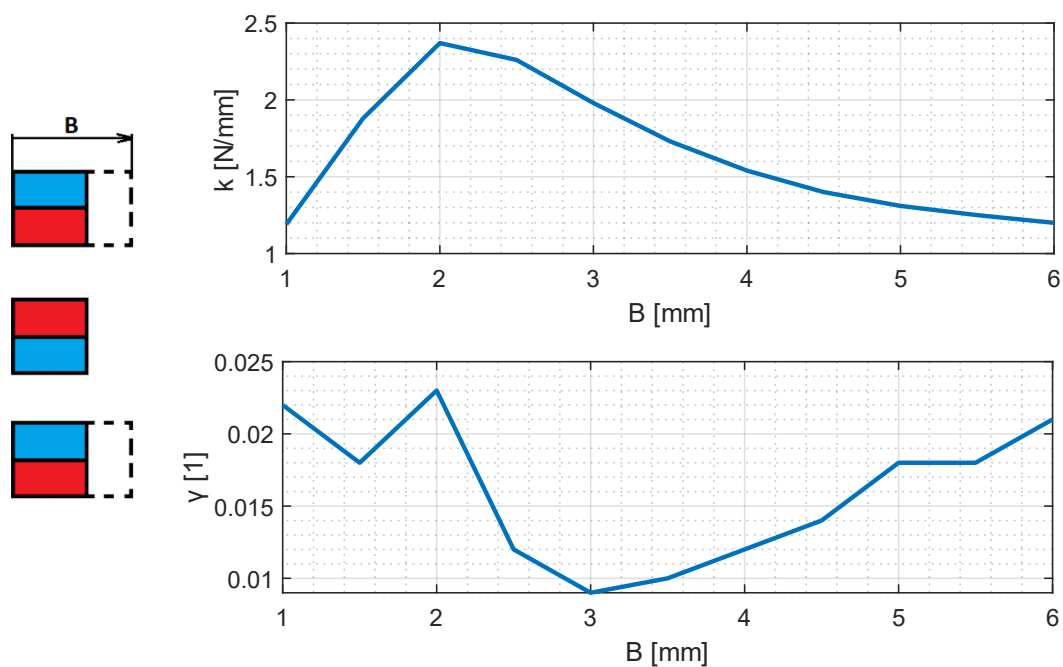
Pro šířku 1 mm a 5 mm je tuhost srovnatelná, ale nelinearita se výrazně liší. Situace by se dala využít k porovnání lineárního a nelineárního průběhu síly při zachování stejné linearizované tuhosti. Při šířce 4 mm je průběh lineární.



Obr. 23 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce statických magnetů

5.2.2 Změna šířky statických magnetů asymetricky

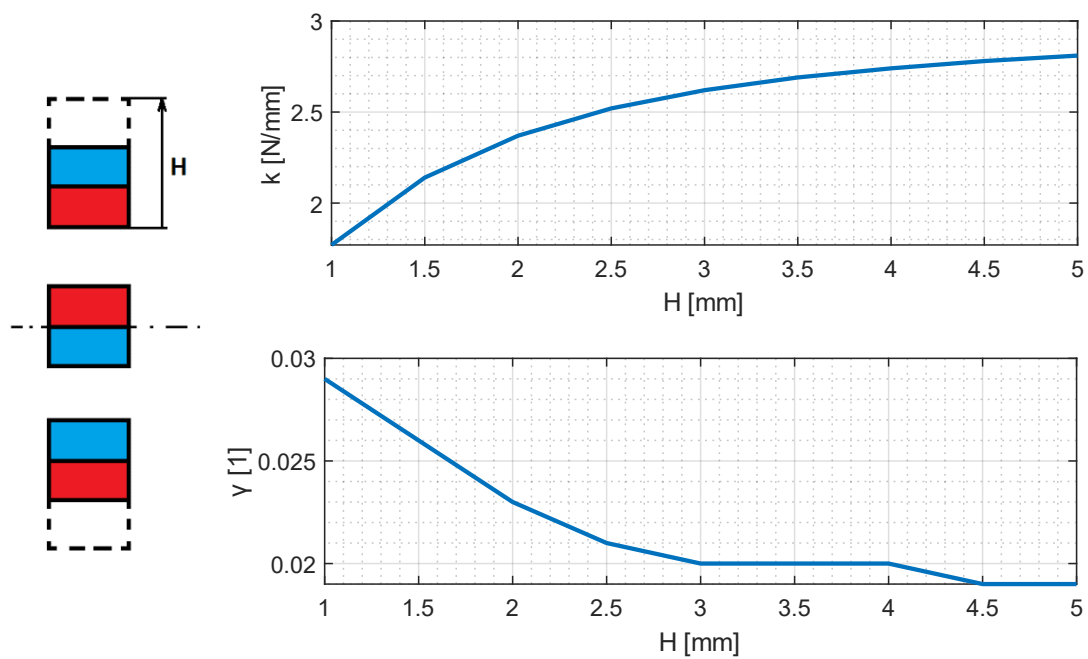
Při rozšiřování statických magnetů v 1 směru má tuhost i nelinearita maximum opět u šířky 2 mm. Pro jiné šířky je však oproti symetrickému rozšiřování tuhost i nelinearita vyšší. U šířky 1 mm a 6 mm jsou tuhost i nelinearita kupodivu totožné.



Obr. 24 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce statických magnetů asymetricky

5.2.3 Změna výšky statických magnetů

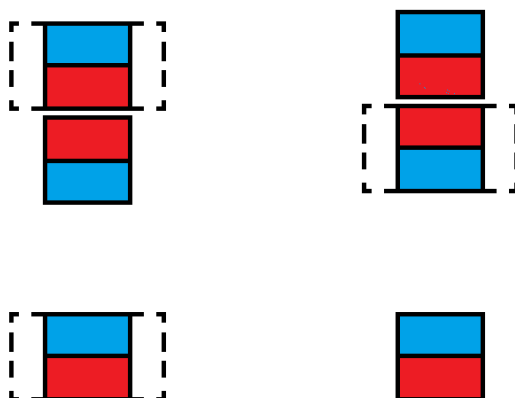
Při zvětšování výšky statických magnetů tuhost asymptoticky roste, nelinearita se naopak snižuje. Můžeme si zvolit vyšší tuhost za cenu nižší nelinearity, nebo naopak, což by mohlo být užitečné. Pro výšku 1 mm dostaneme velmi vysokou nelinearitu. Tuhost je však relativně nízká.



Obr. 25 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na výšce statických magnetů

5.3 Změna pohyblivého magnetu

Po změně statických magnetů se nabízí změna pohyblivého magnetu. Obě změny parametrů by pak bylo vhodné porovnat. Při přiblížení pohyblivého magnetu ke statickému by měla být síla v obou situacích podobná. Jediným rozdílem je totiž 2. statický magnet, který je od ostatních magnetů relativně daleko.



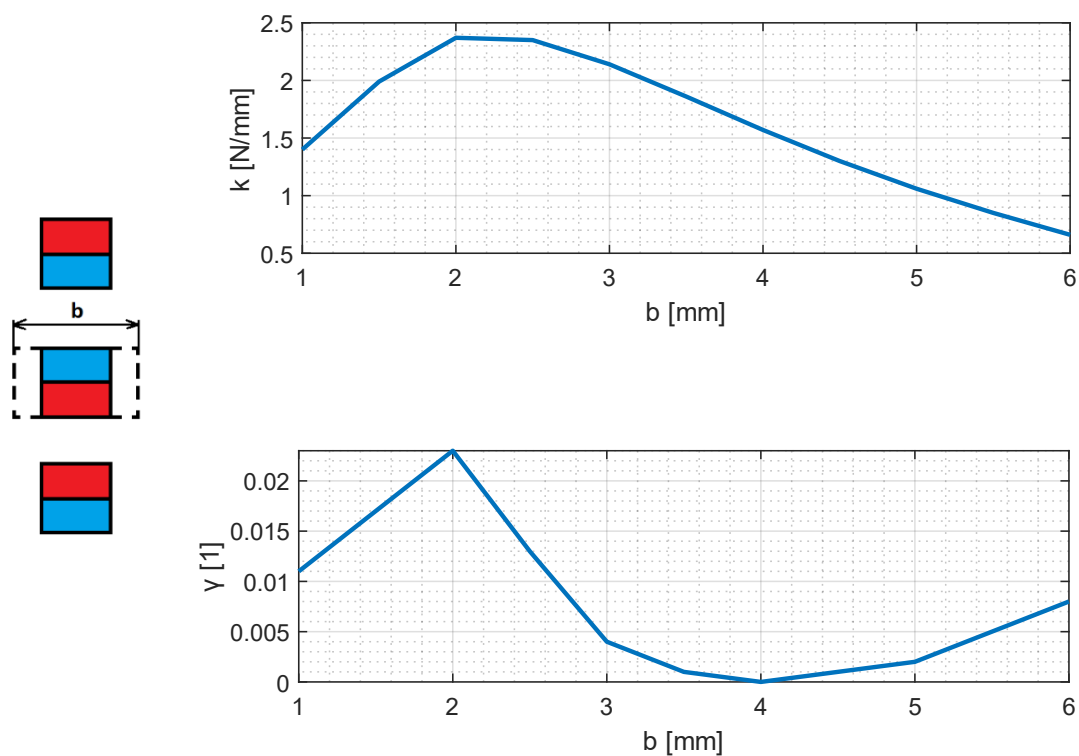
Obr. 26 Změna statických magnetů a změna magnetu pohyblivého

Bez dolního magnetu, který má na sílu menší vliv, se v podstatě jedná o stejnou úlohu.

5.3.1 Změna šířky pohyblivého magnetu

Změna šířky pohyblivého magnetu dosahuje snížení nelinearity i tuhosti. Koeficienty mají nejvyšší hodnotu opět pro šířku 2 mm. Stejně jako u změny šířky statických magnetů je průběh síly lineární u šířky 4 mm.

Tuhost a nelinearita jsou podobné, jako u změny šířky statických magnetů. Podle konstrukce pružiny by mohlo být vhodnější měnit 1 rotační magnet než 2 statické.

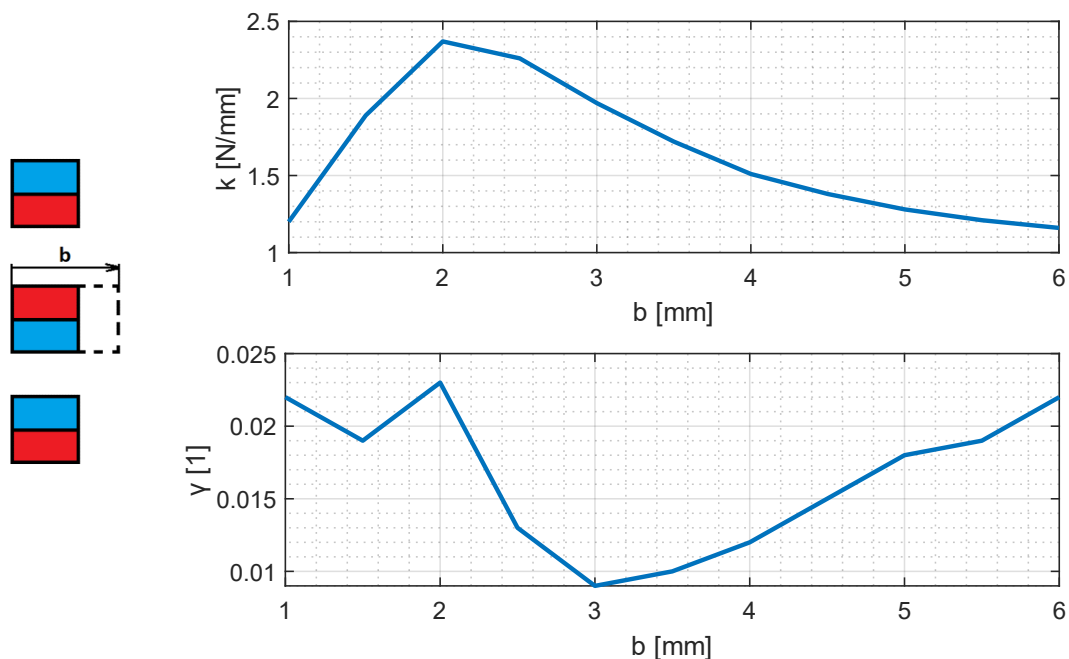


Obr. 27 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce pohyblivého magnetu

5.3.2 Změna šířky pohyblivého magnetu asymetricky

Rozšiřování pohyblivého magnetu v 1 směru má stejné výsledky jako u statických magnetů: Maximum tuhosti a nelinearity je u šířky 2 mm. Pro jiné šířky je oproti symetrickému rozšiřování tuhost i nelinearita vyšší. U šířky 1 mm a 6 mm jsou průběhy totožné.

Vzhledem k tomu, že jsou průběhy stejné jako u statických magnetů si můžeme vybrat, zda měnit 1 rotační magnet, či 2 statické.



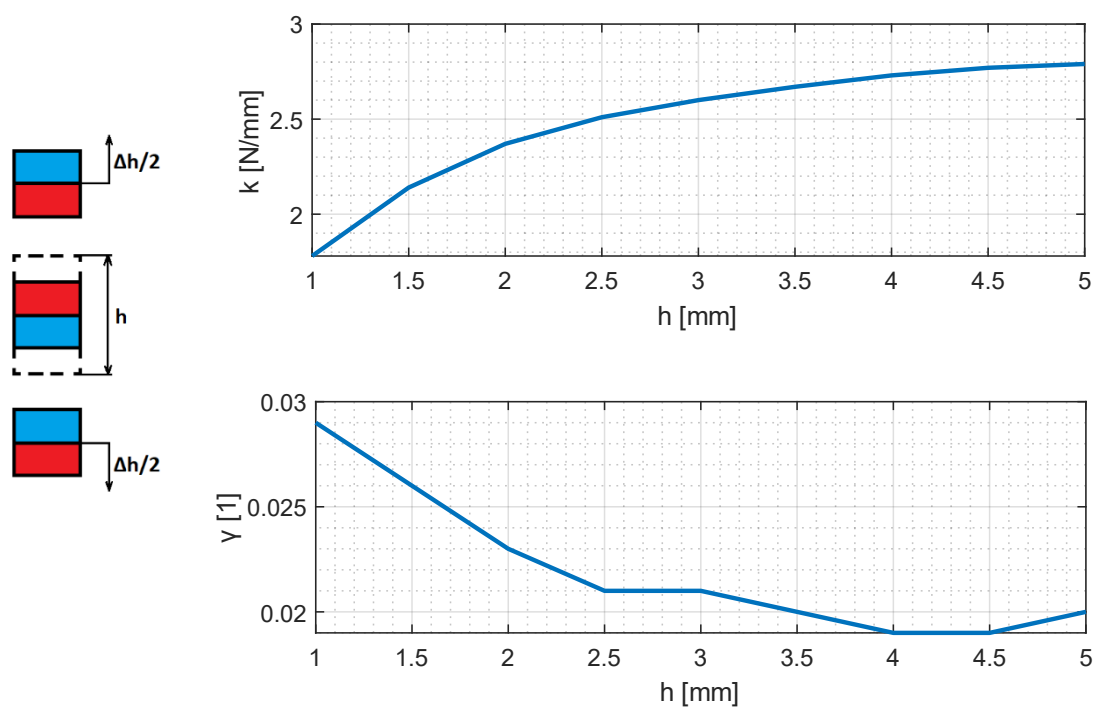
Obr. 28 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce pohyblivého magnetu asymetricky

5.3.3 Změna výšky pohyblivého magnetu

Zvětšování výšky pohyblivého magnetu při zachování stejné maximální výchylky má stejné výsledky jako u statických magnetů:

Tuhost asymptoticky roste, nelinearita se naopak snižuje. Můžeme si zvolit vyšší tuhost za cenu nižší nelinearity, nebo naopak, což by mohlo být užitečné. Nejvyšší nelinearita je u nejnižší výšky 1 mm, tuhost je však relativně nízká.

Vzhledem ke stejným průběhům jako u statických magnetů si můžeme vybrat, zda měnit 1 rotační magnet, či 2 statické.



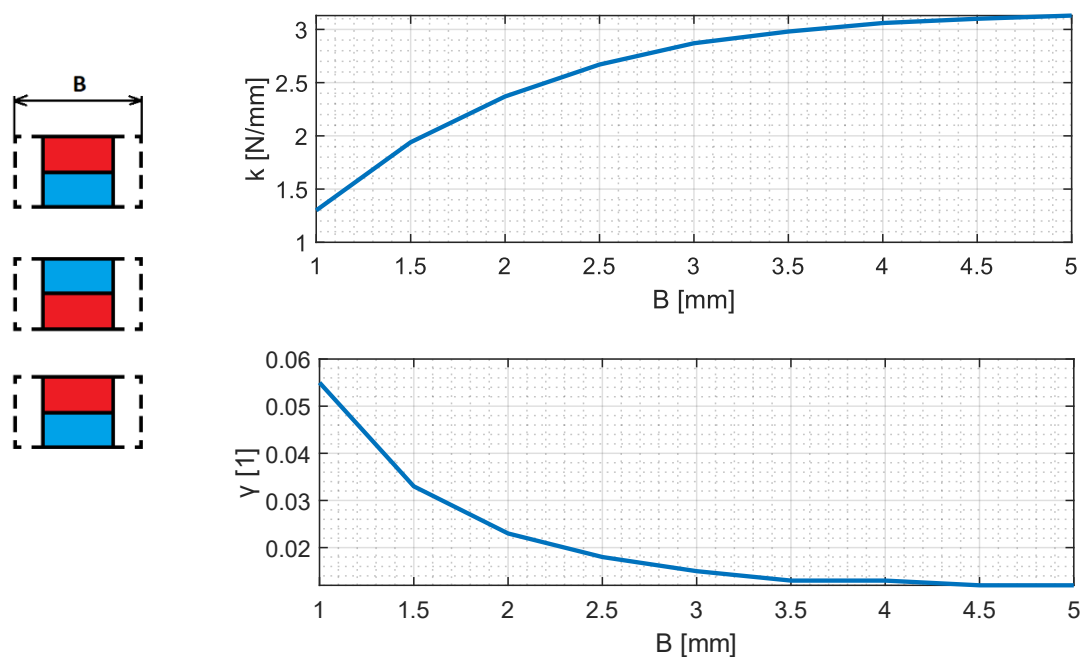
Obr. 29 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na výšce pohyblivého magnetu

5.4 Současná změna všech magnetů

Po změně 1 typu magnetu se nabízí změnit všechny magnety najednou. Dále by bylo vhodné srovnat tuto změnu se změnou pouze 1 typu magnetu.

5.4.1 Změna šířky všech magnetů

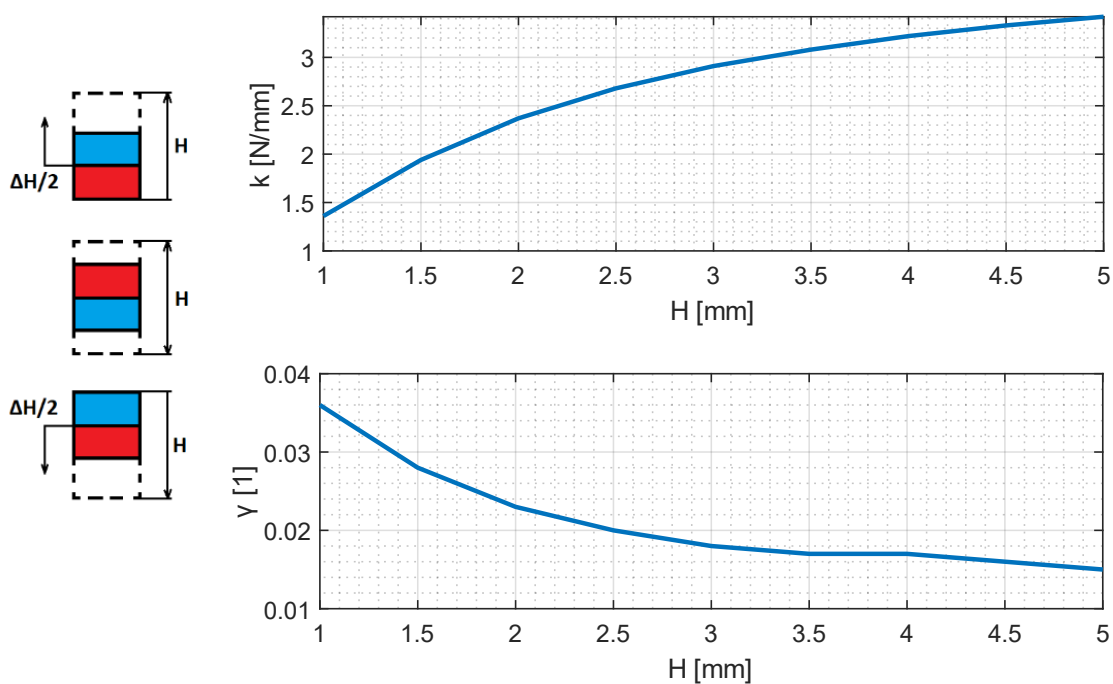
Pro současnou změnu všech šířek dostáváme zatím nejužitečnější průběhy, co se týče vysoké nelinearity i tuhosti. Oproti změně pouze 1 typu magnetů je zde vyšší tuhost i nelinearita. Nejvíce se to projevuje u šířky 1 mm, kde je o 10 % vyšší tuhost a dvojnásobná nelinearita.



Obr. 30 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce všech magnetů

5.4.2 Změna výšky všech magnetů

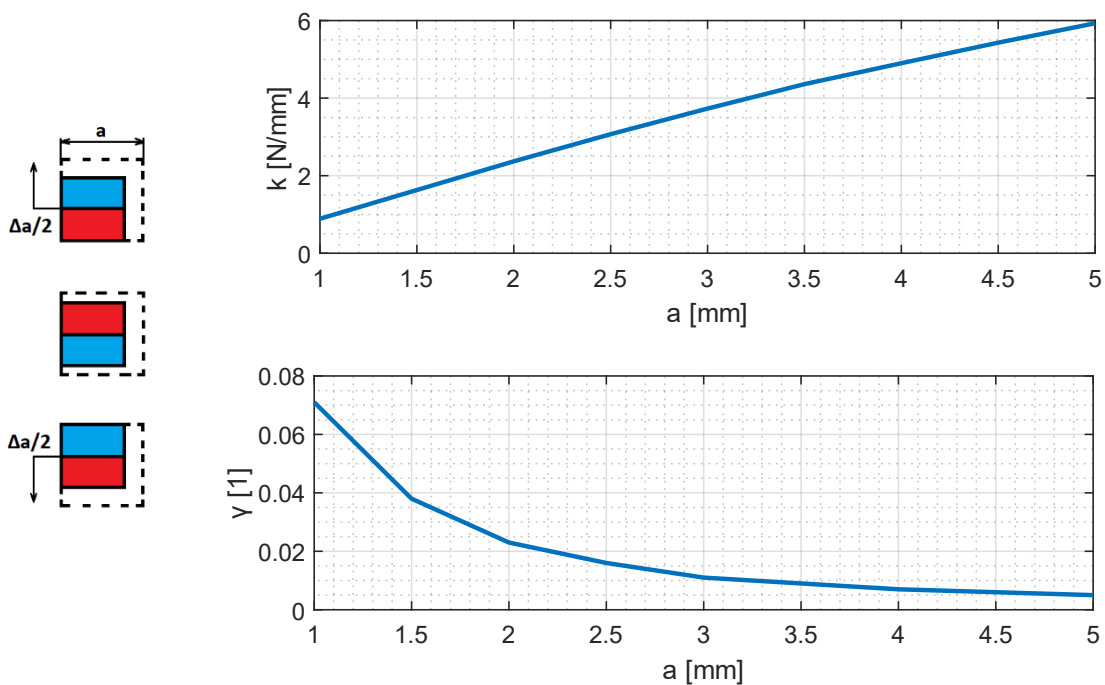
Při zvětšování výšky všech magnetů a zachování stejné maximální výchylky dostaneme podobně chování, jako při zvyšování výšky 1 typu magnetu. Můžeme zvýšit nelinearitu za cenu snížení tuhosti a naopak. Zde je vyšší maximum nelinearity i tuhosti pro stejné rozmezí výšek. Tohoto maxima by se těžko dosahovalo u změny pouze 1 typu magnetu, neboť se blíží k nižší hodnotě. Pro nižší požadované hodnoty tuhosti a nelinearity je úspornější měnit pouze pohyblivý magnet.



Obr. 31 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na výšce všech magnetů

5.4.3 Změna délky hrany čtvercového průřezu magnetů

Pro délky hran 1 mm dosahuje průběh zatím nejvyšší nelinearity, tuhost je však velmi nízká. S rostoucí délkou hrany dále nelinearita rapidně klesá, zatímco tuhost se zvyšuje téměř lineárně.



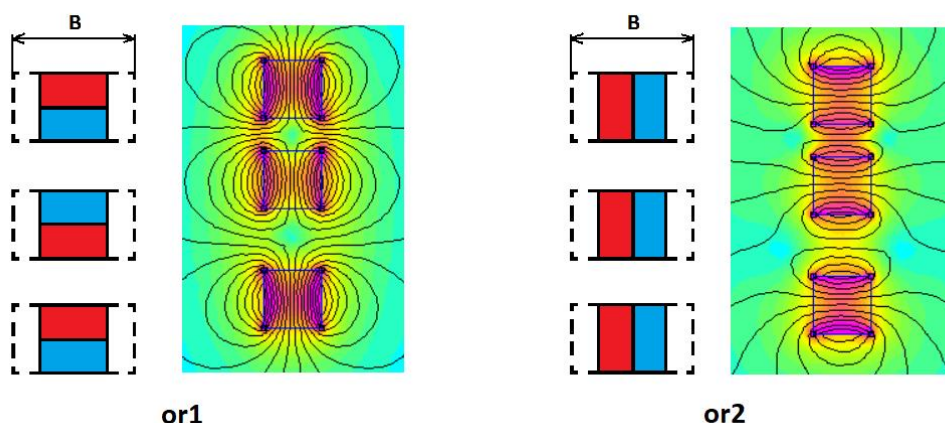
Obr. 32 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na délce hrany všech magnetů

5.5 Změna orientace magnetů

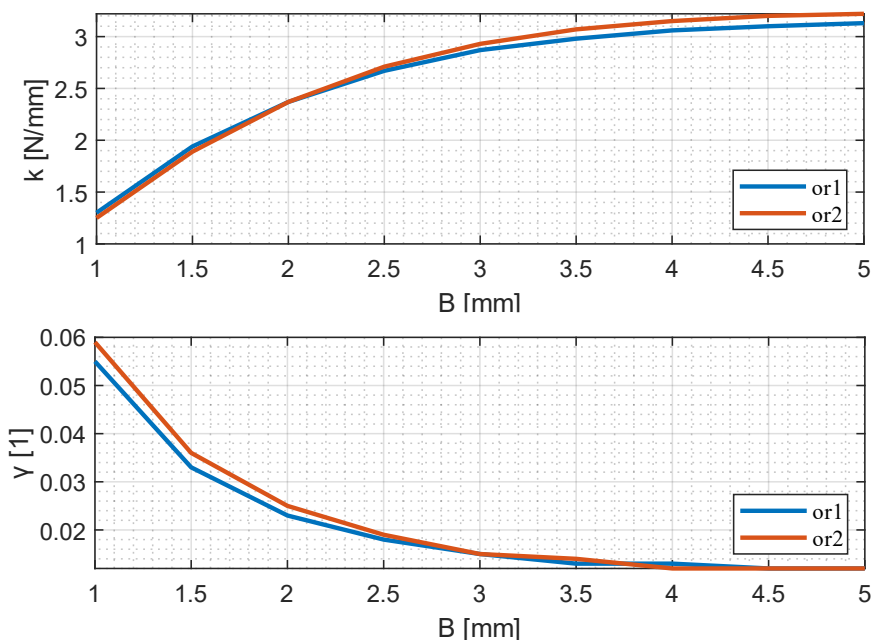
Dále byla změněna orientace magnetů. Magnety byly otočeny o 90° tak, aby se navzájem odpuzovaly viz. Obr. 33. Účelem bylo zjistit, zda by pružina s novou orientací kmitala, a jaký vliv bude mít změna na nelinearitu a linearizovanou tuhost. Nová orientace 2 se porovnála s původní orientací 1.

5.5.1 Změnu šířky všech magnetů s jinou orientací

Nejdříve byla měněna šířka všech magnetů s novou orientací. Bylo očekáváno, že se při změně tohoto parametru budou magnety stále odpuzovat a pružina s touto orientací magnetů by tak bez problémů kmitala. Orientace 2 má oproti orientaci 1 o trochu vyšší tuhost i nelinearitu. Tento rozdíl je ale velmi malý a jinak jsou jejich průběhy stejné.



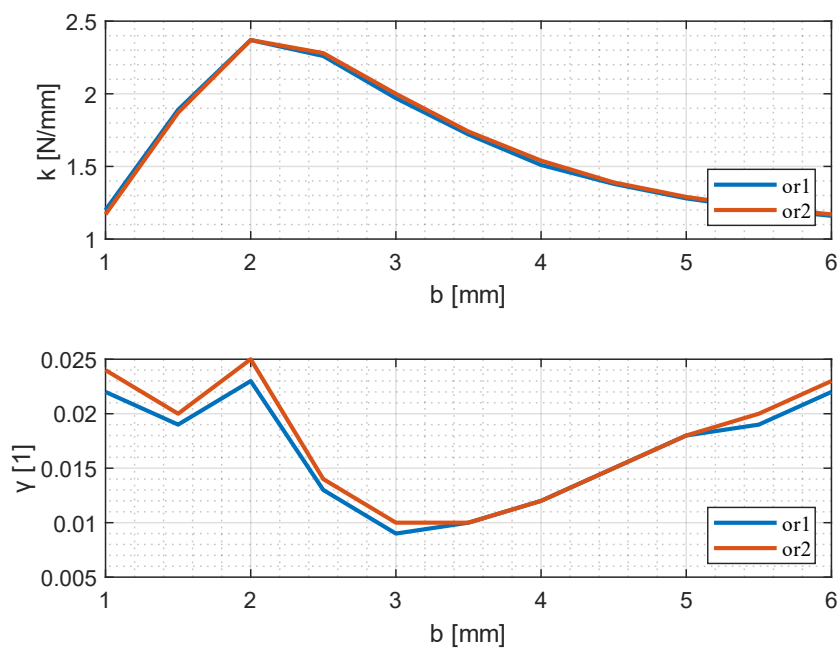
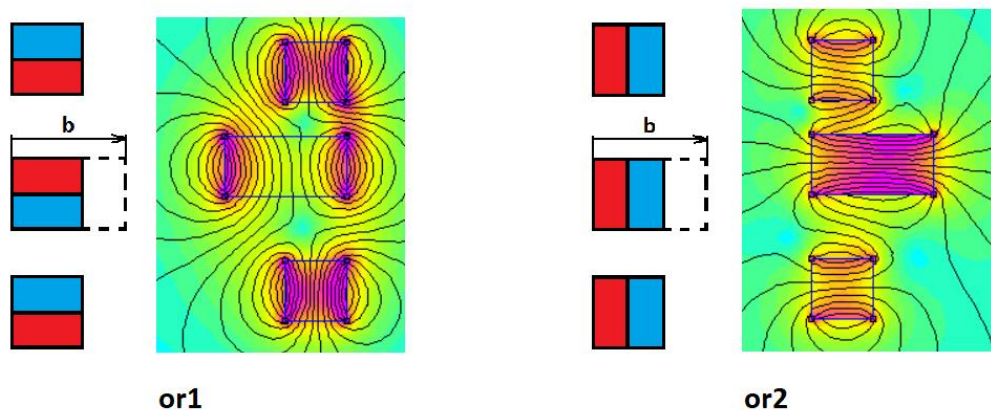
Obr. 33 Schéma orientace magnetů s vykresleným magnetickým polem



Obr. 34 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce všech magnetů obou orientací

5.5.2 Změna šířky pohyblivého magnetu asymetricky s jinou orientací

V předchozím případě byly tuhost i nelinearita pro obě orientace stejné. Nabízí se tedy otázka, kdy se budou lišit. Byla provedena simulace pro změnu šířky asymetricky. Magnetické pole se výrazně liší, tuhost i nelinearita jsou kupodivu téměř stejné.

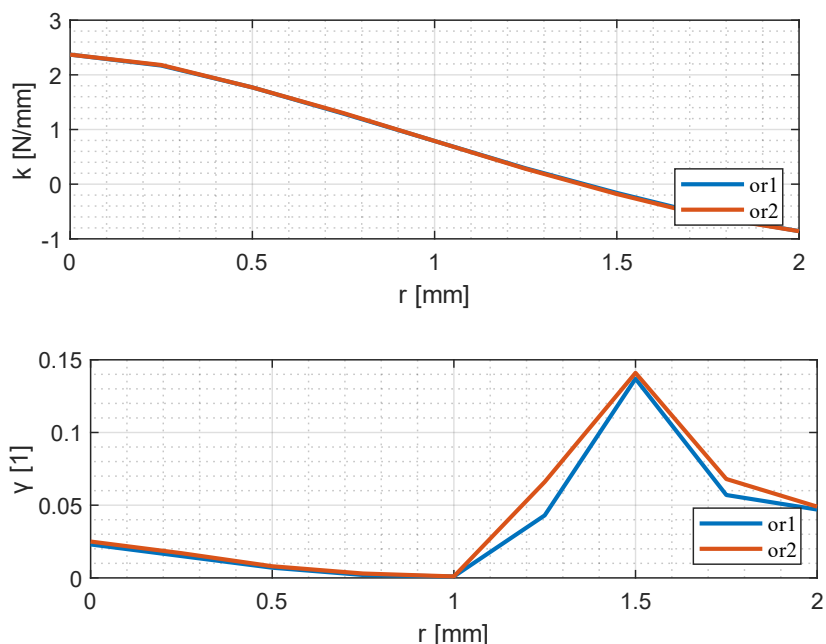
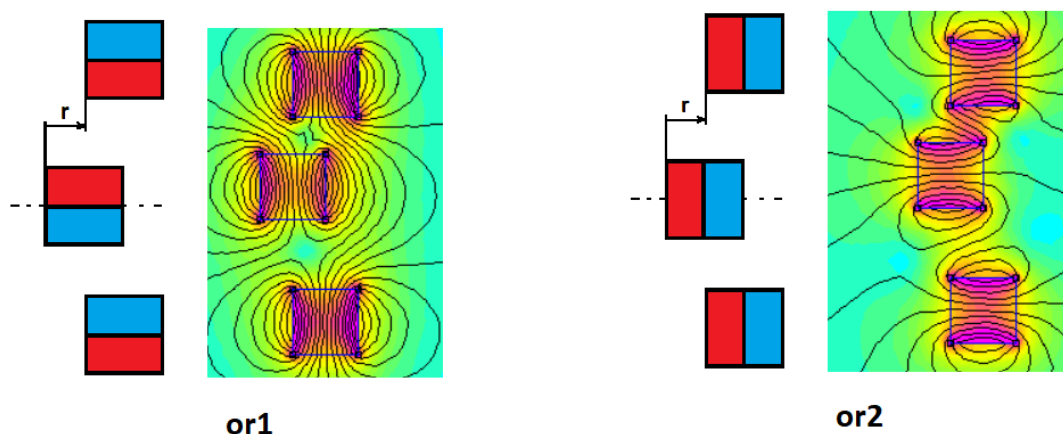


Obr. 35 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na šířce pohyblivého magnetu asymetricky obou orientací

5.5.3 Posunutí statických magnetů s jinou orientací

U orientace 2 by moha být pružina více nestabilní. Při posunutí magnetů kvůli nepřesnému vyrobení by se severní pól jednoho magnetu mohl přiblížit jižnímu pólu druhého magnetu. Na rozdíl od orientace 1 kde by byly v blízkosti stejné póly. S touto myšlenkou bylo simulováno posunutí magnetů obou orientací.

Tuhost je totožná. Nelinearita se liší až od posunutí většího než 1 mm a je dokonce vyšší než u orientace 1. Od posunutí 1 mm je však tuhost nízká a následně i záporná. Posunutí magnetů je zde nevhodné pro kmitání u obou orientací.

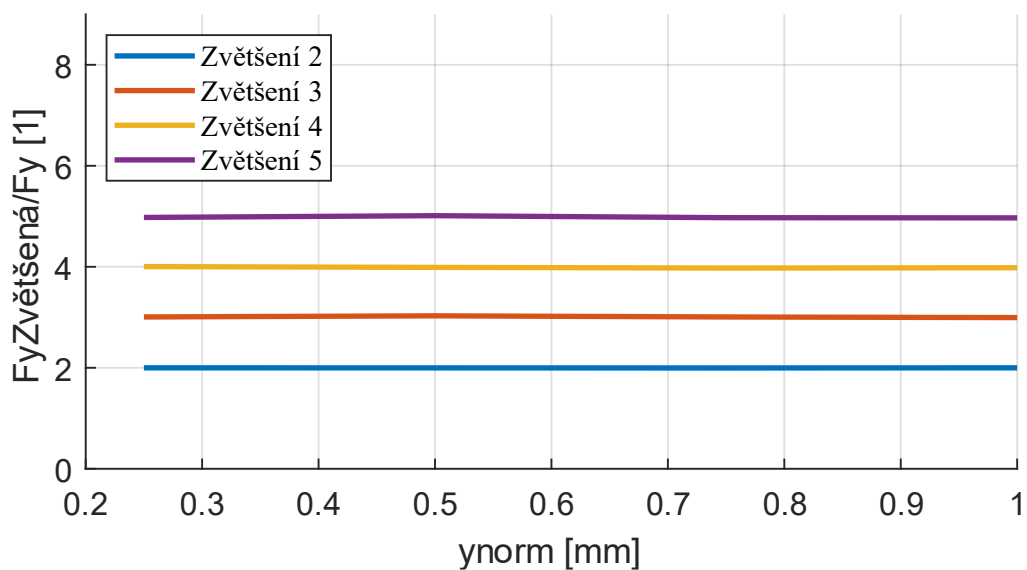


Obr. 36 Závislost nelinearity „ γ “ a linearizované tuhosti „ k “ na posunutí magnetů obou orientací

5.6 Vliv změny velikosti všech parametrů magnetů na průběh síly

Tato kapitola se zabývá otázkou, zda je mezi změnou velikosti všech parametrů a velikostí síly lineární vztah.

V kapitole 3 byla vytvořena základní sestava pružiny viz. Obr. 8. Všechny parametry 2D sestavy (bez hloubky) byly zvětšeny stejným faktorem. Simulovala se závislost podílu síly zvětšené sestavy ku síle základní sestavy. Zvětšením sestavy se zvětší i výchylka. Ta se pro porovnání normalizuje tak, aby bylo maximální vychýlená rovno 1. Z grafu této závislosti lze určit její linearitu.

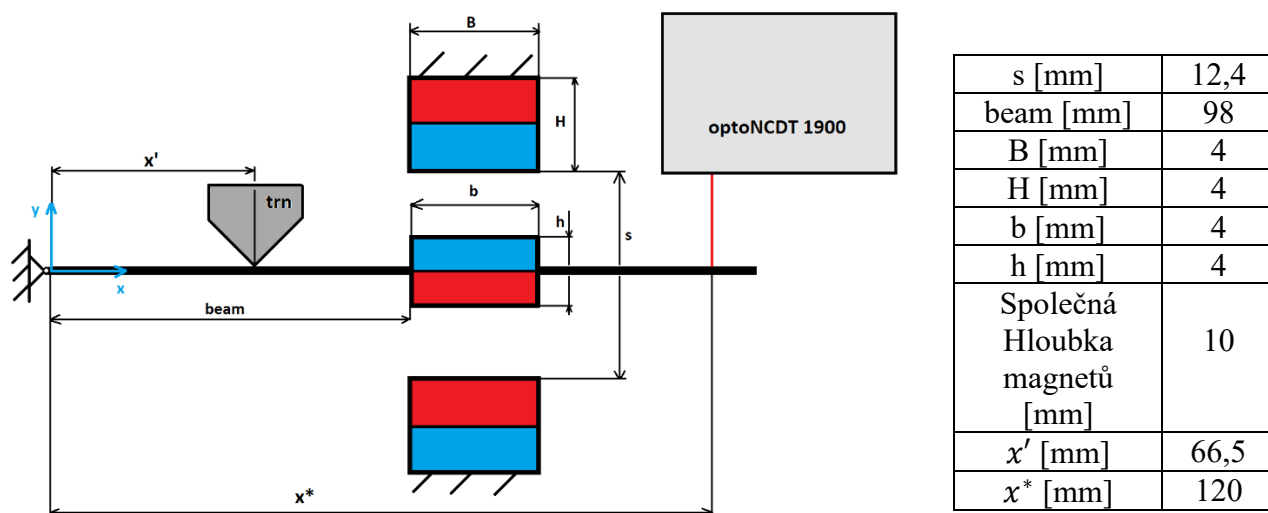


Obr. 37 Závislost zvětšení parametrů 2D soustavy na velikost síly

Z grafu je vidět, že závislost změny parametrů na velikost síly je lineární pro celý průběh síly a různá zvětšení. Pokud tedy nasimulujeme 1 typ sestavy. Při jejím zvětšení sílu nemusíme znovu simulovat.

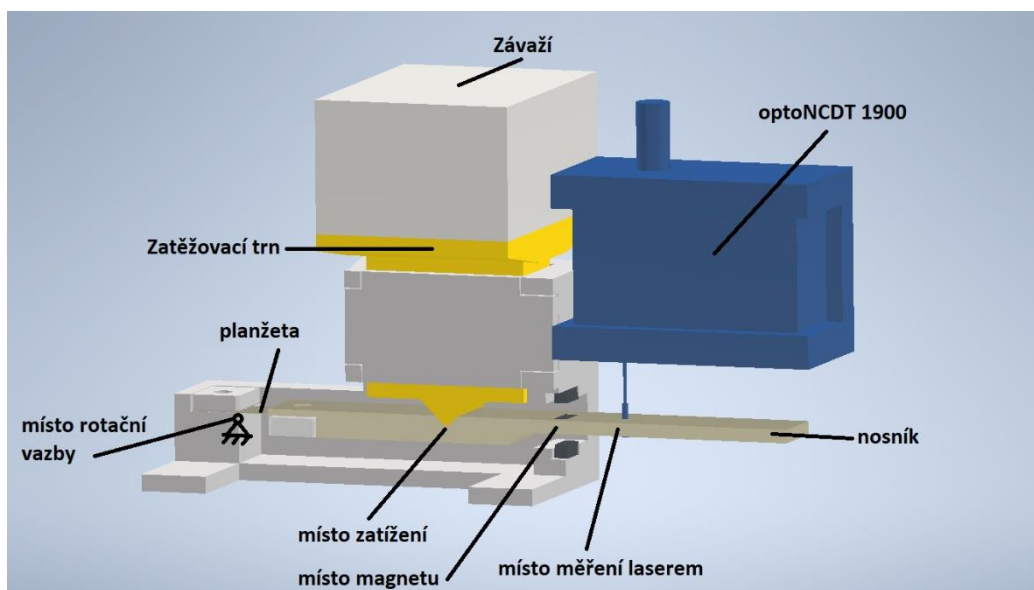
6 Výroba demonstračního zařízení pružiny a validace modelu

Rozměry demonstračního zařízení vycházejí ze základní soustavy viz Obr. 8. Byla vybrána větší mezera magnetů „s“, aby byl v měření lépe vidět nelineární průběh. Všechny rozměry, kromě hloubky, byly dále 2x zvětšeny pro snadnější konstrukci. Magnety velikosti 10x4x4 mm byly nahrazeny 2 magnety 10x4x2 mm danými na sebe. Výsledné rozměry jsou uvedeny níže viz. Obr. 38.



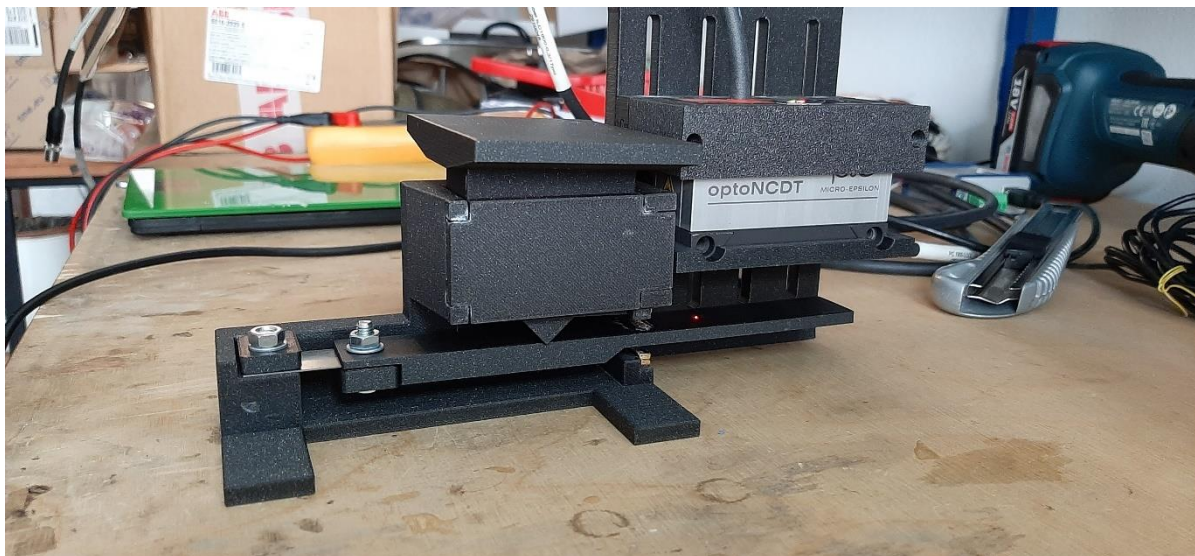
Obr. 38 Schéma demonstračního zařízení

Sestava demonstračního zařízení pro měření byla vymodelována v programu Autodesk Inventor. Pružina byla zatěžována závažím v určitém místě před magnety. Vychýlení bylo měřeno laserovým senzorem optoNCDT 1900-10 za magnety. Rotační vazba byla aproximována planžetou viz. Obr. 39.



Obr. 39 CAD model demonstračního zařízení v programu Autodesk Inventor

Díly sestavy byly následně vytištěny na 3D tiskárně. Planžeta byla připevněna šrouby, magnety byly přilepeny.



Obr. 40 Demonstrační zařízení

Měřené hodnoty zatížení a vychýlení byly přepočteny na místo magnetu, aby je bylo možné srovnat se simulací z programu FEMM 4.2.

Výpočet síly závaží:

$$F_{\text{závaží}} = m \cdot g$$

Přepočet síly závaží na sílu v místě magnetu:

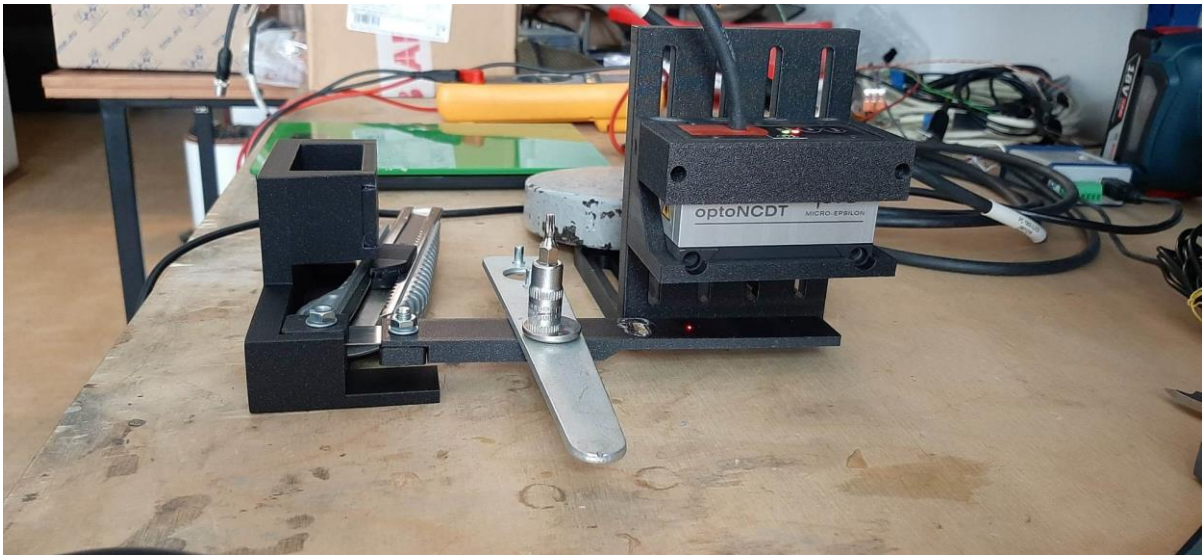
$$F = \frac{x'}{x} \cdot F_{\text{závaží}}$$

Přepočet vychýlení v místě laseru na vychýlení v místě magnetů:

$$y = \frac{x}{x^*} \cdot y_{\text{Laser}}$$

Kde F je síla v místě magnetu, x je vzdálenost od rotační vazby ke středu magnetů x' je vzdálenost od rotační vazby k místu zatížení, y je vychýlení v místě magnetu, x^* je vzdálenost od rotační vazby k místu měření laserem a y_{Laser} je vychýlení v místě laseru.

Tímto měřením se získá celková síla pružiny v místě magnetu. Pro výpočet síly magnetů musíme zohlednit tuhost planžety. Pro výpočet tuhosti planžety se provedlo měření. Nosník s planžetou byl vytočen mimo magnety a zatížen závažím. Laser měřil vychýlení. Bez trnu nebylo místo zatížení tak přesné.



Obr. 41 Demonstrační zařízení s vytočeným nosníkem pro měření tuhosti planžety

Změřené hodnoty byly přepočteny na hodnoty v místě magnetu. Byla spočtena tuhost:

$$k_p = \frac{F}{y} = \frac{0,67 \text{ N}}{3,9 \text{ mm}} = 0,17 \text{ N/mm}$$

Výpočet síly planžety v místě magnetu:

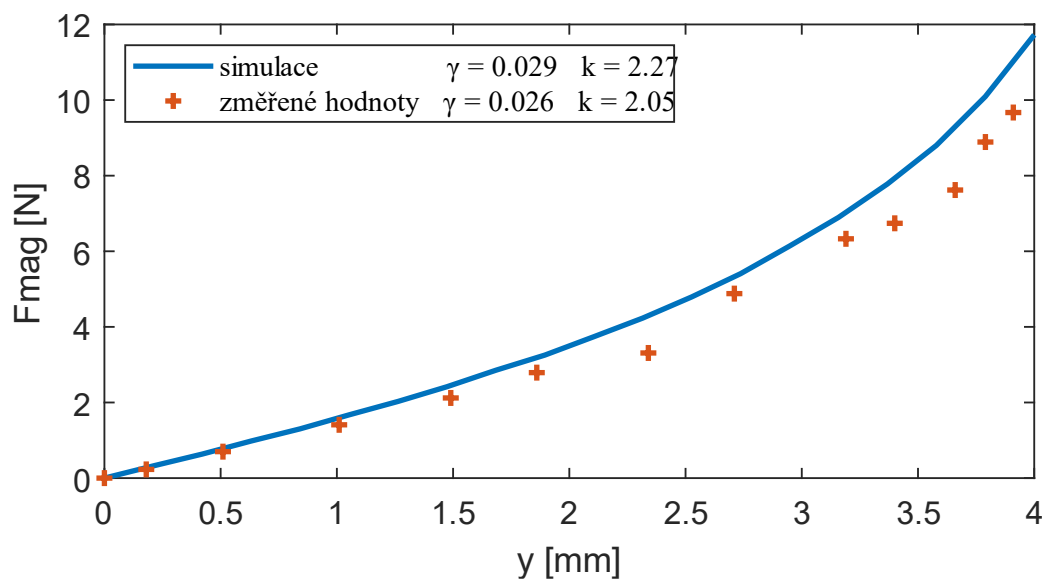
$$F_p = y \cdot k_p$$

Výpočet magnetické síly:

$$F_{mag} = F - F_p$$

Magnetická síla se následně porovnávala se simulovanou hodnotou viz. Obr. 42.

Měřená magnetická síla se srovnala se simulovanou hodnotou. Materiál magnetů demonstračního zařízení je NdFeB 50. Nejbližší materiál v programu FEMM 4.2 je NdFeB 52. Materiály mají podobné magnetické vlastnosti, materiál NdFeB 52 má však vyšší hodnotu BHmax, což má za následek o trochu vyšší sílu magnetu.



Obr. 42 Srovnání měřené síly se silou simulovanou programem FEMM 4.2

Průběhy jsou podobné a mají téměř stejnou nelinearitu. Data v sobě mají chybu způsobenou měřením, výpočet nelinearity není tedy tak přesný jako u simulace. Tuhost simulovaného průběhu je znatelně větší, což minimálně z části vysvětluje rozdíl materiálů použitých v simulaci a v demonstračním zařízení. Změřené hodnoty přibližně odpovídají hodnotám simulovaným.

7 Závěr

Práce se zabývala návrhem magnetické pružiny, která by se mohla uplatnit v energii harvesteru. Cílem bylo vytvořit parametrický model pružiny, zkoumat vliv těchto parametrů na průběh síly pružiny a validovat model demonstračním zařízením.

Pružina byla modelována v programu FEMM 4.2 metodou konečných prvků. FEMM byl spouštěn skriptem v Matlabu, ve kterém byly také definovány všechny parametry. Byly srovnány 2 typy simulace. Simulace 1 s translačním vychýlením a simulace 2 s úhlovým vychýlením, ve kterém odpovídá pohyb pružiny přesněji realitě. Simulace se příliš nelišily v síle ani momentu a daly by se považovat za totožné.

Kvůli jednoduchému hodnocení průběhu síly byly zavedeny koeficienty nelinearity a linearizované tuhosti. Dva koeficienty nahradí celý průběh síly, což je užitečné pro srovnání více průběhů.

V práci se pak zkoumal vliv změny parametrů na průběh síly. Většinou měl průběh síly s vysokou nelinearitou nízkou linearizovanou tuhost a naopak. Potenciálně užitečná změna parametru byla rozšiřování mezery statických magnetů, kde byla vysoká nelinearita. Nevhodná změna byla při posunutí pohyblivého magnetu od rotační vazby, kde došlo k záporné tuhosti, což by znemožnilo kmitání. Kromě parametrů pružiny byl také analyzován vliv změny orientace magnetů. Jiná orientace s otočenými magnety měla kupodivu stejnou hodnotu koeficientů jako orientace původní. Dále bylo ověřeno, že je mezi změnou velikosti všech 2D parametrů pružiny a velikostí průběhu síly lineární vztah.

Podle analýzy parametrů byly zvoleny rozměry demonstračního zařízení, které se následně vytisklo na 3D tiskárně. Pružina byla zatěžována trnem a vychýlení bylo měřeno laserovým senzorem optoNCDT 1900-10. Změřená magnetická síla přibližně odpovídala síle vypočtené a výpočtový parametrický model byl tak validován.

Použitá literatura

- [1] H. Tri Nguyen, D. A. Genov, and H. Bardaweel, “Vibration energy harvesting using magnetic spring based nonlinear oscillators: Design strategies and insights,” *Appl Energy*, vol. 269, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115102.
- [2] O. Rubes, J. Chalupa, F. Ksica, and Z. Hadas, “Development and experimental validation of self-powered wireless vibration sensor node using vibration energy harvester,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 160, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.107890.
- [3] S. Mohsen, A. Zekry, K. Youssef, and M. Abouelatta, “A Self-powered Wearable Wireless Sensor System Powered by a Hybrid Energy Harvester for Healthcare Applications,” *Wirel Pers Commun*, vol. 116, no. 4, pp. 3143–3164, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11277-020-07840-y.
- [4] T. Du *et al.*, “A Drill Pipe-Embedded Vibration Energy Harvester and Self-Powered Sensor Based on Annular Type Triboelectric Nanogenerator for Measurement while Drilling System,” *Adv Mater Technol*, vol. 7, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.1002/admt.202200003.
- [5] H. Liao *et al.*, “Modelling and Optimization of a Magnetic Spring Based Electromagnetic Vibration Energy Harvester,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 463–474, Jan. 2022, doi: 10.1007/s42835-021-00904-4.
- [6] W. Wang, H. Wei, and Z. H. Wei, “Numerical analysis of a magnetic-spring-based piecewise nonlinear electromagnetic energy harvester,” *Eur Phys J Plus*, vol. 137, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1140/epjp/s13360-021-02255-5.
- [7] Ú. Mechaniky Těles, M. A. Biomechaniky, and D. Práce, “FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING NELINEÁRNÍ ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE NONLINEAR ENERGY HARVESTING DEVICES AUTOR PRÁCE.”

Elektronické přílohy

- matlab skript **PrubehSily** vypočte průběh síly základní sestavy
- matlab skript **Nelinearita_Tuhost** vypočte nelinearitu a tuhost polynomů
- matlab skript **Scaling porovná průběh** síly po zvětšení sestavy
- matlab skript **SimulacePruzinyDemonstracnihoZarizeni**
- složka **RozdilSimulace12** obsahuje skripty dvou typů simulací
- složka **Parametry** obsahuje skripty pro různé změny parametrů pružiny
- složka **CAD_demonstracniZarizeni** obsahuje CAD modely a sestavu