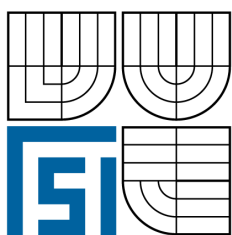


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

# SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

SIMULATION MODELLING OF ELECTROMAGNETIC VIBRATION POWER GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. BORIS NOVOSÁD

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/09

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Novosád Boris, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

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:

### **Simulační modelování elektromagnetického vibračního generátoru**

v anglickém jazyce:

### **Simulation Modelling of Electromagnetic Vibration Power Generator**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech s rozvojem bezdrátových technologií vzešel požadavek na vývoj pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro bezdrátové senzory, který nahradí doposud používané baterie. Jednou z možností je využití některé všudypřítomné formy okolní energie (solární energie, teplotní gradient, proudění tekutin, mechanická energie atd.).

Vibrační generátor je mechatronická soustava, která slouží k výrobě elektrické energie z mechanických vibrací a vytváří nezávislý zdroj elektrické energie pro napájení bezdrátových senzorů.

Cíle diplomové práce:

1. Vyhledejte v dostupných zdrojích informace o elektromagnetických vibračních generátorech a vypracujte analýzu současného stavu z hlediska návrhu a vývoje těchto zařízení.
2. Zhodnoťte možnosti simulačního modelování této mechatronické soustavy a vytvořte její model.
3. S využitím lineárního modelu vibračního generátoru vytvořte model elektrické části vibračního generátoru (usměrňovač, kondenzátor, odporová zátěž).
4. Na základě měření reálného vibračního generátoru identifikujte model tohoto vibračního generátoru.
5. Vytvořte komplexní model vibračního generátoru s elektrickou částí generátoru.
6. Ověřte parametry navrženého vibračního generátoru z hlediska generování maximálního výkonu pro dané vstupní parametry.

Roundy, S. J.: Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, Ph.D Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley CA, 2003.

Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.

Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

*P. Tucker*

व. वि. वि. वि. वि.

3

## Abstrakt

Táto práca sa zaoberá vytvorením komplexného virtuálneho modelu elektromagnetického vibračného generátoru. Model bude obsahovať mechanickú a elektroagnetickú časť ako aj model výstupného obvodu. Zostavený model bude implementovaný v prostredí Matlab/Simulink a jeho parametre budú identifikované tak, aby sa zhodovali s nameranými výsledkami.

**Kľúčové slová:** vibrácie, energy harvesting, elektromagnetický generátor, MATLAB/Simulink, virtuálny model

## Abstract

The aim of this work is to create complex virtual model of electromagnetic vibration generator. This model will include mechanical and electromagnetic subsystem and also the model of output circuit. Created model will be implemented in Matlab/Simulink enviroment and model parameters will be identified so that the compare of simulation and real results will be acceptable.

**Keywords:** vibrations, energy harvesting, electromagnetic vibration generator, MATLAB/Simulink, virtual model

### Bibliografická citácia:

NOVOSÁD, B. *Simulační modelování elektromagnetického vibračního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

## Čestné prohlášení

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracoval samostatne  
pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím uvedenej literatúry.  
Boris Novosád, Brno, 2009

## Poděkování

Za podporu, neoceniteľné rady a trpezlivosť ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph. D. a tiež ostatným ľuďom ktorý sa o vznik tejto práce pričinili. Ďalej by som chcel poďakovať všetkým ľuďom vďaka ktorým bude ostatných 5 rokov pre mňa navždy nezabudnuteľných.

---

# Obsah

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>                                                     | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>Formulácia problému a ciele práce</b>                        | <b>10</b> |
| <b>3</b> | <b>Vibračný generátor ako zdroj energie-možnosti, aplikácie</b> | <b>12</b> |
| 3.1      | Princíp vibračného generátora . . . . .                         | 12        |
| 3.1.1    | Elektromagnetický vibračný generátor . . . . .                  | 13        |
| 3.2      | Použitie vibračného generátora . . . . .                        | 16        |
| 3.3      | Konkrétne príklady vibračných generátorov . . . . .             | 20        |
| <b>4</b> | <b>Možnosti modelovania mechatronických systémov</b>            | <b>22</b> |
| <b>5</b> | <b>Vytvorenie modelu</b>                                        | <b>25</b> |
| 5.1      | Mechanická časť . . . . .                                       | 25        |
| 5.2      | Elektrická časť . . . . .                                       | 28        |
| 5.2.1    | Indukované napätie . . . . .                                    | 28        |
| 5.2.2    | Elektrické tlmenie . . . . .                                    | 29        |
| 5.2.3    | Vytvorenie závislosti $B_x = f(\varphi)$ . . . . .              | 30        |
| 5.2.4    | Model elektrickej časti . . . . .                               | 32        |
| 5.3      | Implementácia modelu do prostredia Simulink . . . . .           | 34        |
| <b>6</b> | <b>Identifikácia parametrov</b>                                 | <b>37</b> |
| 6.1      | Trenie . . . . .                                                | 37        |
| 6.2      | Tuhosť . . . . .                                                | 40        |
| <b>7</b> | <b>Výsledky</b>                                                 | <b>42</b> |
| 7.1      | Odozva na počiatočnú výchylku . . . . .                         | 42        |
| 7.2      | Ustálený stav . . . . .                                         | 45        |

|     |                                            |    |
|-----|--------------------------------------------|----|
| 7.3 | Určovanie optimálnych parametrov . . . . . | 48 |
| 8   | Možnosti ďalšieho vývoja modelu            | 50 |
| 9   | Záver                                      | 52 |
| 10  | Literatura a odkazy                        | 53 |
| 11  | Zoznam príloh                              | 56 |

---

# 1 Úvod

Prudký rozmach výpočtovej techniky v posledných 2 desaťročiach minulého storočia vytvoril vynikajúce predpoklady pre rozvoj elektronických radiacích systémov a senzorov. Vzhľadom k faktu že prenos informácií (v podobe elektrických signálov) bezdrôtovou cestou bol známy už relatívne dlhý čas, začali sa veľmi skoro objavovať prvé bezdrôtové senzory. Tieto zariadenia poskytovali dovtedy nevídanú slobodu pre ich umiestnenie, ktorá však bola istým spôsobom limitovaná potrebou ich zásobovania elektrickou energiou.

Napájanie týchto zariadení prostredníctvom káblových rozvodov bolo vo viacerých prípadoch obmedzujúce prípadne úplne nemysliteľné (vzdialenosť, prostredie ...), preto sa hľadali spôsoby riešenia tohoto problému. Napájanie prostredníctvom batérií nebolo úplne dostačujúce, problémom bola relatívne nízka životnosť a nutnosť ich pravidelnej výmeny.

Omnoho lepším riešením je využitie časti energie ktorá sa v rôznych formách vyskytuje v okolí. Systémy slúžiace práve na premenu takejto energie na energiu elektrickú sa súhrnne označujú pojmom „*energy harvesting*”. Ako prvá bola využitá solárna a veterná energia, s ktorou sa stretávame aj v bežnom živote (solárne kalkulačky, hodinky, ...). Toto riešenie je však vhodné len pre aplikácie v exteriéri, respektíve na viditeľných miestach. V technických sústavách sa ako oveľa zaujímavejšie ukázalo využitie vibrácií.

Vibrácie sú vo väčšine technických sústavách jav ktorý sa snažíme potlačiť, ale ich úplná eliminácia je prakticky nemožná, preto sa ich využitie v oblasti napájania senzorov dá chápať ako „z núdze cnosť”. Samozrejme, na to aby bolo možné generovať potrebný výkon musia tieto vibrácie spĺňať viacero kritérií (dostatočná amplitúda, tvar, prípadne frekvencia).

Okrem napájania bezdrôtových snímačov začínajú tieto zariadenia nachádzať uplatnenie aj v iných oblastiach kde sa vyžaduje autonómny zdroj elektrickej energie. Veľmi sľubné výsledky sú dosahované pri získavaní energie z ľudského pohybu, kde sa objavujú prvé zariadenia schopné napájať malé elektrické spotrebiče (prehrávače hudby, mobilné telefóny, ...).

Dá sa predpokladať, že vývoj vibračných generátorov (a obecné *energy harvesting* systémov) bude naďalej pokračovať a spolu s ich zlepšujúcimi sa parametrami sa objavia aj nové možnosti ich využitia.

---

## 2 Formulácia problému a ciele práce

Elektromagnetický vibračný generátor je sústava ktorá by sa z makroskopického hľadiska mohla rozdeliť na 2 základné časti: mechanickú a elektrickú. Obe tieto časti sú veľmi úzko prepojené a preto sa pri jeho návrhu a konštrukcii musia brať do úvahy nasledujúce faktory:

- **rezonančná frekvencia:** maximum získanej energie ako aj optimálnu premenu mechanickej na elektrickú energiu dosahuje tento typ vibračného generátora len v úzkom pásme okolo rezonančnej frekvencie.
- **komplexnosť systému:** parametre mechanickej a elektrickej časti sa navzájom veľmi podstatne ovplyvňujú. Ide o fakt, že generovaný elektrický výkon sa v sústave prejaví ako tlmenie, ktoré tak tvorí akúsi spätnú väzbu. Tá spôsobuje, že akákoľvek zmena v elektrickej časti sa prejaví aj na mechanickom pohybe. Napríklad pri zmene odporu záťaže sa zvýši tlmenie, čo znamená menšie amplitúdy výchylky, rýchlosti a zrýchlenia, a teda nižšie indukované napätie.

Práve kvôli komplexnosti je veľmi výhodné použiť pri návrhu jednotlivých parametrov simulčný model, pomocou ktorého je možné navrhnuť základné parametre (tuhosť, hmotnosť, optimálnu záťaž), a tiež testovať jeho chovanie za rôznych podmienok. Teda je možné napríklad skúmať vplyv pripojeného usmerňovača (prípadne iného elektrického obvodu) a na základe simulácií rozhodnúť o jeho optimálnych parametroch (kapacita filtračného kondenzátora, blokovacie napätie diód, ...). Môžeme tiež overiť vhodnosť použitia vibračného generátora pre jednotlivé aplikácie na základe odozvy modelu buď nameranými vibráciami. Na základe tejto motivácie je cieľom tejto práce:

- zostaviť model mechanickej a elektrickej časti vibračného generátora
- vytvoriť model pripojenej elektrickej záťaže (ohmická záťaž, usmerňovač, ...)
- porovnať chovanie modelu pri odozve na počiatočnú výchylku páky s hodnotami nameranými na reálnej sústave
- na základe predchádzajúceho modelu nájsť adekvátny model trenia v uložení čapu (radiálne aj axiálne trenie)
- porovnať chovanie modelu pri buzení harmonickými vibráciami (v ustálenom stave) s nameranými hodnotami

- 
- porovnať chovanie modelu pri buzení vibráciami nameranými v reálnej aplikácii s nameranými hodnotami
  - overiť vhodnosť simulačného modelu pre návrh optimálnych parametrov elektrickej časti

### 3 Vibračný generátor ako zdroj energie-možnosti, aplikácie

Vibračný generátor je súčasťou tzv. *Energy harvesting (Energy scavenging)* systémov, ktoré umožňujú získavanie energie zo svojho okolia a jej premenu na energiu elektrickú. Medzi najznámejšie takéto zdroje určite patrí solárna alebo veterná energia, ale možnosti sú omnoho širšie. V tab. (3.1) môžeme vidieť porovnanie jednotlivých zdrojov energie (vrátane konvečných zdrojov ako elektrárne alebo batérie).

|                   |                             | Energetická výťažnosť<br>( $\mu\text{W}/\text{cm}$ )<br>Za 1 rok | Energetická výťažnosť<br>( $\mu\text{W}/\text{cm}$ )<br>Za 10 rokov |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Energy harvesting | Solárna (exteriér)          | 15 000-priame slnko<br>150-zamračené                             | 15 000-priame slnko<br>150-zamračené                                |
|                   | Solárna (interiér)          | 6                                                                | 6                                                                   |
|                   | <b>VIBRÁCIE</b>             | <b>100-200</b>                                                   | <b>100-200</b>                                                      |
|                   | Akustický tlak              | 0,003@ 75 dB                                                     | 0,003@ 75 dB                                                        |
|                   | Denná zmena teploty         | 10                                                               | 10                                                                  |
|                   | Tepelný gradient            | 15 @ 10°C                                                        | 15 @ 10°C                                                           |
| Ostatné           | Jadrové zdroje              | 850 000(8% účinnosť)                                             | 850 000(8% účinnosť)                                                |
|                   | Batérie                     | 89                                                               | 7                                                                   |
|                   | Spalovanie ( $\mu$ -motory) | 403                                                              | 40.3                                                                |
|                   | Palivové články             | 560                                                              | 56                                                                  |

Tabuľka 3.1: Porovnanie výkonovej hustoty a životnosti jednotlivých zdrojov energie [6]

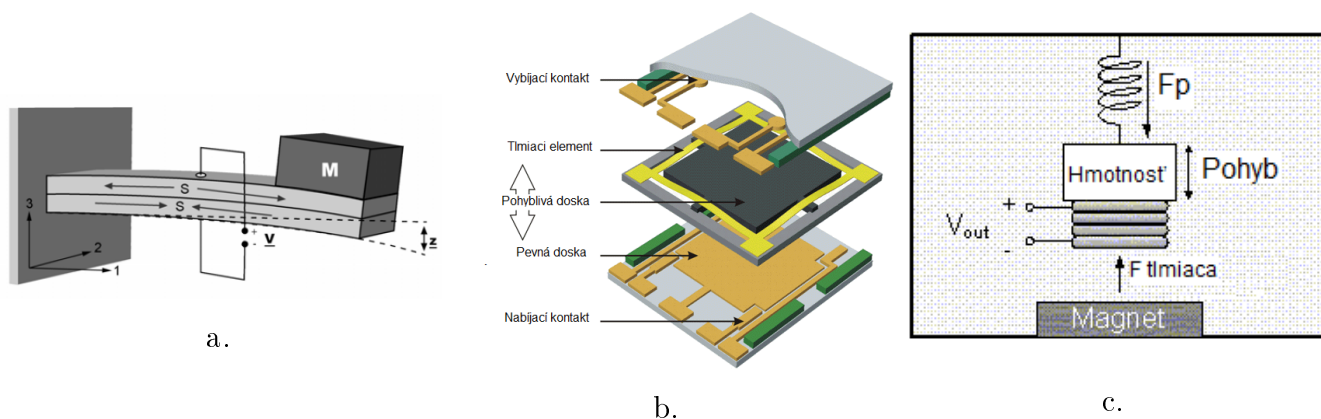
Na základe tohoto porovnania môžeme vidieť, že vibrácie môžu byť veľmi výhodným zdrojom energie pre bezdrôtové senzory s dostatočným generovaným výkonom, ale aj relatívne vysokou životnosťou a prevádzkovou spoľahlivosťou. Zároveň sa vibrácie ako parazitný jav vyskytujú v takmer každej (poháňanej) technickej sústave.

#### 3.1 Princíp vibračného generátora

Základným prvkom vibračného generátora je rezonančný mechanizmus. Jeho parametre musia byť naladené tak, aby bola jeho vlastná frekvencia blízka frekvencii budiacich vibrácií.

cií). Vybudený reálny pohyb sa premieňa na elektrickú energiu [1]. Na samotnú premenu sa súčasnej dobe používajú 3 základné princípy:

- **piezoelektrický princíp** (obr. (3.1a.)) - založený na deformácii piezokeramického nosníku (tvorí rezonačný mechanizmus) pri ktorej vzniká piezoelektrické napätie.
- **elektrostatický princíp** (obr. (3.1b.)) - v podstate ide o kondenzátor s premenlivou kapacitou (závislou na relatívnom pohybe elektród). Jeho nevýhodou je nutnosť inicializácie premeny t.j. nabitie kondenzátoru na nominálne napätie.
- **elektromagnetický princíp** (obr. (3.1c.)) - využíva indukcie napätia v cievke pohybujúcej sa v magnetickom poli. Aby sa odstránili problémy s pripojením vodičov k cievke, zväčša sa volí varianta stabilnej cievky a pohybujúcich sa magnetov [1].



Obr. 3.1: Rôzne princípy generovania el. energie [1],[7],[8]

Stručné zhrnutie výhod a nevýhod jednotlivých princípov je uvedené v tab. (3.2).

Pretože cieľom práce je modelovanie elektromagnetického vibračného generátora, bude sa v nasledujúci text venovať najmä jeho konštrukcii a použitiu, avšak väčšina zo spomenutých aplikácií je vhodná aj pre vibračné generátory založené na ostatných vyššie spomenutých princípoch. Práve preto je treba výber vhodného variantu pre konkrétne použitie zvážiť na základe dôkladnej analýzy požiadaviek (výkon, generované napätie, ...) a obmedzení (priestorové obmedzenia, ...).

### 3.1.1 Elektromagnetický vibračný generátor

Princíp činnosti tohoto typu generátora je v podstate totožný s princípom lineárneho elektrického generátora. Pri jeho návrhu treba hlavne vyriešiť tieto 3 základné konštrukčné uzly:

| Princíp           | Výhody/Nevýhody                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Piezoelektrický   | ✓ Vysoké generované napätie<br>✓ Frekvencia vibrácií od 100Hz do niekoľkých kHz<br>– Vysoký vnútorný odpor, malý prúd                                                                                       |
| Elektrostatický   | ✓ Veľký potenciál pre integráciu do MEMS štruktúr<br>✓ frekvencia vibrácií niekoľko kHz<br>– Vyžaduje samostatný zdroj napätia pre inicializáciu premeny<br>– Nízky výkon<br>– Použitie mechanického dorazu |
| Elektromagnetický | ✓ Dostatočné generované napätie a výkon pri rozmerovo neobmedzenom generátore<br>✓ frekvencia vibrácií od 50 Hz do 100 Hz<br>– vysoký vnútorný odpor, malý prúd                                             |

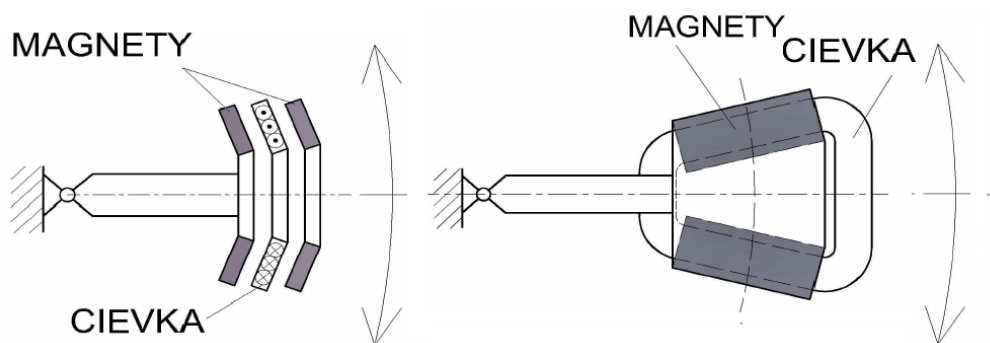
Tabuľka 3.2: Základné vlastnosti jednotlivých druhov vibračných generátorov[1]

- magnetický budiaci obvod ( $\rightarrow$  indukované napätie)
- konštrukčné riešenie uloženia páky ( $\rightarrow$  mechanické tlmenie)
- element(y) zabezpečujúce tuhosť mechanizmu ( $\rightarrow$  vl. frekvencia)

**Magnetický budiaci obvod** je tvorený sadou permanentných magnetou (uchytenými na páke rezonančného mechanizmu) a cievkou. Veľkosť indukovaného napätia je daná dĺžkou aktívnej časti cievky a rozložením magnetickej indukcie. Keďže indukcia musí byť čo najväčšia, ako materiál permanentných magnetov sa prakticky výlučne používajú magnety zo vzácnych zemín (FeNdB, SmCo, ...). Nevýhodou ich použitia (platí najmä pre FeNdB) je obmedzenie maximálnej prevádzkovej teploty (asi  $80^{\circ}\text{C} \div 200^{\circ}\text{C}$ ), po ktorej presiahnutí strácajú magnety svoje vlastnosti.

Čo sa týka samotnej cievky, používajú sa rôzne technológie výroby (od naparovania a tlačenia pre MEMS aplikácie), cez strojové navíjanie (pre samonosné cievky jednoduchších tvarov), až po ručné navíjanie. Samotný tvar cievky je daný zvolenou koncepciou budiaceho obvodu. Príklady možných koncepcií realizovaných na ÚMTMB sú znázornené na obr. (3.2).

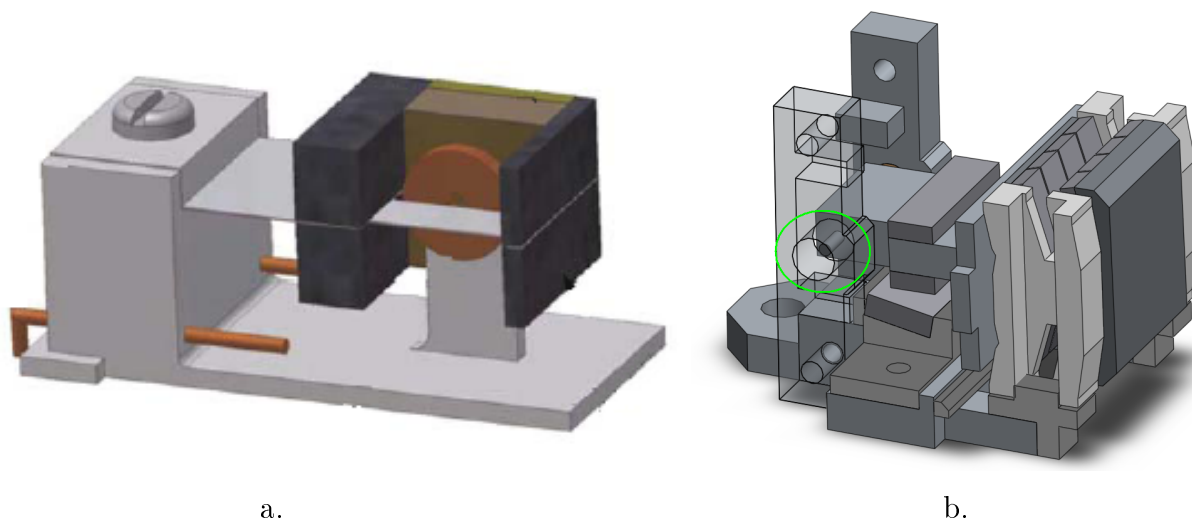
**Konštrukčné uloženie páky** je podstatné najmä z hľadiska minimalizovania trenia, a teda



Obr. 3.2: Rôzne konštrukčné usporiadania budiaceho obvodu [9]

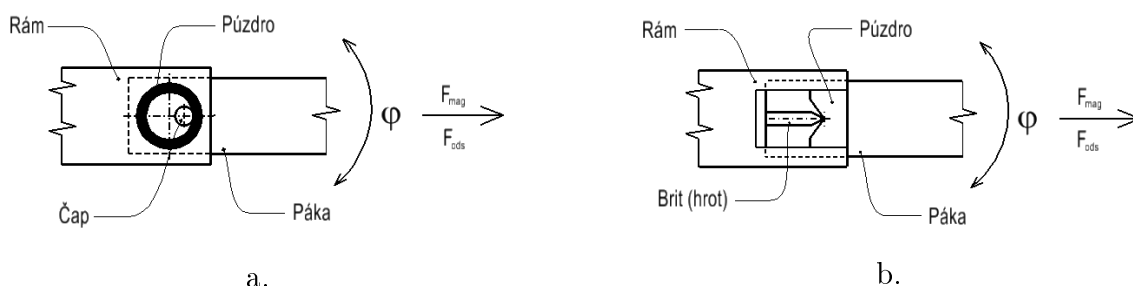
zníženia mechanických strát ktoré prakticky rozhodujú o účinnosti a efektívite zariadenia. V zásade sa používajú dva základné varianty:

- votknutý nosník (obr. (3.3a)) - tuhosť mechanizmu je v tomto prípade daná samotným nosníkom (materiál, prierez, ...). Táto konštrukcia je vhodná najmä pre generátory menších rozmerov.
- rotačné uloženie (obr. (3.3b)) - umožňuje väčšie uhlové výchylky a pri vhodnom konštrukčnom riešení môže byť citlivejší aj na nižšiu amplitúdu budiacich vibrácií.



Obr. 3.3: Varianty riešenia uchytenia páky rezonančného mechanizmu [12]

Aj pri samotnom riešení rotačnej väzby môžeme využiť viacero konštrukčných riešení. Niektoré z nich sú zobrazené na obr. (3.4). Pri praktickej realizácii sa zatiaľ viac osvedčil variant (3.4)a. najmä pre jednoduchosť výroby a dobré dosahované výsledky.



Obr. 3.4: Varianty riešenia rotačnej väzby medzi rámom a pákou rezonančného mechanizmu

Vzhľadom k tomu, že rotačné uloženie (na rozdiel od votknutia) nevytvára žiadnu tuhosť, musíme ju zabezpečiť iným spôsobom. Máme v zásade tieto možnosti [1]:

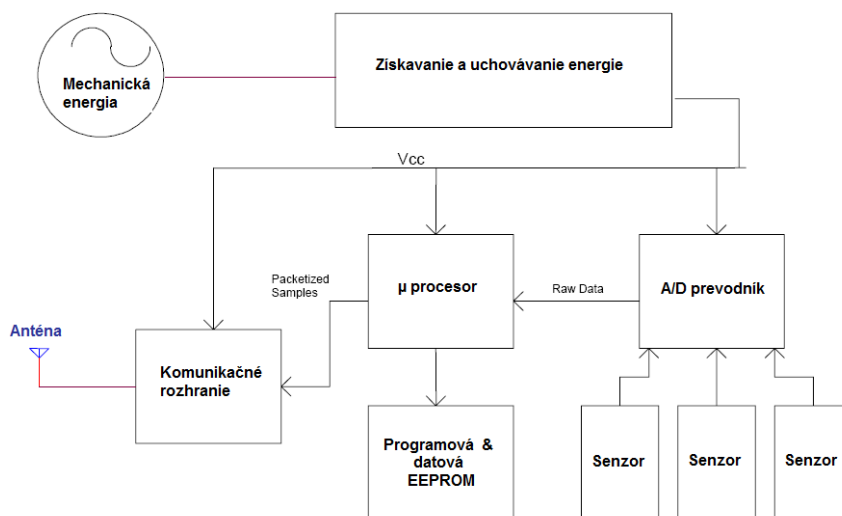
- pružný člen (valcová, tvarová alebo torzná pružina)
- pružná membrána (najmä pre MEMS technológie)
- vhodne orientované permanentné magnety medzi ktorými je páka fixovaná

Vhodnú variantu musíme zvoliť najmä s ohľadom na mechanické tlmenie, ako aj zložitost konštrukčného riešenia. Ide najmä o obmedzenie max. výchylky a zamedzenie vybudenia pohybov v nežiadúcich smeroch tak, aby nedošlo k poškodeniu samotného generátora.

## 3.2 Použitie vibračného generátora

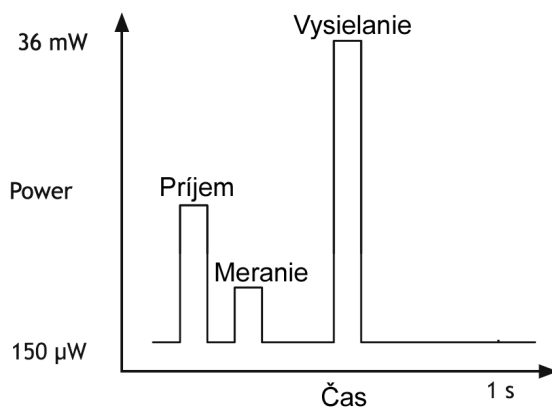
Vzhľadom k tomu, že vývoj v oblasti vibračných generátorov zažíva svoj rozmach, dá sa predpokladať že pri ďalšom rozvoji jednotlivých zariadení bude dochádzať k prelínaniu ich parametrov a vznikne teda možnosť vyberať pre tú-ktorú aplikáciu z viacerých možných princípov. Preto sa príklady použitia uvedené v tejto kapitole sa týkajú vibračných generátorov obecné bez špecifikácie jednotlivých princípov.

Použitie vibračných generátorov sa v súčasnosti sústreďuje hlavne na problematiku napájania bezdrôtových snímačov a senzorov v priestoroch kde je problematický prístup, respektíve výmena a starostlivosť o iné zdroje energie (najmä v batérie) by bola komplikovaná a nevhodná. V tejto súvislosti sa hovorí aj o tzv. *senzorovej bunke* (*sensor node*), t.j. zariadení ktoré v sebe integruje zdroj napájania, vysielateľ (prípadne aj prijímač), samotný snímač fyzikálnej veličiny a riadiacu a vyhodnocovaciu elektroniku. Blokovú schému takéhoto zariadenia je možné vidieť na obr. (3.5).



Obr. 3.5: Bloková schéma senzorovej bunky [15]

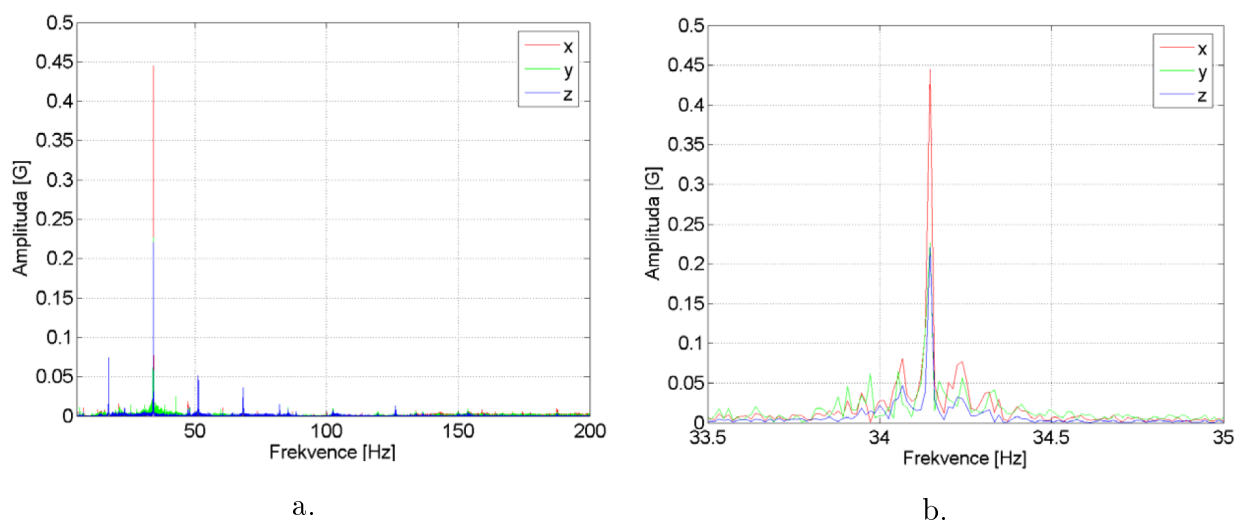
Vo všeobecnosti sa dá povedať, že energetické nároky takýchto zariadení pri špičkovom odbere presahujú generovaný výkon, avšak väčšinu času sú v režime nízkej spotreby (obr. (3.6)). Preto je výhodné využiť prvky ako superkapacitor alebo batérie ktoré počas nečinnosti snímača energiu akumulujú a následne sú schopé pokryť energetické špičky.



Obr. 3.6: Priebeh výkonu odoberaného snímačom [12]

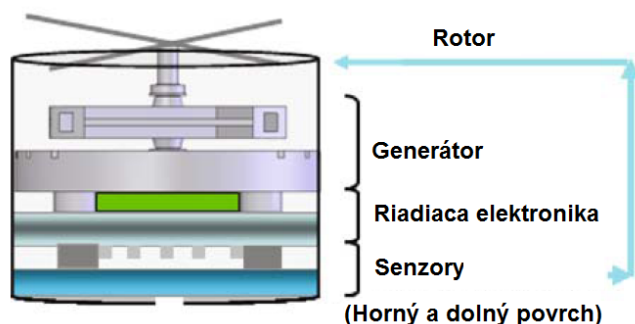
Výber vhodného zariadenia pre konkrétne použitie musí vždy vychádzať najmä z analýzy budiacich vibrácií. Napríklad [1] sa zaoberá využitím vibračného generátoru na palube helikoptéry firmy EUROCOPTER. Na obr. (3.7) je možné vidieť spektrum vibrácií nameraných pod nosným rotorom počas letu. Vďaka konštantným otáčkam nosného rotora je frekvencia vibrácií konštantná, mení sa len ich amplitúda. Práve táto situácia je pre využitie vibračného

generátora veľmi výhodná, pretože ako už bolo spomenuté, optimálna činnosť generátora je možná len v relatívne úzkom pásme okolo rezonančnej frekvencie.



Obr. 3.7: Spektrum vibrácií počas letu helikoptéry [1]

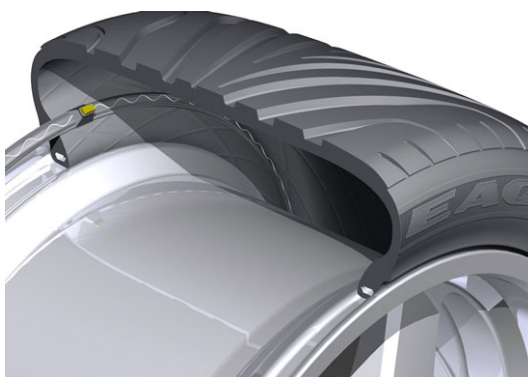
V [12] je uvedený príklad využitia vibračných generátorov na ochranu štátnych hraníc. V tomto prípade však nemáme prirodzený zdroj vibrácií a preto bolo vyvinuté zariadenie ktoré generuje vibrácie s využitím veternej energie. Schému takéhoto zariadenia môžeme vidieť na obr. (3.8). Podrobnosti o konštrukcii ako aj dosiahnuté výsledky možno nájsť v spomenutej literatúre.



Obr. 3.8: Zariadenie integrujúce generátor vibrácií, vibračný generátor, senzor a potrebnú elektroniku [12]

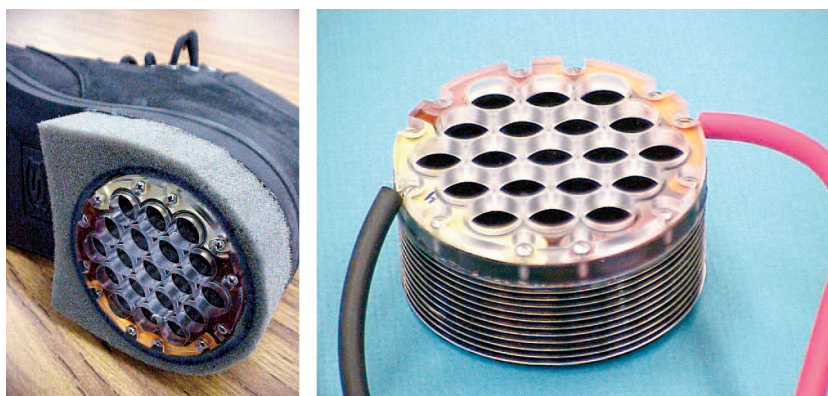
Svoje uplatnenie nachádzajú vibračné generátory aj v dopravných stavbách (mosty, ...) pri snímaní napätia (prípadne pretvorenia) konštrukcie. Budiace vibrácie sú vyvolávané prechádzajúcimi dopravnými prostriedkami. Príklad takéhoto využitia vibračného generátora

môžeme nájsť v [16]. Ďalším využitím vibračných generátorov v doprave je systém na monitorovanie tlaku v pneumatikách (tzv. TPMS). V tomto prípade môže byť istým problémom široké spektrum budiacich vibrácií v závislosti na rýchlosti vozidla. Na obr. (3.9) je jeden z možných variantov umiestnenia snímača spolu s vibračným generátorom.



Obr. 3.9: Vibračný generátor integrovaný v pneumatike vozidla [17]

Ďalšou zaujímavou oblasťou ktorá má potenciál pre využitie vibračných generátorov je človek. Ide najmä o napájanie rôznych jednoduchších a energeticky menej náročných zariadení. Jedným z prvých takýchto produktov boli hodinky SEIKO Kinetic (prvý prototyp roku 1986), ktoré získavajú energiu z pohybu zápestia. Veľký potenciál má aj získavanie energie z chôdze alebo behu. [13] uvádza že pri normálnej chôdzi je možné získať až 7 W energie na jednu nohu s frekvenciou okolo 1 Hz. Na obr. (3.10) je ako príklad uvedený elektrostatický generátor s výkonom okolo 800 mW.



Obr. 3.10: Elektrostatický generátor využívajúci energiu ľudského pohybu [13]

### 3.3 Konkrétne príklady vibračných generátorov

Vývojom vibračných generátorov sa v poslednom čase začína zaoberať čoraz viac komečných subjektov (Perpetuum (obr. (3.11a.)), Lumedyne Technologies, Ferro Solutions (obr. (3.11b.))), čo súvisí najmä s rozširujúcimi sa možnosťami ich použitia. Stále sa však dá povedať, že hlavný výskum v tejto oblasti sa odohráva najmä na akademickej pôde. Tento fakt potvrdzuje aj tab. (3.3) v ktorej je uvedený stručný prehľad elektromagnetických vibračných generátorov spolu s ich základnými parametrami.



a.



b.

Obr. 3.11: Elektromagnetické vibračné generátory firmy Perpetuum a firmy Ferro Solutions [18],[19]

| Názov<br>Výrobca                            | Rok  | Výkon<br>[ $\mu$ W] | Frekvencia<br>[Hz] | Zrýchlenie<br>[ $\text{ms}^{-2}$ ] | Veľkosť<br>[ $\text{cm}^3$ ] |
|---------------------------------------------|------|---------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Shearwood 1997<br>Sheffield University (VB) | 1997 | 0.3                 | 4400               | 382                                | 0,025                        |
| Amarithajah<br>MIT (USA)                    | 1998 | 400                 | 94                 | -                                  | -                            |
| Li<br>Hong Kong University(Čína)            | 2000 | 10                  | 64                 | 16,16                              | 1                            |
| El-hami<br>University of Southampton(VB)    | 2001 | 530                 | 322                | 102                                | 0,24                         |
| Ching<br>Hong Kong University(Čína)         | 2002 | 830                 | 110                | 95,5                               | 1                            |
| Mizuno<br>Warwick University(VB)            | 2003 | 0,0004              | 700                | 12,4                               | 2,1*                         |
| Huang                                       | 2003 | 1,4                 | 100                | 19,7                               | 0,03*                        |

Pokračovanie na ďalšej strane

| Názov<br>Výrobca                     | Rok  | Výkon<br>[ $\mu$ W] | Frekvencia<br>[Hz] | Zrýchlenie<br>[ms <sup>-2</sup> ] | Veľkosť<br>[cm <sup>3</sup> ] |
|--------------------------------------|------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Tsing Hua University (Taiwan)        |      |                     |                    |                                   |                               |
| Glyne-Jones                          | 2004 | 2800                | 106                | 13                                | 3,66                          |
| University of Southampton(VB)        |      |                     |                    |                                   |                               |
| Kulah                                | 2004 | 0,004               | 25                 | -                                 | 2                             |
| Michigan University (USA)            |      |                     |                    |                                   |                               |
| Pérez-Rodríguez                      | 2005 | 1,44                | 400                | 63                                | 0,25                          |
| Univerzity of Barcelona (Španielsko) |      |                     |                    |                                   |                               |
| Beeby                                | 2005 | 0,021               | 9500               | 1,92                              | 0,3                           |
| University of Southampton(VB)        |      |                     |                    |                                   |                               |
| Scherrer                             | 2005 | 7000**              | 35                 | -                                 | 9                             |
| Boise State University(USA)          |      |                     |                    |                                   |                               |
| Beeby                                | 2007 | 58                  | 52                 | 0,59                              | 0,15                          |
| University of Southampton(VB)        |      |                     |                    |                                   |                               |
| Wang                                 | 2007 | -                   | 121                | 14,7                              | 0,1*                          |
| Shanghai University (Čína)           |      |                     |                    |                                   |                               |
| Hadas                                | 2007 | 3500                | 34,5               | 3,1                               | 45                            |
| Brno University of Technology (ČR)   |      |                     |                    |                                   |                               |
| Sari                                 | 2007 | 0,5                 | 3450               | -                                 | 1,4                           |
| Middle East University (Turecko)     |      |                     |                    |                                   |                               |
| Serrer                               | 2008 | 55                  | 380                | 29                                | 0,8*                          |
| University of Barcelona (Španielsko) |      |                     |                    |                                   |                               |
| PMG-17                               | 2008 | 1000                | 100                | 0,25                              | 135                           |
| Perpetuum (VB)                       |      |                     |                    |                                   |                               |
| VEH-360                              | 2008 | 430                 | 60                 | 0,25                              | 250                           |
| Ferro Solutions (USA)                |      |                     |                    |                                   |                               |

\*Hodnota určená z literatúry, \*\*Výsledky simulácií

Tabuľka 3.3: Súhrnné porovnanie jednotlivých elektromagnetických vibračných generátorov[12]

---

## 4 Možnosti modelovania mechatronických systémov

Mechatronický systém vo svojej podstate kombinuje deje a javy rôznej fyzikálnej podstaty. Asi najčastejšie sa vyskytuje kombinácia mechanickej a elektrickej, prípadne hydraulikkej časti. Práve tento fakt môže podstatne ovplyvniť výber vhodnej metódy návrhu modelu. Je nutné tiež počítať s tým, že spoločné simulačné modelovanie javov rôznej fyzikálnej podstaty môže znamenať isté komplikácie (problém rádovo odlišných časových konštánt, ...). Zároveň však spoločné modelovanie môže priniesť

Okrem toho je treba dôkladne zvážiť aj dostupné možnosti (či už softwarové alebo hardwarové) a znalosti a v neposlednom rade aj plánované použitie modelu. V našom prípade by sme plánované použitie mohli zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- optimalizácia parametrov
- overovanie vhodnosti vibračného generátora pre jednotlivé aplikácie
- testovanie a overovanie rôznych typov pripojenej záťaže

Pri vytváraní komplexného modelu vibračného generátora môžeme v zásade využiť tieto prostriedky:

### **Ansys-MKP**

Ansys je silný simulačný nástroj využívajúci metódu konečných prvkov. Patrí k najznámejším a najpoužívanejším produktom v tejto oblasti. Ide o pomerne univerzálny nástroj schopný riešiť širokú paletu inžinierskych problémov od mechanického statického namáhania, teplotných úloh, magnetostatiky, až po problematiku prúdenia tekutín. Umožňuje tiež riešiť dynamické úlohy, a v najnovších verziách sa objavuje aj podpora simulácie elektrických obvodov. Problémom ale zostáva vyššia časová náročnosť simulácie (hlavne pri zahrnutí kontaktov a nelinearít). Taktiež môže byť problémom aj o čosi komplikovanejšie vyhodnocovanie výsledkov (postprocesing). Preto sme sa pri zostavovaní nášeho modelu rozhodli obmedziť použitie Ansysu len na niektoré čiastkové výpočty (rozloženie magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere, kap. 5.2.3).

---

## Matlab/Simulink-diferenciálne rovnice

Matlab je jedným z najpoužívanějších prostredí pre numerické výpočty a spracovanie (experimentálnych) dát. Používa vlastný programovací (skriptovací) jazyk so zabudovanou podporou maticových operácií, čo mu oproti klasickým programovacím jazykom udeluje veľkú výhodu najmä pri numerickom riešení algebraických prípadne diferenciálnych rovníc. Pre diferenciálne rovnice tiež obsahuje niekoľko riešičov s pevnou aj premenlivou dĺžkou kroku, čo je pre modelovanie mechatronických systémov veľmi výhodné, pretože to umožňuje riešiť systémy s odlišnými časovými konštantami.

Simulink je nadstavba Matlabu využívajúca metód grafického programovania. Jeho hlavným poslaním je uľahčiť tvorbu dynamických modelov rôznej fyzikálnej podstaty. Vďaka jeho relatívnej jednoduchosti a úzkej previazanosti z Matlabom sa stal veľmi obľúbeným nástrojom aj pre navrhovanie, ladenie a optimalizovanie riadiacich systémov a algoritmov.

Okrem veľmi dobrej podpory riešenia diferenciálnych rovníc ponúka Simulink aj relatívne jednoduchú možnosť modelovania celých fyzikálnych sústav. Napríklad knižnica SimPowerSystems obsahuje základné elektrické prvky (odpory, kondenzátory, diódy, ...) ale aj modely jednotlivých zariadení (motory, meniče, ...). Podobnú knižnicu môžeme nájsť aj pre mechanické sústavy.

Práve pre možnosť kombinácie riešenia pomocou diferenciálnych rovníc (mechanická časť) a vopred definovaných základných prvkov (elektrická časť) sme zvolili Simulink ako hlavný systém pre tvorbu komplexného modelu. Implementácií modelu do tohoto prostredia sa venuje kapitola 5.3.

## CAE (Computer Aided Engineering) systémy pre dynamiku

Tieto systémy umožňujú vykonávať dynamické simulácie priamo na 3 rozmerných elementoch. Nie je teda nutné poznať diferenciálne rovnice, ale systém si ich vytvorí na základe geometrie, zadaných väzieb a silového pôsobenia. Ako geometriu môžeme využiť 3D model z CAD systému. V našom prípade môže byť znova problémom modelovanie elektrickej časti vibračného generátora a ťažšia implementácia zložitejších modelov trenia. Medzi najznámejších zástupcov patria MSC.Adams a LS-Dyna, avšak praktický každý „veľký“ CAD systém (Catia, SolidWorks, ...) má aspoň čiastočnú možnosť simulácie dynamiky.

---

## HDL

HDL (Hardware Description Language) je systém pre formálny popis elektronických obvodov. Môže popisovať fungovanie obvodu, jeho usporiadanie alebo iné informácie [20]. Hoci pôvodné využitie spočívalo hlavne v návrhu integrovaných obvodov, objavujú sa aj pokusy pri modelovaní dynamických systémov. Napríklad v [21] sa autorom podarilo vytvoriť model elektromagnetického vibračného generátora a pomocou genetických algoritmov optimalizovať niektoré jeho parametre.

## Iné

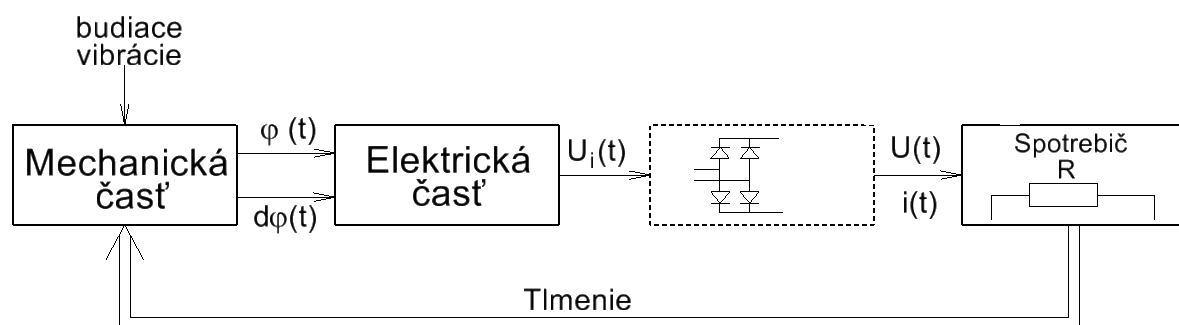
Okrem vyššie spomenutých možností existujú samozrejme aj ďalšie. Napríklad je možnosť využiť neurónové siete (NS), v tomto prípade je však problémom fakt, že pri každej zmene pripojenej elektroniky by bolo nutné NS znova natrénovať na základe nameraných údajov. Preto sa tento spôsob modelovania nehodí pre fázu navrhovania jednotlivých parametrov a testovanie rôznych variantov výstupného obvodu. Možné využitie by bolo v analýze vhodnosti konkrétneho vibračného generátora pre jednotlivé aplikácie. Taktiež by bolo možné využiť NS ako súčasť iného modelu pre aproximáciu mechanického tlmenia.

Môžeme tiež využiť iné softwarové vybavenie ako bolo spomenuté vyššie. Napríklad pre riešenie pomocou MKP máme možnosť vyberať z viacerých programov (Nastran, Abaqus, ...), pre numerické výpočty môžeme využiť GNU Octave a podobne.

## 5 Vytvorenie modelu

Ako už bolo spomenuté, vibračný generátor je možné z hľadiska modelovania rozdeliť na niekoľko subsystémov, ktoré pri správne definovaných vstupoch môžu byť modelované (a testované) skoro nezávisle. Pomocou tohoto prístupu je tiež možné vytvoriť modulárnu štruktúru modelu ktorá umožní pri ďalšom vývoji modelu použiť napr. iný model výstupného obvodu, iný model trenia a podobne.

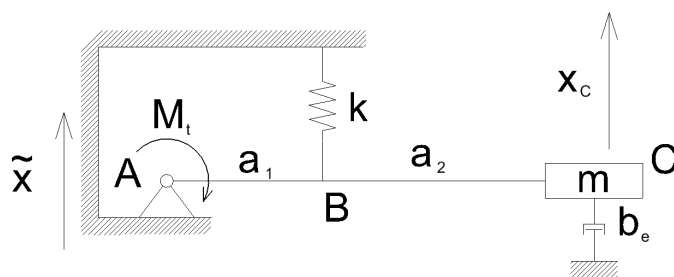
Základné subsystémy modelu vibračného generátora môžeme znázorniť pomocou blokovej schémy na obr. (5.1).



Obr. 5.1: Bloková schéma modelu vibračného generátora

### 5.1 Mechanická časť

Pri zostavení modelu mechanickej časti sme vychádzali z Lagrangeových rovníc II. druhu. Schématické znázornenie riešenej časti je znázornené na obr. (5.2).



Obr. 5.2: Schéma mechanickej časti vibračného generátora

Pri zostavovaní modelu predpokladáme:

- $C$  je hmotný bod s hmotnosťou  $m$  a momentom zotrvačnosti  $J$  vzhľadom k bodu  $A$  (osi otáčania)
- tuhosť sústavy  $k$  je tvorená permanentnými magnetami a považujeme ju za konštantnú
- tlmenie sústavy  $b$  je tvorené mechanickými stratami (trecí moment  $M_t$ ) a elektrickým tlmením (časť kinetickej energie sústavy ktorá sa premieňa na odoberaný výkon)
- budiace vibrácie  $\tilde{x}$  predpokladáme v tvare:

$$\tilde{x} = x_0 \sin \omega t \quad (5.1)$$

Kinetická energia sústavy [10]:

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{\tilde{x}}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + \int_{(m)} dm \begin{vmatrix} \dot{x}_{Ax} & \dot{x}_{Ay} & \dot{x}_{Az} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x & y & z \end{vmatrix} = \quad (5.2)$$

$$= \frac{1}{2} m \dot{\tilde{x}}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + \int_{(m)} dm \begin{vmatrix} 0 & \dot{\tilde{x}} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_z \\ x & y & 0 \end{vmatrix} \quad (5.3)$$

$$x = a_z \cos \varphi \quad (5.4)$$

$$y = a_z \sin \varphi \quad (5.5)$$

kde  $a_z$  je polomer zotrvačnosti:

$$a_z = \sqrt{\frac{J}{m}} \quad (5.6)$$

Po dosadení príslušných vzťahov dostávame vzťah:

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{\tilde{x}}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + m a_z \dot{\tilde{x}} \dot{\varphi} \cos \varphi \quad (5.7)$$

Potenciálna energia je daná tuhosťou sústavy  $k$  podľa vzťahu:

$$E_p = \frac{1}{2} k x_B^2 = \frac{1}{2} k a_1^2 \varphi^2 \quad (5.8)$$

Disipačná energia:

$$E_d = \frac{1}{2} b_m \dot{x}_B^2 + \frac{1}{2} b_e \dot{x}_c^2 = \frac{1}{2} b_m r_t^2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} b_e a_c^2 \dot{\varphi}^2 \quad (5.9)$$

kde  $a_c$ -vzdialenosť budiaceho obvodu od osi otáčania

$b_e$ -koeficient elektrického tlmenia (bude odvodený neskôr),

$b_m$ -koeficient mechanického tlmenia,

$r_t$ -polomer trenia

Základný tvar Lagrangeovej rovnice II. druhu je:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_p}{\partial q} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial A}{\partial q} \quad (5.10)$$

pričom keďže je sústava je buď kinematicky platí:

$$\frac{\partial A}{\partial q} = 0 \quad (5.11)$$

Po vyjadrení jednotlivých parciálnych derivácií dostávame pohybovú rovnicu v tvare:

$$\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} \left( \frac{b_e a_3^2 + b_m r_t^2}{J} \right) + \varphi \left( \frac{k a_1^2}{J} \right) = \frac{m a_z}{J} (\ddot{x} \cos(\varphi) - \dot{x} \sin(\varphi) \dot{\varphi}) \quad (5.12)$$

Vzhľadom k tomu, že sú uvažované len malé výchylky rezonančného mechanizmu (konštručné usporiadanie neumožňuje výchylky väčšie ako  $\pm 10^\circ$ ), je možné rovnicu prepísať do tvaru:

$$\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} \left( \frac{b_e a_c^2 + b_m r_t^2}{J} \right) + \varphi \left( \frac{k a_1^2}{J} \right) = \frac{m a_z}{J} \ddot{x} \quad (5.13)$$

Rovnicu (5.13) môžeme zapísať ako:

$$\ddot{\varphi} + 2\delta \dot{\varphi} + \Omega^2 \varphi = Q \quad (5.14)$$

kde:

$$Q = \frac{m a_c}{J} \ddot{x} \quad (5.15)$$

$$\delta = \frac{b_e a_c^2 + b_m r_t^2}{2J} \quad (5.16)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{k a_1^2}{J}} \quad (5.17)$$

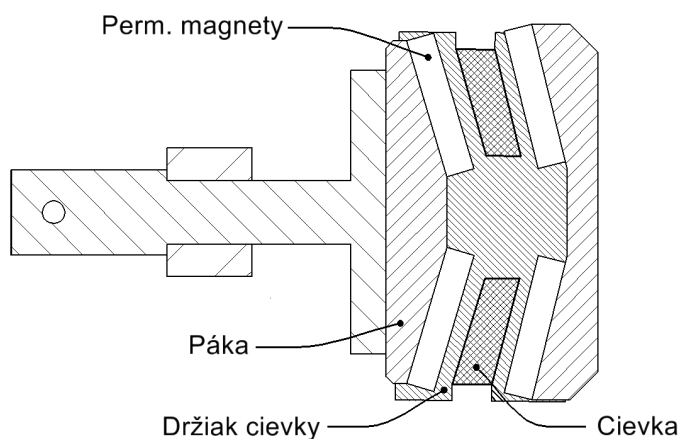
Takto odvodená rovnica uvažuje s lineárnym popisom mechanického tlmenia, ktoré bude v kap. (6.1) nahradené zložitejším modelom ktorý viac vystihuje reálne chovanie sústavy.

Aby sme dosiahli požadovaného generovaného výkonu, uhlová frekvencia budiacich vibrácií  $\omega$  (rovnica (5.1)) musí byť rovnaká ako vlastná frekvencia sústavy  $\Omega$ , t.j. v našom prípade  $17,2 \text{ Hz}$

## 5.2 Elektrická časť

### 5.2.1 Indukované napätie

Budiaci obvod vibračného generátora je tvorený sadou permanentných magnetov upevnených na ramene rezonančného mechanizmu (obr. (5.3)). Medzi týmito magnetmi je umiestnená cievka v ktorej sa indukuje elektromotorické napätie.



Obr. 5.3: Budiaci obvod vibračného generátora

Toto napätie môžeme podľa [3] vyjadriť ako:

$$u_i = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{r} \quad (5.18)$$

kde  $\vec{v}$  je vektor rýchlosti a  $\vec{B}$  je vektor magnetickej indukcie. Ak uvažujeme cievku s  $N$  závitmi a s aktívnou dĺžkou závitov  $l$  môžeme rovnicu zapísať v tvare:

$$u_i = B_x \cdot l \cdot N \cdot \dot{x} = B_x \cdot l \cdot N \cdot (\dot{\varphi} \cdot a_3) \quad (5.19)$$

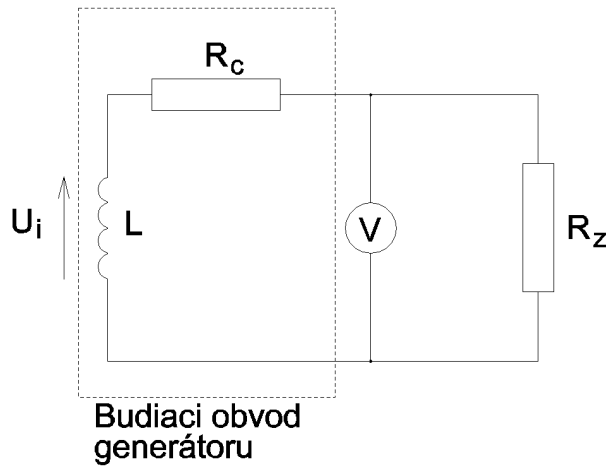
kde:

- $\dot{x}$  a  $(\dot{\varphi} \cdot a_c)$  sú rýchlosti pohybu permanentných magnetov (t.j. páky rezonančného mechanizmu) (rov. (5.13)),
- $B_x$  je zložka vektoru magnetickej indukcie kolmá na smer pohybu. Táto zložka je závislá na polohe páky a postup jej získania je uvedený v kap. 5.2.3.

### 5.2.2 Elektrické tlmenie

Elektrické tlmenie je v podstate vyjadrenie faktu, že časť kinetickej energie (pohyb rezonančného mechanizmu) je transformovaná na energiu elektrickú. Zároveň ide vlastne o spôsob akým pripojená elektrická záťaž ovplyvňuje mechanické chovanie sústavy. To znamená, že v prípade že máme neuzavretý elektrický obvod, je  $b_e = 0$ , inak je úmerné generovanému výkonu. Pri odvodení vychádzame zo schémy podľa obr. (5.4):

$$P = \frac{U_i^2}{\sqrt{R_c^2 + R_z^2 + (j\omega L)^2}} \quad (5.20)$$



Obr. 5.4: Náhradná schéma pre odvodenie elektrického tlmenia.  $R_c$ -odpor cievky,  $R_z$ -odpor záťaže,  $L$ -indukčnosť cievky

Vzhľadom k tomu, že je použitá samonosná cievka bez jadra, možno vzhľadom na nízku indukčnosť zanedbať jalovú zložku prúdu a vzťah pre okamžitý výstupný výkon generátora zapísať v tvare:

$$p = \frac{u_i^2}{\sqrt{R_c^2 + R_z^2}} \quad (5.21)$$

Disipovaný mechanický výkon môžeme vyjadriť ako:

$$F = b_e v \quad (5.22)$$

$$P = \int_v^0 F dv = \frac{1}{2} b_e \dot{x}^2 \quad (5.23)$$

Z rovnosti elektrického a mechanického výkonu môžeme zapísať (po dosadení rovnice 5.19):

$$b_e = \frac{(B_x \cdot N \cdot l)^2}{R_c + R_z} \quad (5.24)$$

Nevýhodou takto odvodeného vzťahu je, že vychádza z impedancie obvodu čo znamená že tento tvar platí len v prípade že pripojenou záťažou je odpor. Pre ostatné druhy záťaže by bolo nutné znova odvodiť príslušné vzťahy. Vzhľadom k tomu, že programové prostredie Simulink ponúka možnosti modelovania a simulovania elektrických obvodov, bolo z hľadiska univerzálnosti modelu lepším riešením použiť výpočet výkonu priamo zo simulovaných elektrických veličín. Tým sa vytvorila možnosť meniť a upravovať pripojenú elektroniku bez nutnosti zásahu do samotného modelu vibračného generátoru.

### 5.2.3 Vytvorenie závislosti $B_x = f(\varphi)$

Rozloženie magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere patrí k jednému z najdôležitejších parametrov ktoré rozhodujú o výstupných parametroch vibračného generátora. Ide najmä o závislosť veľkosti magnetickej indukcie ktorá prechádza závitmi cievky a teda veľkosťou indukovaného napätia.

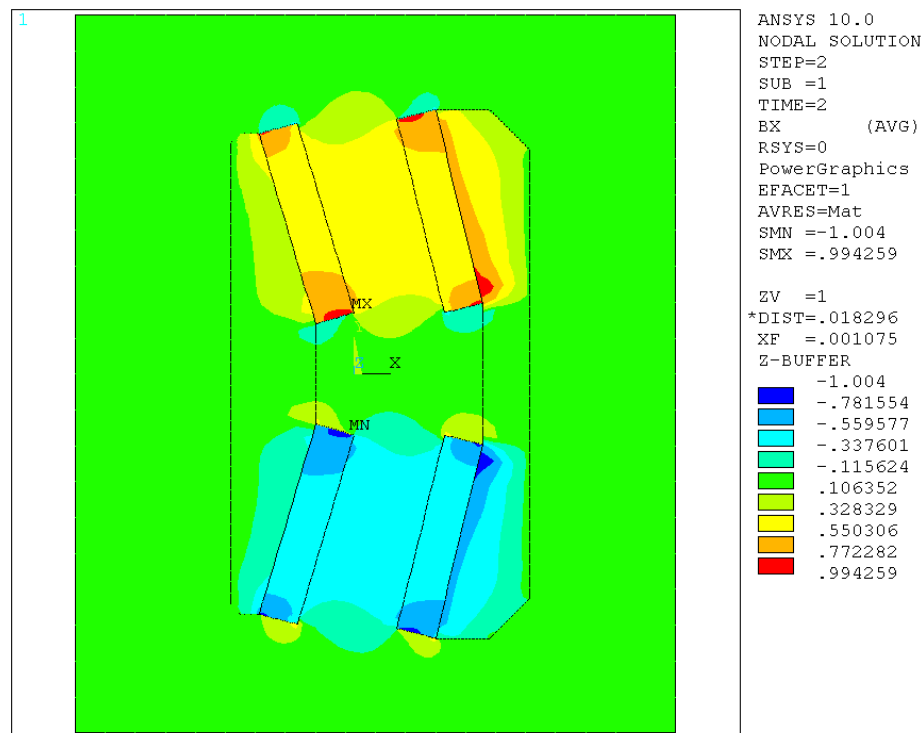
Magnetické pole je vytvárané sústavou permanentných magnetov umiestnených medzi pólovými nástavcami. Medzi nimi sa na páke rezonančného mechanizmu pohybuje samonosná cievka. V našom prípade sú použité magnety zo vzácnych zemín (FeNdB), ktoré sú schopné vytvoriť magnetické pole s priemernou hodnotou magnetickej indukcie približne 0,1 - 0,6 T. Presná hodnota závisí na konkrétnom konštrukčnom riešení [1].

Vzhľadom na konštrukciu a umiestnenie permanentných magnetov nie je magnetická indukcia konštantná. Preto sme na jej určenie použili metódu konečných prvkov a magnetostatickú analýzu. Na obr. (5.5) môžeme vidieť magnetický obvod a rozloženie magnetickej indukcie.

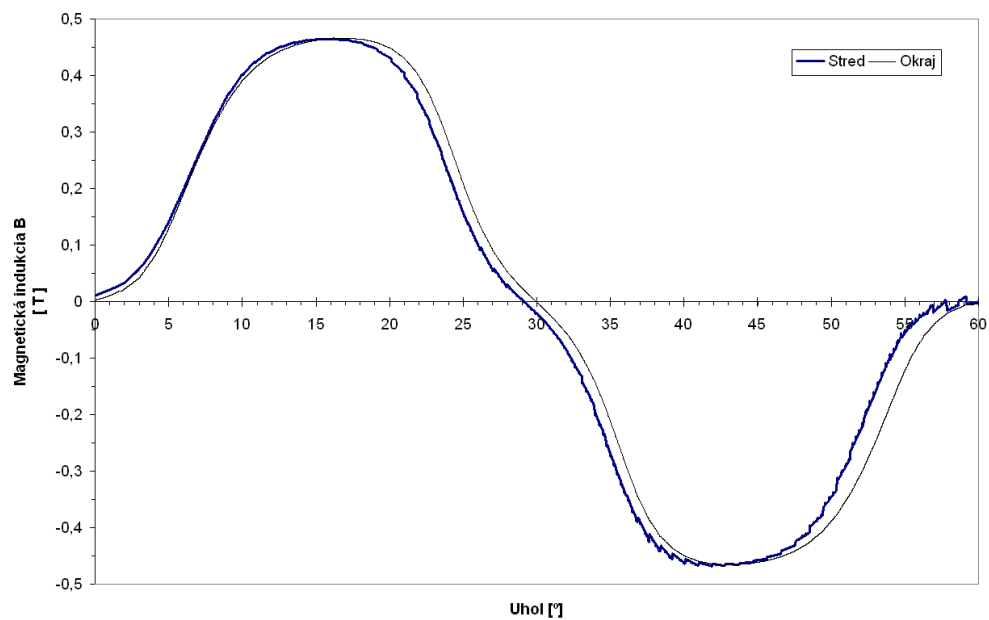
Na základe týchto výsledkov z programu Ansys bol vyhodnotený priebeh magnetickej indukcie v závislosti na uhle. Tento priebeh je možné vidieť na obr. (5.6) (uhol ale nie je totočný s uhlom natočenia páky  $\varphi$ ). Je tu znázornený priebeh magnetickej indukcie nielen v strede vzduchovej medzery, ale aj na okraji cievky.

Z tohoto priebehu týchto údajov bola spočítaná priemerná hodnota magnetickej indukcie prechádzajúcej cievkou v závislosti na natočení  $\varphi$ . Pre jednoduchšiu implementáciu sme tieto hodnoty aproximovali polynómom 2 stupňa:

$$B_x(\varphi) = -0.0024\varphi^2 + 0.4835 \quad (5.25)$$

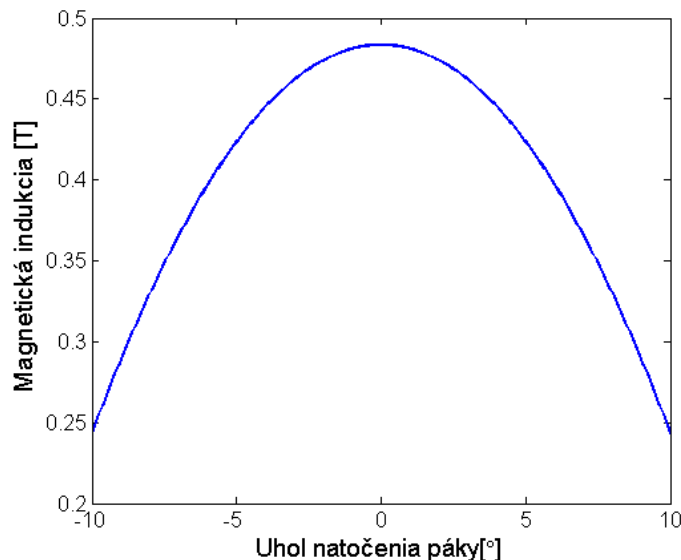


Obr. 5.5: Rozloženie magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere



Obr. 5.6: Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere

Znázornenie tejto závislosti je na obr. (5.7)



Obr. 5.7: Závislosť magnetickej indukcie na natočení páky rezonančného mechanizmu

#### 5.2.4 Model elektrickej časti

Pri návrhu modelu pripojenej elektrickej časti sme mali v zásade tieto možnosti:

- (diferenciálne) rovnice pre popis jednotlivých prvkov a riešenie obvodových veličín (prúd, napätie)
- preddefinované bloky knžnice SimPowerSystems

Pri výbere vhodnej metódy riešenia sme tiež museli rátať s tým, že práve elektronická časť môže byť pri ďalšom využití modelu často upravovaná, pretože aj predpokladné použitie modelu počíta s testovaním rôznych variantov výstupných obvodov. Napríklad by mohlo ísť o impedančné prispôsobenie záťaže tak, aby sa táto impedancia počas celej činnosti zariadenia (bez ohľadu na to či je snímač aktívny alebo nie) pohybovala v okolí optimálnej hodnoty.

Okrem toho sme museli brať do úvahy aj fakt, že je nutné poznať generovaný výkon, ktorý vlastne určuje veľkosť a charakter elektrického tlmenia (kap. 5.2.2).

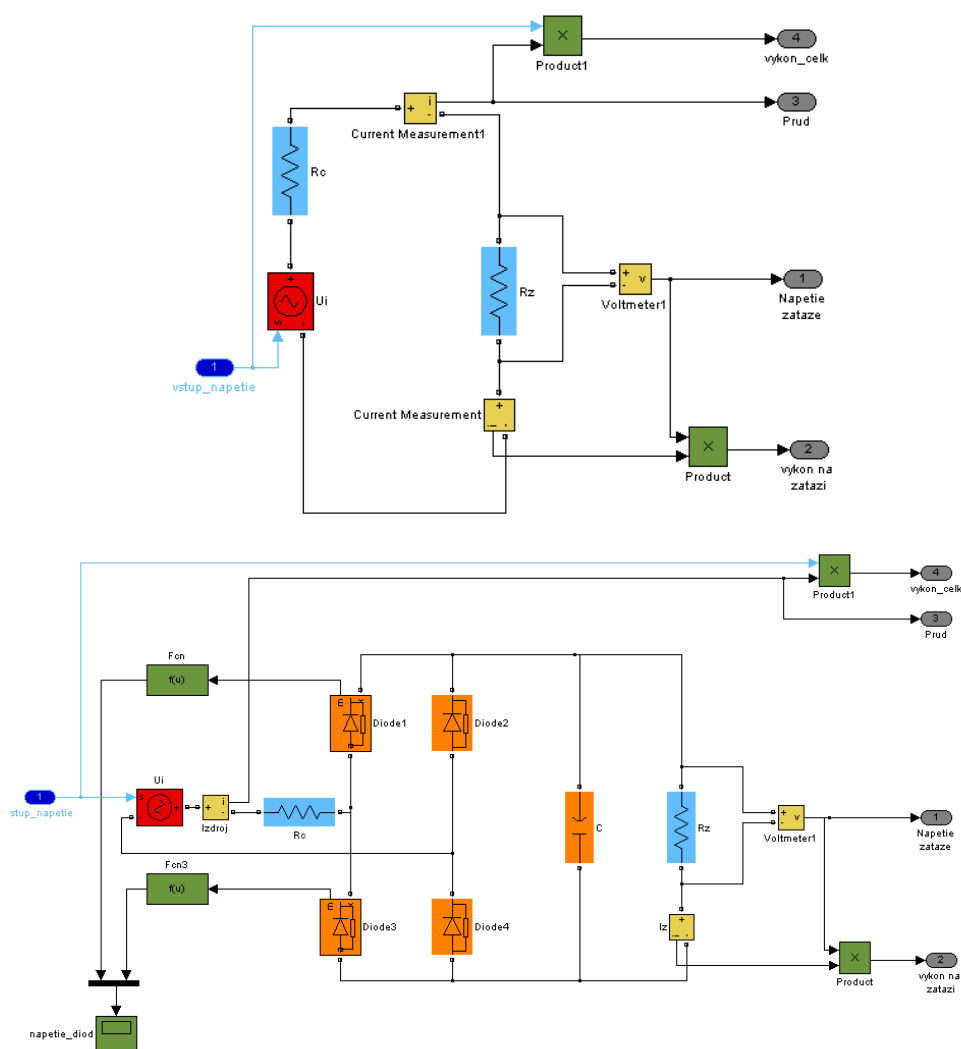
Práve pre tieto dôvody sme sa rozhodli pri modelovaní využiť knižnicu SimPowerSystems. Vzhľadom na to, že obsahuje všetky základné elektrické a elektronické súčiastky (diódy, tyristory, tranzistory, ...), môžeme pri ďalšom vývoji modelu jednoducho implementovať v

podstate ľubovoľný výstupný obvod. Istou nevýhodou použitia tejto knižnice je však vyššia časová náročnosť výpočtu, avšak vzhľadom na fakt že model nie je určený na výpočty v reálnom čase táto nevýhoda nie je až taká závažná.

Naším cieľom v oblasti elektrickej časti modelu bolo vytvoriť dva základné obvody:

- jednoduchý odpor pripojený k zdroju napätia (tvoreného vibračným generátorom)
- odpor pripojený k neriadenému diódovému usmerňovaču s filtračným kondenzátorom

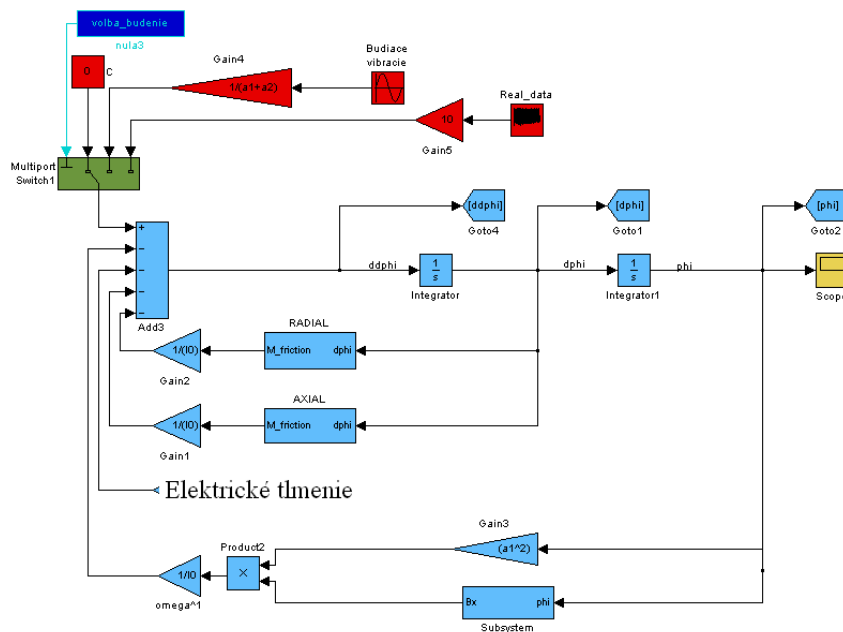
Oba modely priamo zostavené v prostredí Matlab/Simulink sú znázornené na obr. (5.8).



Obr. 5.8: Modely elektrickej záťaže pre vibračný generátor

## 5.3 Implementácia modelu do prostredia Simulink

Pri odvodení mechanického modelu bolo použité lineárne mechanické tlmenie (viď rovnica 5.13). Avšak tento model bol po porovaní s reálne nameranými priebehmi nahradil iným, komplexnejším modelom trenia (podrobnejšie v kap. 6.1). Podobne sa postupovalo aj pri nahradení lineárnej tuhosti nelineárnou charakteristikou. Po tejto úprave je možné mechanický subsystém (v zmysle obr. (5.1)) zostaviť podľa obr. (5.9). Pomocou riadiacej premennej *volba\_budenie* je umožnené vypínať/zapínať budiace vibrácie podľa potreby, napríklad pre testovanie odozvy na počiatočnú výchylku. Pre tento prípad je nastavená v integrátore aj počiatočná podmienka, t.j. v prípade vypnutého budenia je počiatočné natočenie  $10^\circ$ . Vstupy a výstupy subsystému sú uvedené v tab. (5.1).



Obr. 5.9: Mechanický subsystém vibračného generátora v Matlab/Simulinku

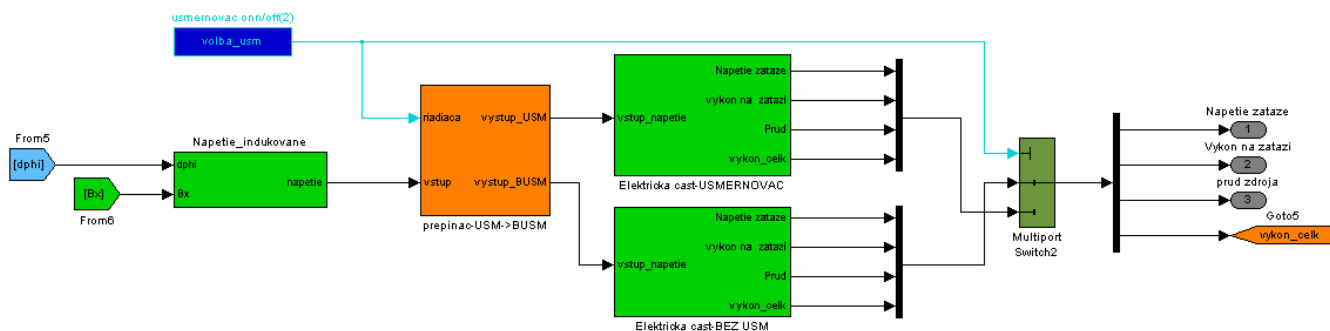
Elektrický subsystém (obr. (5.10)) sa skladá zo zdroja indukovaného napätia a dvoch variantov výstupného obvodu (bez/s usmerňovačom). Prepínanie medzi jednotlivými obvodmi zabezpečuje riadiaca premenná *volba\_usm*. Jednotlivé vstupy a výstupy sú uvedené v tab. (5.2).

Nastavovanie riadiacich premenných a niektorých parametrov (odpor záťaže, kapacita filtračného kondenzátora, ...) zabezpečuje nadradený subsystém pomocou parametrov masky.

Celkový model vibračného generátora je znázornený na obr. (5.11).

| Premenná         | Vstup/Výstup | Popis                     |
|------------------|--------------|---------------------------|
| $\ddot{x}$       | vstup        | budiace vibrácie          |
| $b_e$            | vstup        | elektrické tlmenie        |
| volba_budenie    | vstup        | zapnutie/vypnutie budenia |
| $\varphi$        | výstup       | uhol natočenia páky       |
| $\dot{\varphi}$  | výstup       | uhlová rýchlosť páky      |
| $\ddot{\varphi}$ | výstup       | uhlové zrýchlenie páky    |

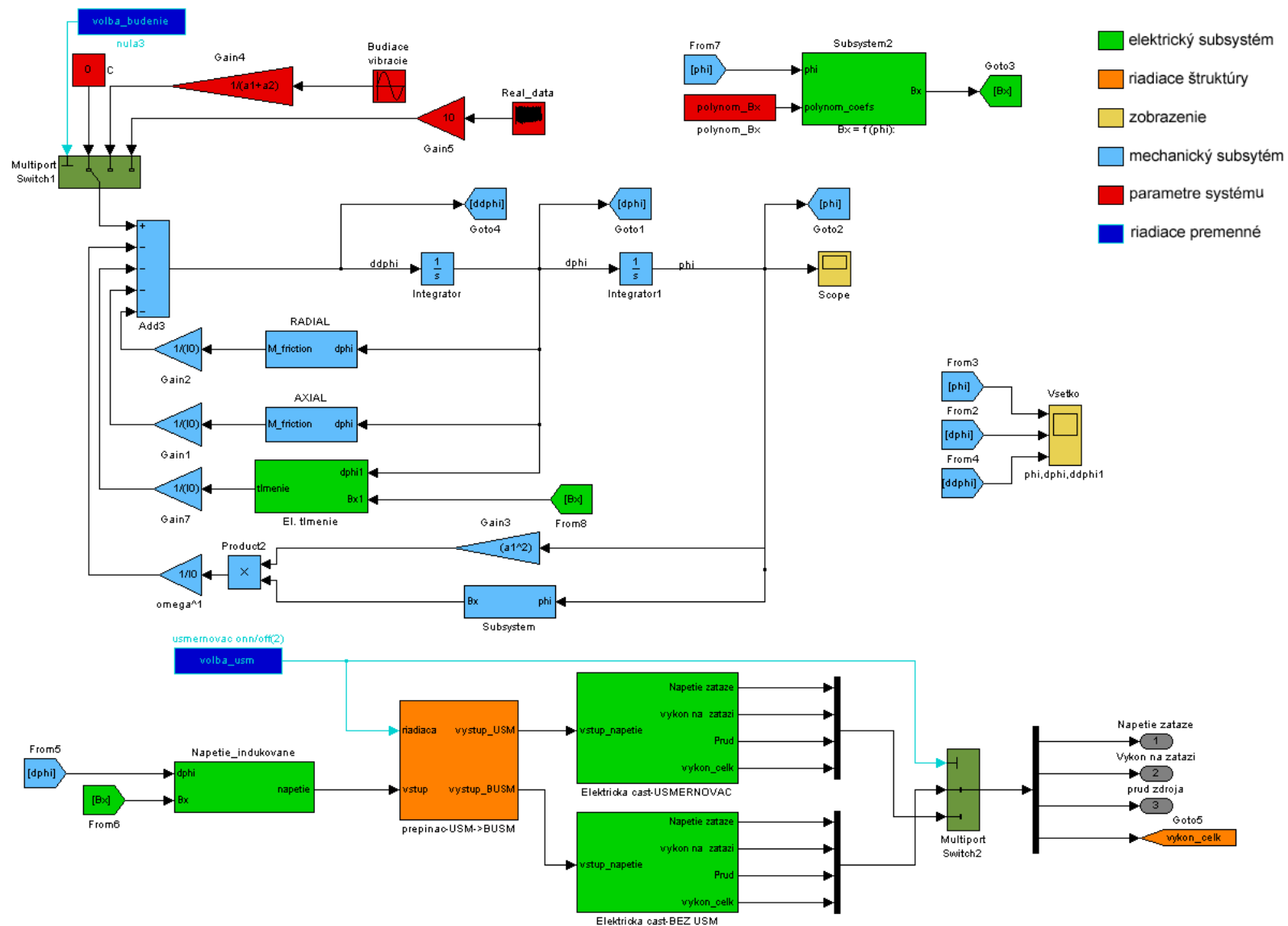
Tabuľka 5.1: Vstupy a výstupy mechanického subsystému



Obr. 5.10: Elektrický subsystém vibračného generátora v Matlab/Simulinku

| Premenná        | Vstup/Výstup | Popis                                                       |
|-----------------|--------------|-------------------------------------------------------------|
| $\dot{\varphi}$ | vstup        | rýchlosť pohybu cievky v mag. poli                          |
| $B_x$           | vstup        | hodnota magnetickej indukcie v závislosti na uhle $\varphi$ |
| volba_usm       | vstup        | prepínanie výstupných obvodov                               |
| $U_z$           | výstup       | napätie záťaže                                              |
| $P_z$           | výstup       | výkon na záťaži                                             |
| $I_{zd}$        | výstup       | prúd zdroja                                                 |
| $P_c$           | výstup       | celkový výkon generátora (t.j. elektrické tlmenie)          |

Tabuľka 5.2: Vstupy a výstupy elektrického subsystému



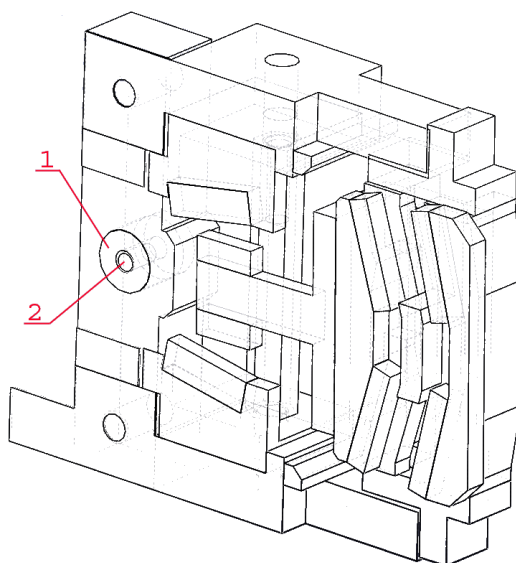
Obr. 5.11: Celkový model vibračného generátora v Matlab/Simulinku

## 6 Identifikácia parametrov

### 6.1 Trenie

Trenie je jedným z javov ktoré najpodstatnejšie ovplyvňujú chovanie celej sústavy a rozhoduje o celkovej účinnosti a citlivosti generátoru na budiace vibrácie. V sústave môžeme nájsť 2 základné výskyty trenia. V oboch prípadoch ide o trenie medzi pákou (pohybujúca sa časť) a teflónovým púzdrom (obr. (6.1))

- **Radiálne**<sup>1</sup>-vzniká na vonkajšom priemere čapu páky a časti vnútorného priemeru púzdra. Je dané váhou samotnej páky (rotačné uloženie) a dynamickými účinkami budiacich vibrácií.
- **Axiálne**-vzniká medzi prednou plochou púzdra a telesom páky. Je dané imperfekciami budiacich vibrácií, ktoré majú okrem radiálnej zložky aj zložku axiálnu.



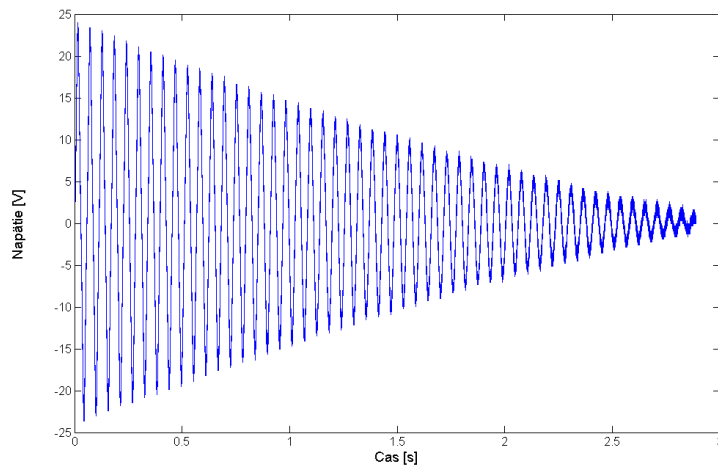
Obr. 6.1: Kontakt medzi teflónovým krúžkom(1) a čapom páky(2)

Presné vyjadrenie trecích síl je pomerne komplikované, pretože okrem dynamických síl danými pohybujúcim sa mechanizmom je trenie ovplyvnené aj ďalšími silami, ktoré sú vyvo-

<sup>1</sup>axiálnosť a radiálnosť je braná vzhľadom k osi otáčania páky

lábané peramentnými magnetmi ktoré zaistujú tuhosť sústavy. Preto sa na ich určenie ako aj na určenie ostatných neznámich koeficientov využili reálne namerané výsledky.

Pre identifikáciu trecích účinkov je najvýhodnejšie použiť nezatažený generátor, pretože v tomto prípade sa v sústave nevyskytuje žiadne elektrické tlmenie  $b_e$ . Parametre sme identifikovali pre vibračný generátor, ktorého priebeh odozvy na počiatočnú výchylku je znázornený na obr. (6.2).



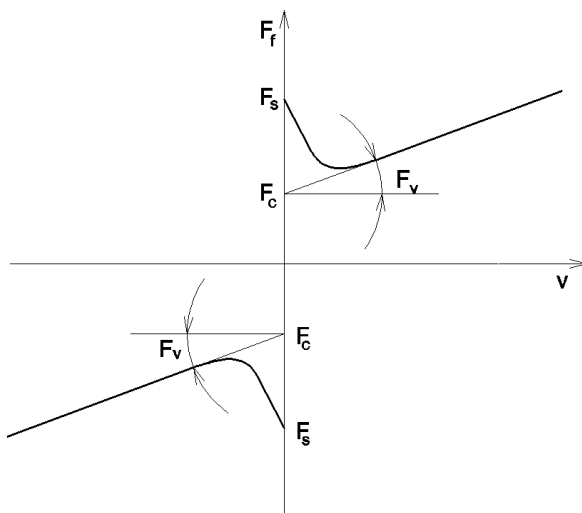
Obr. 6.2: Odozva vibračného generátora na počiatočnú výchylku

Existuje viacero možných prístupov k modelovaniu trenia, od jednoduchých a nezávislých od rýchlosti, až po zložité dynamické modely zahŕňajúce rozdielne chovanie pri malých a veľkých posunutiach (tzv. „Stick-Slip motion”). Samozrejme daňou za komplexnejší popis (Reset-Integrator, LuGre, ...) je väčší počet neznámych parametrov, ktorých hodnoty sú obecné ťažko teoreticky odvoditeľné.

Pre náš prípad sme ako vhodný model zvolili tzv. „Stribeckovo trenie”, ktoré zavádza nelineárnu závislosť trecej sily na rýchlosti. Tento popis bol pôvodne odvodený pre povrchy s mazivom, ale ako sa ukázalo dokáže dobre postihnúť aj chovanie našej sústavy. Funkcia pre výpočet veľkosti trecej sily je definovaná ako:

$$v \neq 0 : F_f(t) = - \left( F_C + (F_S - F_C) e^{-\frac{|\dot{\varphi}|}{\varphi_{str}}} \right) \text{sgn}(\dot{\varphi}) + F_v \dot{\varphi} \quad (6.1)$$

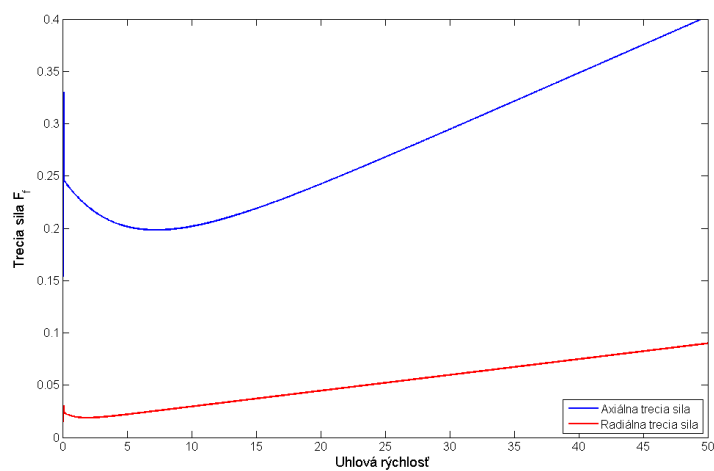
kde  $F_C$  je sila Coulombovského trenia,  $F_S$  je sila potrebná na „odtrhnutie”,  $\varphi_{str}$  je tzv. „Stribeckova rýchlosť” a  $F_v$  je parameter viskózneho trenia[23]. Klasický priebeh tejto funkcie je znázornený na obr. (6.3) Konkrétne nastavenie parametrov pre náš model je uvedené v tab. (6.1). Priebeh závislosti trecej sily na uhlovej rýchlosti



Obr. 6.3: Stribeckova krivka

| Parameter             | Axiálne trenie       | Radiálne trenie      | Jednotka                   |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| $F_C$                 | 0,1320               | 0,0144               | $N$                        |
| $F_S$                 | 0,2475               | 0,0247               | $N$                        |
| $F_v$                 | $9,84 \cdot 10^{-4}$ | $2,94 \cdot 10^{-3}$ | $N \cdot s \cdot rad^{-1}$ |
| $\dot{\varphi}_{str}$ | 5                    | 1                    | $rad \cdot s^{-1}$         |

Tabuľka 6.1: Identifikované parametre trenia

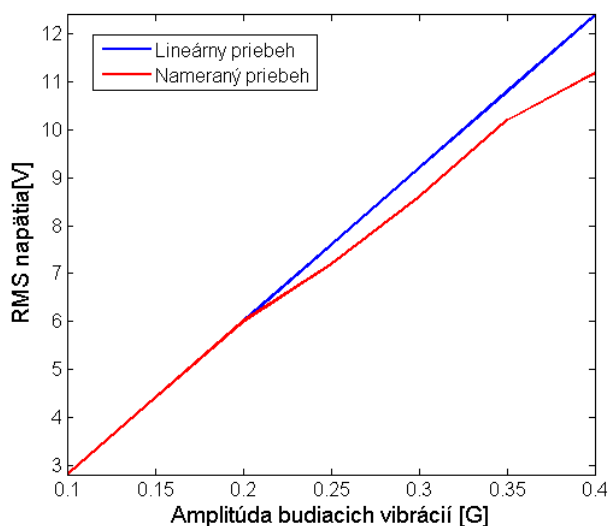


Obr. 6.4: Priebeh závislosti trecej sily na uhlovej rýchlosti pre identifikované parametre

**Pozn.:** Okrem uvedeného Stribeckovho modelu trenia boli v rámci testovania overované aj iné modely trenia, napríklad *Reset Integrator model*. V tomto prípade sa však nepodarilo identifikovať parametre tak, aby bola dosiahnutá zhoda s nameranými výsledkami.

## 6.2 Tuhosť

Pohybová rovnica rezonančného mechanizmu (rov. 5.13) bola odvodená pre lineárnu tuhosť. Vzhľadom k tomu, že tuhosť reálnej sústavy je tvorená vhodne orientovanými permanentnými magnetami, je v skutočnosti tuhosť lineárna len v úzkom rozsahu natočenia páky, a preto v prípade že je vibračný generátor budený vyššou úrovňou vibrácií, môžeme pozorovať nelineárne chovanie. Jeden z prejavov nelinearity môžeme vidieť aj na obr. (6.5), kde je znázornená efektívna hodnota napätia na záťaži v závislosti na budiacich vibráciách.



Obr. 6.5: Porovnanie nameraných údajov a lin. charakteristiky (odpor záťaže  $R_z = 5,3 \text{ k}\Omega$ )

Pri vyšších úrovniach budenia môžeme vidieť odklon od lineárnej charakteristiky, ktorý je spôsobený hlavne nelinearitou v tuhosti (závislosť silového pôsobenia permanentného magnetu na vzdialenosti je nelineárna).

Práve kvôli tejto skutočnosti sme sa rozhodli zaviesť do modelu okrem nelinearity v tlmení aj nelineárnu tuhosť, ktorá by mala lepšie postihovať chovanie sústavy práve v tejto oblasti. Pri návrhu aproximačného polynómu sme vychádzali z práce [26], v ktorej bola optimalizovaná konštrukcia vibračného generátora a v rámci ktorej bol priebeh tuhosti určený na

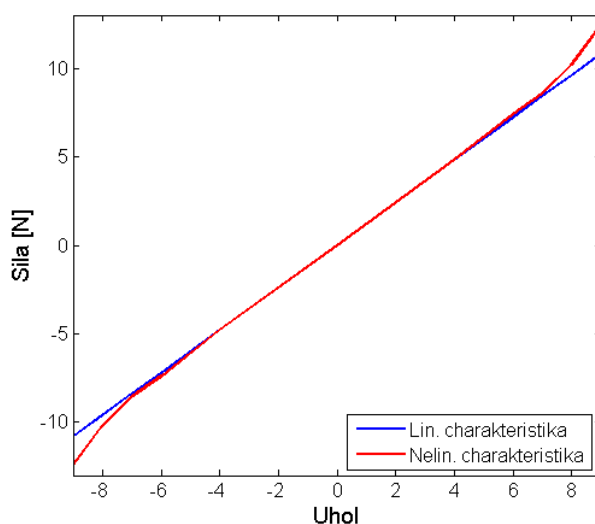
základe magnetostatickej analýzy v MKP. Na základe tejto práce sme formulovali nasledujúce požiadavky na tvar aproximačnej funkcie:

- v intervale  $(-5; 5)^\circ$  musí byť charakteristika približne lineárna tak, aby tuhosť v tomto intervale bola  $5833 \text{ Nm}^{-1}$
- v intervale  $(-10 \div -5)^\circ$  a  $(5 \div 10)^\circ$  musí tvoriť progresívnu (tuhnúcu) charakteristiku

Na základe týchto požiadaviek sme zvolili aproximačný polynóm:

$$k(\varphi_{st}) = 0,0071\varphi_{st}^6 - 0,74\varphi_{st}^4 + 28,2\varphi_{st}^2 + 5821,8 \quad (6.2)$$

kde  $\varphi_{st}$  je uhol natočenia páky v  $^\circ$ . Zobrazenie závislosti pôsobiacej sily na natočení je zobrazená na obr. (6.6).

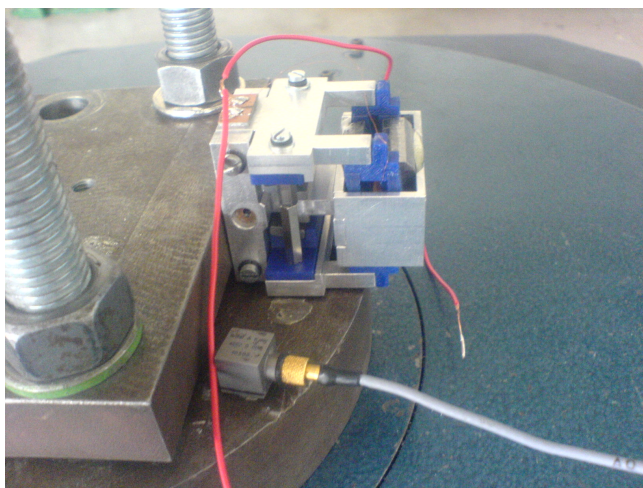


Obr. 6.6: Použitá nelineárna charakteristika tuhosti a porovnanie s lineárnym priebehom

---

## 7 Výsledky

Aby sme mohli porovnať výsledky zostaveného modelu, bolo nutné získať reálne namerané experimentálne dáta. Meranie odozvy na počiatočnú výchylku prebiehalo v laboratóriách ÚMTMB a UAI FSI VUT v Brne, meranie rezonančných charakteristík prebiehalo pomocou meracej ústredne VR 8500 na vibračnej stoličnici v laboratóriu ÚMTMB FSI VUT v Brne. Na obr. (7.1) je zobrazené usporiadanie merania a aj samotná meracia ústredňa. Vzhľadom k tomu, že vibračný generátor je v podstate napäťový zdroj, mohol byť pripojený priamo k svorkám meracej ústredne, prípadne osciloskopu.



a.



b.

Obr. 7.1: Meranie výstupných charakteristík vibračného generátoru a meracia ústredňa

Osciloskop (pri meraní odozvy na počiatočnú výchylku) ako aj meracia ústredňa umožňovala priamy export namerných dát vo formáte pre Matlab/Simulink.

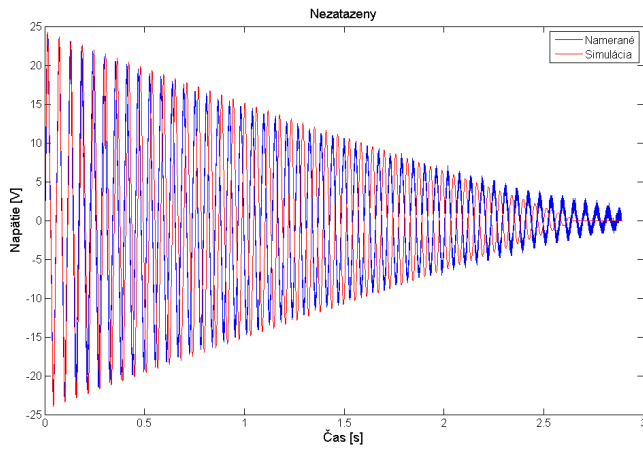
### 7.1 Odozva na počiatočnú výchylku

Odozva na počiatočnú výchylku má pri vibračnom generátore relatívne dobrú výpovednú hodnotu, pretože umožňuje určiť základné kvalitatívne parametre. Na jej základe je možné získať základnú predstavu o mechanickom a elektrickom tlmení, naladení vlastnej frekvencie, maximálnom výstupnom napätí a podobne.

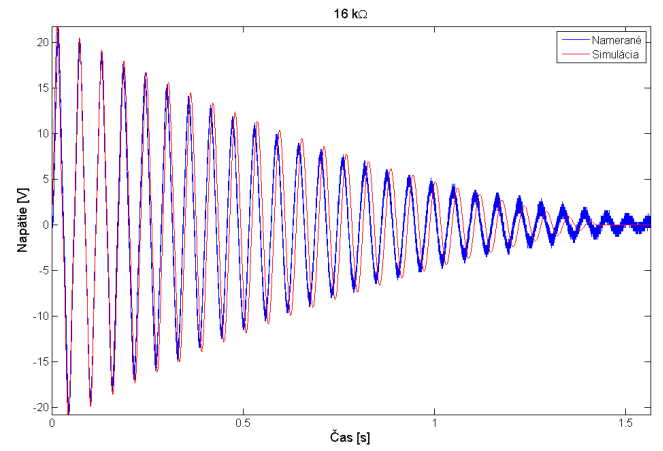
Základné parametre modelovaného vibračného generátoru sú uvedené v tab. (7.1). Pri meraní bola cievka vibračného generátoru priamo pripojená k vstupným svorkám osciloskopu, na ktorom sa teda priamo zobrazovalo výstupné napätie. Namerané boli odozvy generátoru pri rôznych odporoch záťaže a tieto priebehy boli porovnávané s výsledkami simulácie. Toto porovnanie môžeme vidieť na obr. (7.2).

| Parameter | Popis                                     | Hodnota                     |
|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| $I_0$     | moment zotrvačnosti páky (k osi otáčania) | $6,043437e-5 \text{ kgm}^2$ |
| $k$       | tuhosť                                    | $5833 \text{ Nm}^{-1}$      |
| $a_1$     | vzdialenosť „tuhosti“ od osi otáčania     | $11 \text{ mm}$             |
| $a_z$     | polomer zotrvačnosti                      | $31,9 \text{ mm}$           |
| $a_c$     | vzdialenosť cievky od osi otáčania        | $31,7 \text{ mm}$           |
| $N$       | počet závitov cievky                      | 1880                        |
| $R_c$     | odpor cievky                              | $1600 \Omega$               |
| $L$       | aktívna dĺžka závitov cievky              | $22,9 \text{ mm}$           |

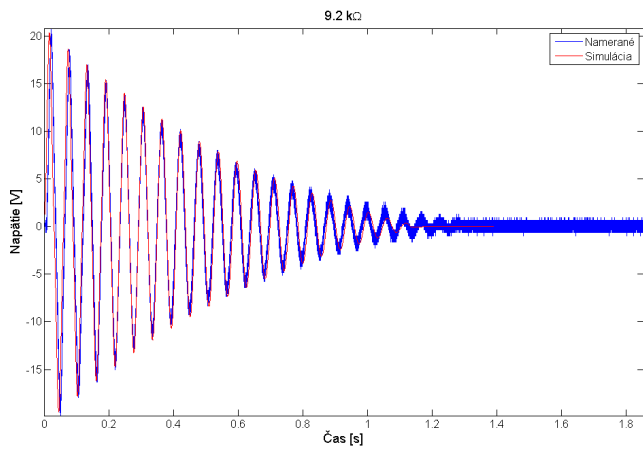
Tabuľka 7.1: Parametre pôvodného vibračného generátoru



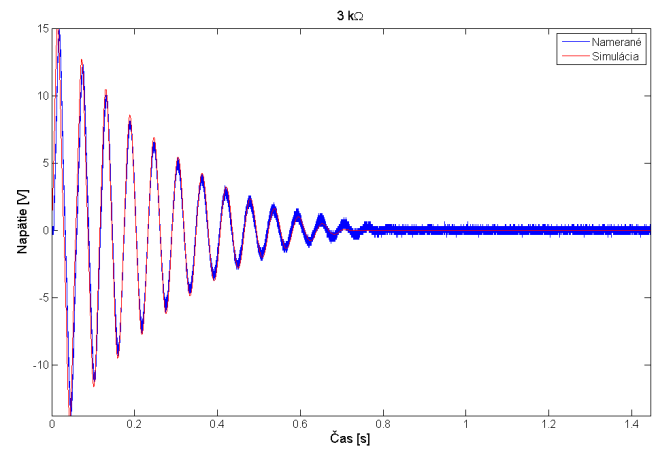
a.



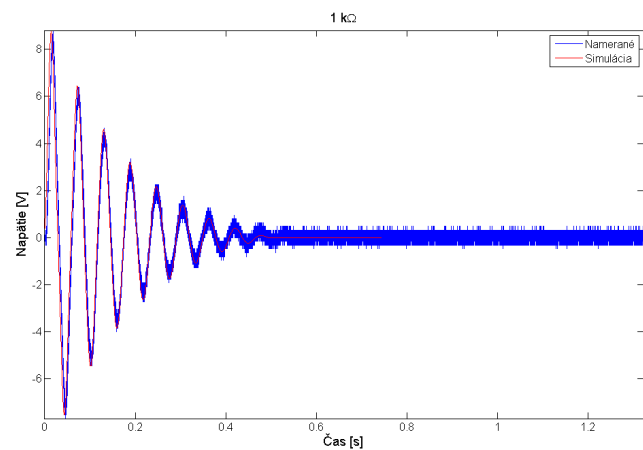
b.



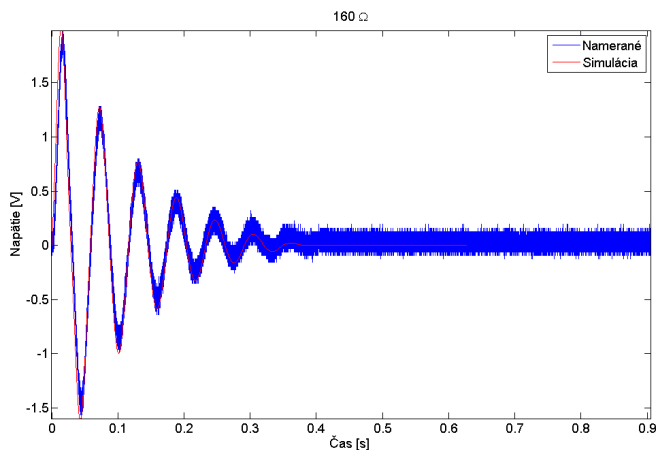
c.



d.



e.

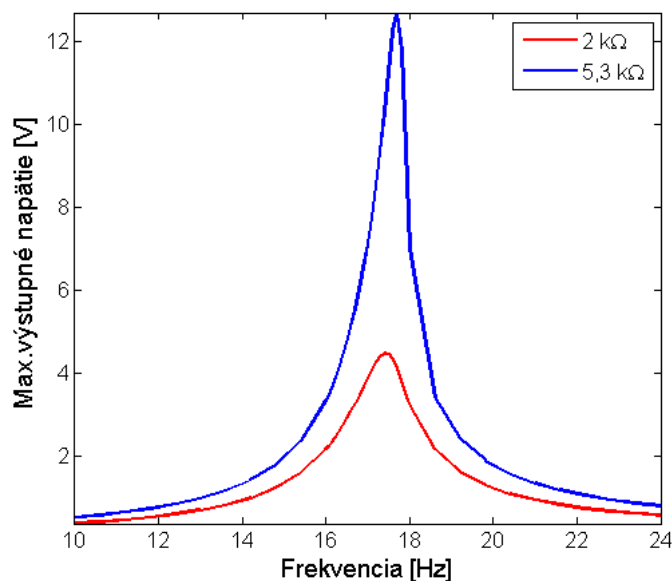


f.

Obr. 7.2: Porovnanie nameranej a simulovanej odozvy na počiatočnú výchylku

## 7.2 Ustálený stav

Okrem odozvy na počiatočnú výchylku bolo simulované aj chovanie modelu pri rôznych úrovniach budiacich vibrácií a rôznych odporoch pripojenej záťaže. Bola vytvorená aj závislosť výstupného výkonu na frekvencií budiacich vibrácií, ktorá je zobrazená na obr. (7.3).



Obr. 7.3: Závislosť maximálneho výstupného napätia na frekvencií pri vibráciách 0,2G

Samozrejme, aj chovanie v ustálenom stave bolo porovnávané s výsledkami meraní na vibračnej stolici. Zamerali sme sa hlavne na predpokladanú pracovnú oblasť generátora ktorá je:

- budiace vibrácie: 0,1 až 0,4 G
- odpor záťaže: 2 až 6,6 kΩ

V tomto prípade sme porovnávali efektívnu hodnotu napätia(RMS) s výsledkami simulácie. Porovnanie týchto výsledkov môžeme vidieť v tab. (7.2) a tab. (7.3). Percentuálna odchýlka nameraných a simulovaných výsledkov je znázornená aj na obr. (7.4).

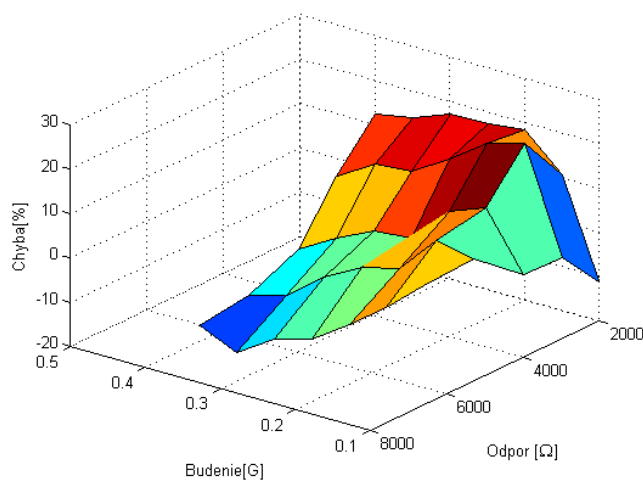
Ako môžeme vidieť z porovnania, výsledky simulácie a namerané hodnoty sa v predpokladanom pracovnom rozsahu zhodujú s maximálnym rozdielom približne 22%, čo je vzhľadom k plánovanému použitiu modelu akceptovateľný rozdiel.

| Budiace vibrácie<br>[G] | Odpor záťaže [kΩ] |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                         | 2                 |             | 3           |             | 4           |             | 5,3         |             | 6,6         |             |
|                         | Nam.<br>[V]       | Sim.<br>[V] | Nam.<br>[V] | Sim.<br>[V] | Nam.<br>[V] | Sim.<br>[V] | Nam.<br>[V] | Sim.<br>[V] | Nam.<br>[V] | Sim.<br>[V] |
| 0,10                    | 1,22              | 1,08        | 1,7         | 1,67        | 2,3         | 2,27        | 2,8         | 3,01        | 3,4         | 3,64        |
| 0,15                    | 1,94              | 2,15        | 2,6         | 3,17        | 3,6         | 4,01        | 4,4         | 4,81        | 5,4         | 5,38        |
| 0,20                    | 2,6               | 3,08        | 3,6         | 4,29        | 4,8         | 5,19        | 6           | 6,03        | 7,1         | 6,63        |
| 0,25                    | 3,3               | 3,87        | 4,6         | 5,22        | 6,2         | 6,19        | 7,2         | 7,09        | 8,8         | 7,73        |
| 0,30                    | 3,9               | 4,57        | 5,6         | 6,06        | 7,2         | 7,13        | 8,6         | 8,09        | 10,2        | 8,71        |
| 0,35                    | 4,6               | 5,24        | 6,4         | 6,88        | 8,4         | 7,99        | 10,2        | 8,94        | 12          | 9,60        |
| 0,40                    | 5,25              | 5,89        | 7,4         | 7,59        | 9,6         | 8,66        | 11,2        | 9,53        | 12          | 10,04       |

Tabuľka 7.2: Porovnanie nameraných a simulovaných výsledkov

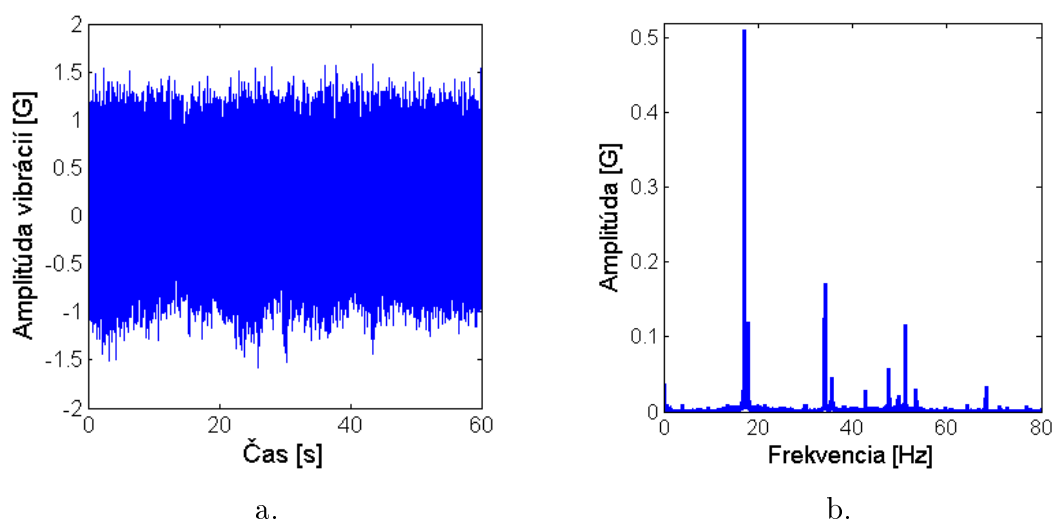
| Budiace vibrácie<br>[G] | Odpor záťaže [kΩ] |      |      |       |       |
|-------------------------|-------------------|------|------|-------|-------|
|                         | 2                 | 3    | 4    | 5,3   | 6,6   |
|                         | Δ[%]              | Δ[%] | Δ[%] | Δ[%]  | Δ[%]  |
| 0,10                    | -11,2             | -1,7 | -1,2 | 7,6   | 7     |
| 0,15                    | 10,7              | 21,8 | 11,4 | 9,4   | -0,2  |
| 0,20                    | 18,4              | 19,3 | 8,3  | 0,6   | -6,6  |
| 0,25                    | 17,2              | 13,4 | 0    | -1,4  | -12,1 |
| 0,30                    | 17,3              | 8,2  | -1   | -5,9  | -14,6 |
| 0,35                    | 14,0              | 7,5  | -4,8 | -12,4 | -20   |
| 0,40                    | 12,4              | 2,5  | -9,7 | -14,9 | -16,2 |

Tabuľka 7.3: Percentuálny rozdiel medzi nameranými a simulovanými výsledkami



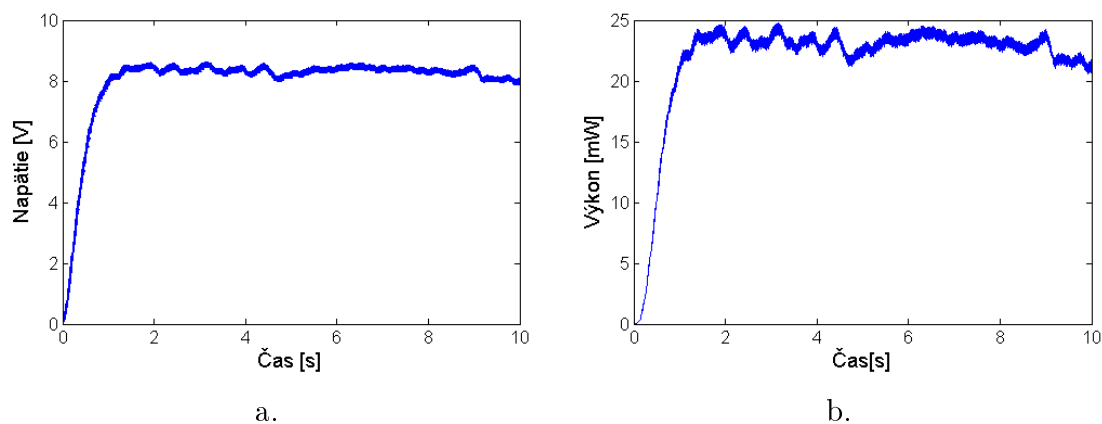
Obr. 7.4: Odchýlka medzi skutočnými priebehmi a simuláciou

V predchádzajúcom prípade bol model budený harmonickým signálom. Pri skutočnom použití majú ale vstupné vibrácie podstatne zložitejší priebeh, ktorý sa v istých charakteristikách môže podobáť náhodnému deju, avšak obsahuje zložku na očakávanej vlastnej frekvencii generátoru. Príklad reálneho priebehu budiacich vibrácií v časovej oblasti je možné vidieť na obr. (7.5). Zároveň je tu znázornené aj frekvenčné spektrum týchto vibrácií, ktoré ukazuje výraznú frekvenciu v okolí 17 Hz.



Obr. 7.5: Skutočný priebeh vibrácií, a. v časovej oblasti, b. fourierovské spektrum

Vzhľadom k priebehu týchto vibrácií, dá sa očakávať veľké kolísanie indukovaného napätia. Preto sa pri simulácii využil aj druhý model výstupného obvodu, t.j. model usmerňovača s filtračným kondenzátorom. Výsledky simulácie pri odpore záťaže  $R_z = 3\text{ k}\Omega$  a kapacite filtračného kondenzátora  $C_f = 220\text{ nF}$  sú znázornené na obr. (7.6).

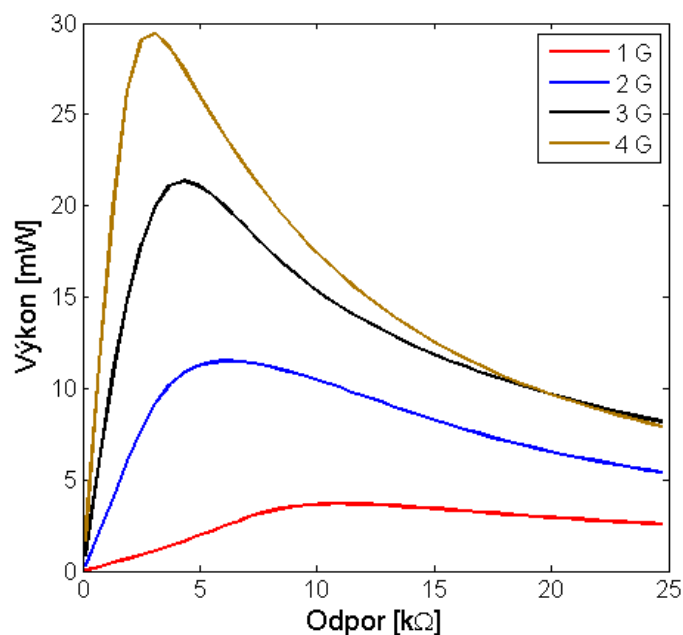


Obr. 7.6: Simulované výsledky modelu budeného reálnymi vibráciami

## 7.3 Určovanie optimálnych parametrov

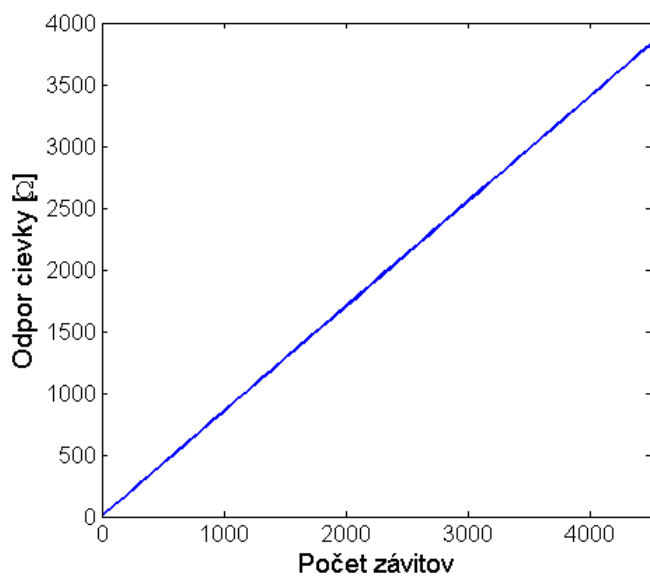
Vibračný generátor je komplexná nelineárna mechatronická sústava. Vzhľadom k previazanosti mechanickej a elektrickej časti sú jednotlivé jeho parametre na sebe závislé a určovanie optimálnych parametrov je teda relatívne komplikované a zdĺhavé. Práve simulačné modelovanie poskytuje vynikajúcu možnosť optimalizácie parametrov sústavy ešte pred reálnou výrobou a testovaním.

Jedným z najdôležitejších parametrov je optimálna veľkosť zaťažovacieho odporu tak, aby bol maximalizovaný generovaný výkon. Aby sme dosiahli tento stav, musí mať elektrické a mechanické tlmenie rovnakú veľkosť (podrobnejšie informácie o tejto problematike je možné nájsť v [1]). Závislosť generovaného výkonu na pripojenom odpore pre modelovaný generátor je možno vidieť na obr. (7.7).

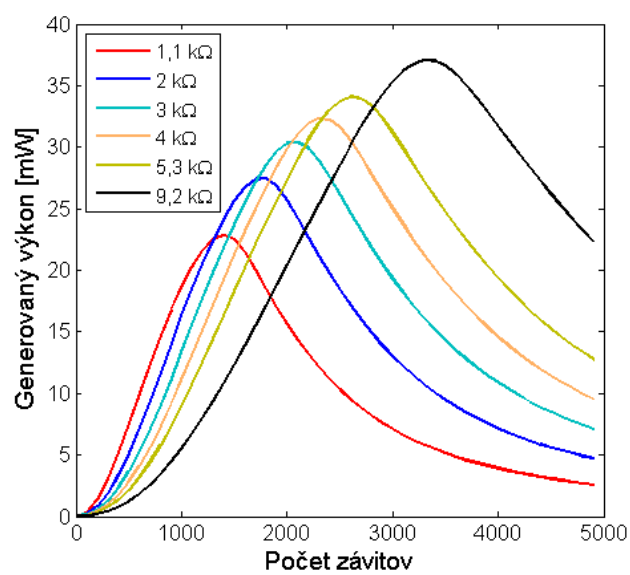


Obr. 7.7: Závislosť výkonu generátora na pripojenej záťaži

Okrem zaťažovacieho odporu je ďalším parametrom elektrickej časti aj počet závitov cievky. Aj v prípade tohoto parametru je možné nájsť optimum pri ktorom je generovaný maximálny výkon. Treba však brať do úvahy aj fakt, že pri zvyšovaní počtu závitov zároveň stúpa aj odpor cievky (obr. (7.8a.)), čo zvyšuje straty a zároveň mení optimálny zaťažovací odpor. Závislosť generovaného výkonu na počte závitov môžeme nájsť na obr. (7.8b.).



a.



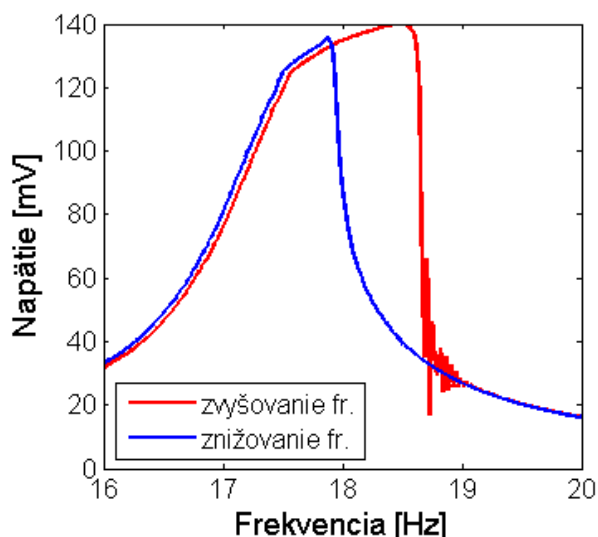
b.

Obr. 7.8: Závislosť výkonu generátora a závislosť odporu cievky na počte závitov

## 8 Možnosti ďalšieho vývoja modelu

Zostavený komplexný model vibračného generátora predstavuje veľmi dobrý základ pre jeho budúce reálne využitie. Poskytuje však ďalšie možnosti na jeho ďalší vývoj. Tieto možnosti by sa mohli zhrnúť do týchto základných bodov:

- **rozšírenie možností elektrickej časti(výstupného obvodu)**-ide hlavne o prida-  
nie alternatívnych výstupných obvodov (zosilňovače, iné druhy usmerňovačov, ...),  
prípadne simuláciu reálneho chovania pripojenej záťaže (nekonštatná impedancia po-  
čas pracovného cyklu, ...)
- **rozšírenie oblastí v ktorej sa model zhoduje s reálnymi výsledkami**- hoci v  
súčasnej podobe model vyhovuje v predpokladanom pracovnom rozsahu, jeho ďalším  
zlepšovaním (napr. komplexnejším modelom trenia) by sme mohli dosiahnuť rozšírenie  
tohto rozsahu.
- **modifikácia pre upravenú konštrukciu**-v súčasnosti je k dispozícii upravený typ  
vibračného generátora pri ktorom sa vďaka menším konštrukčným úpravám(menší po-  
lomer čapu páky, presnejšia výroba a montáž) podarilo dosiahnuť lepšie kvalitatívne  
parametre (menší pomerný útlm, vyššia citlivosť, ...).



Obr. 8.1: Frekvenčná charakteristika upraveného vibračného generátoru(0,15G, 510  $\Omega$ )

---

Posledné 2 body v sa istým spôsobom prelínajú, pretože v oboch prípadoch ide o lepšie postihnutie nelineárneho chovania sústavy. Platí to najmä v prípade upraveného generátora, kde je jeho nelineárnosť zrejmá aj z amplitúdo-frekvenčnej charakteristiky (obr. (8.1)), kde vidíme klasické nelineárne chovanie (odlišné krivky pre zvyšovanie a znižovanie frekvencie).

Dá sa tiež predpokladať, že pri ďalšom vývoji vibračných generátorov tejto konštrukcie dôjde k ďalšiemu posilneniu nelineárneho chovania a preto by sa ďalší vývoj tohoto modelu mal uberať práve týmto smerom.

---

## 9 Záver

Hlavným cieľom práce bolo zostaviť a implementovať komplexný virtuálny model elektromagnetického vibračného generátora. Ďalej bolo nutné pre tento model nájsť a identifikovať parametre tak, aby zodpovedali reálne nameraným charakteristikám.

Na základe tohoto cieľa bola realizovaná rešerš zaoberajúca sa problematikou tzv. „*energy harvesting*” systémov so zameraním hlavne na vibračné generátory. Pretože práca sa zaoberá modelovaním elektromagnetického vibračného generátora, boli uvedené najčastejšie používané konštrukcie, kľúčové miesta pri ich návrhu, použitie a základný prehľad parametrov existujúcich zariadení. Taktiež boli stručne zhodnotené možnosti modelovania takýchto mechatronických sústav a na základe predpokladaného využitia modelu bol ako hlavný nástroj zvolený Matlab/Simulink, najmä vďaka jeho širokej podpore modelovania subsystémov s rôznou fyzikálnou podstatou.

Pri samotnej tvorbe modelu sa vychádzalo z rozdelenia sústavy na mechanickú a elektrickú časť, ktoré vzájomne prepojené jednotlivými veličinami. Pre mechanickú časť bola na zostavení pohybových rovníc použitá metóda Lagrangeových rovníc II. druhu. V elektrickej časti bol odvodený vzťah pre indukované napätie a z rovnosti elektrického a mechanického výkonu bolo odvodené elektrické tlmenie ktoré v podstate tvorí spätnú väzbu celého systému. Vzhľadom k tomu, že oba tieto vzťahy vyžadujú znalosť magnetickej indukcie prechádzajúcej cievkou, a táto hodnota nie je voči natočeniu páky rezonančného mechanizmu konštantná, bola na určenie jej priebehu použitá magnetostatická analýza metódou MKP.

Pri implementácii zostaveného modelu do prostredia Matlab/Simulink bola na modelovanie výstupného obvodu využitá knižnica SimPowerSystems, ktorá umožňuje jednoduchý ďalší rozvoj v oblasti modelovania elektrickej časti.

Na overenie správnosti zostaveného a identifikovaného modelu bola použitá odozva na počiatočnú výchylku a generované napätie v ustálenom stave pri buzení harmonickým signálom. Výsledky simulácií boli porovnávané s nameranými hodnotami a vykazovali vzhľadom na predpokladané použitie modelu veľmi dobrú zhodu. Model bol taktiež buzený aj reálne nameranými vibráciami, pričom pri tejto simulácii bol využitý aj model neriadeného usmerňovača s filtračným kondenzátorom.

Na základe získaných informácií boli v závere práce načrtnuté aj ďalšie možnosti vývoja tohoto modelu do budúcnosti. Vzhľadom k získaným výsledkom sa dá povedať, že práca splnila očakávané ciele a je dobrým základom pre ďalší rozvoj.

---

## 10 Literatura a odkazy

- [1] HADAŠ, Z.: *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007
- [2] ROUNDY, S. J.: *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*, Ph.D Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley CA, 2003
- [3] MĚŘIČKA, J., ZOUBEK, Z.: *Obecná teorie elektrického stroje*, SNTL, Praha, 1973
- [4] BREPTA, R., PŮST, L., TUREK, F.: *Mechanické kmitání*, Sobotáles, Praha, 1994
- [5] MĚŘIČKA, J., ZOUBEK, Z.: *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*, Computer Press, Brno, 2006
- [6] KULAH, H., NAJAFI, K.: *Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications*, Sensors Journal, IEEE Volume 8, Issue 3, March 2008 Page(s):261 - 268, 2008
- [7] YEATMAN, ERIC , ET AL. : *Micro-Power Generation from Body Motion [online]*, Dostupný z WWW: <<http://www3.imperial.ac.uk/opticalandsemidev/microsystems/electrical/vibrationenergy>> , [2008] [cit. 2009-03-10]
- [8] TORRES, ERICK O., RINCSN-MORA, GABRIEL A.: *Energy-harvesting chips: The quest for everlasting life[online]*, Dostupný z WWW: <[http://www.eetasia.com/ART\\_8800378146\\_765245\\_NT\\_27d01882.HTM](http://www.eetasia.com/ART_8800378146_765245_NT_27d01882.HTM)>, [2005] [cit. 2009-03-10]
- [9] KONRÁD, LIBOR: *Návrh konstrukce elektromagnetické části vibračního generátoru pro nízké frekvence vibrací*, VUT FSI Brno, 2008 Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [10] : *Kinetická energie tělesa konajícího ORP [online]*, Dostupný z WWW: <<http://hook.kmp.tul.cz/kmp/imech/dynamika/orptelesa/energieorp/energieorp.html>>, 2004 [cit. 2009-03-25]

- 
- [11] FIALA, P., KADLECOVÁ, E.: *Modelování elektromagnetických polí*, VUT v Brně, Brno, 2005
- [12] PRIYA, Shashank, et al. *Energy Harvesting Technologies*. [s.l.] : Springer, 2009. 515 s. ISBN 978-0-387-76463-4
- [13] PARADISO, Joseph A., STARNER, Thad. *Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics*. PERVASIVEcomputing. 1.1.2005, is. 4, s.
- [14] *Power Backup for Wireless Sensors* [online]. c2009 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.cymbet.com/content/applications-wsensors.asp>>. 18-27.
- [15] S. W. Arms, C. P. Townsend, D. L. Churchill, J. H. Galbreath, and S. W. Mundell, *Power management for energy harvesting wireless sensors*, Proc. SPIE 5763, 267 (2005)
- [16] *Energy harvesting as enabling factor for bridge monitoring* [online]. [2007] [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.intelligent-systems.info/bridge.htm>>.
- [17] ALLAN , Roger . *Energy Harvesting Looks To Solve Critical TPMS Issues* . Electronic Design Power [online]. 2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://electronicdesign.com/Articles/Index.cfm?AD=1&ArticleID=20703>>.
- [18] *PMG Perpetuum* [online]. c2007 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <[http://www.perpetuum.co.uk/home.php?page\\_id=11](http://www.perpetuum.co.uk/home.php?page_id=11)>.
- [19] *VEH-360 Datasheet* [online]. Ferro Solutions, 2007 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.ferrosi.com/files/VEH360\\_datasheet.pdf](http://www.ferrosi.com/files/VEH360_datasheet.pdf)>.
- [20] *Hardware description language* [online]. 2007 , 18.3.2009 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware\\_description\\_language](http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware_description_language)>.
- [21] Wang, L., Kazmierski, T., Al-Hashimi, B., Beeby, S. and Torah, *An Integrated Approach to Energy Harvester Modeling and Performance Optimization*. In: IEEE Behavioral Modeling and Simulation Conference (BMAS 2007), September 20-21, 2007, San Jose, California, USA.
- [22] OLSSON, H., et al. *Friction Models and Friction Compensation*. [s.l.] : [s.n.], 1997. 37 s. Dostupný z WWW: <[http://www.lag.ensieg.inpg.fr/canudas/publications/friction/dynamic\\_friction\\_EJC\\_98.pdf](http://www.lag.ensieg.inpg.fr/canudas/publications/friction/dynamic_friction_EJC_98.pdf)>.

- 
- [23] MÁRTON, Lőrinc, LANTOS, Béla . *Identification and Model-based Compensation of Striebeck Friction*. In Acta Polytechnica Hungarica. [s.l.] : [s.n.], 2006. Vol. 3. No. 3. s. 45-58.
- [24] PŘIKRYL, K.: *Kinematika*, skriptum VUT v Brně, PC-DIR Real, 1994
- [25] PAZDERA, Ivo. *Friction models in servodrives*. Sborník prací konference a soutěže Student EEICT 2007 [online]. 2007 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2007/sbornik/03-doktorske\\_projekty/04-silnoprouda\\_elektrotechnika\\_a\\_elektroenergetika/14-xpazde05.pdf](http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2007/sbornik/03-doktorske_projekty/04-silnoprouda_elektrotechnika_a_elektroenergetika/14-xpazde05.pdf)>.
- [26] JUROSZ, P. *Mechatronický návrh elektromagnetického vibračního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

---

# 11 Zoznam príloh

Prílohy práce tvorí CD obsahujúce:

- Model vibračného generátoru v prostredí Matlab/Simulink vrátane potrebných skriptov
- Namerané charakteristiky vibračného generátora
- Elektronická verzia diplomovej práce