

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

# MECHATRONICKÝ NÁVRH ELEKTROMAGNETICKÉHO VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

MECHATRONIC PROPOSAL OF ELECTROMAGNETIC VIBRATION POWER GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL JUROSZ

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: 2008/2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Pavel Jurosz

který/která studuje v **magisterském navazujícím 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:

### **Mechatronický návrh elektromagnetického vibračního generátoru**

v anglickém jazyce:

### **Mechatronic Proposal 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 konstrukce generátorů.
2. Porovnejte a zhodnoťte jednotlivé konstrukční varianty vibračního generátoru.
3. Na základě provedené rešerše navrhnete úpravy a inovace konstrukčního řešení stávajícího vibračního generátoru z hlediska jeho výroby a generovaného výkonu.
4. Vytvořte komplexní mechatronický model upraveného vibračního generátoru.
5. Na základě vytvořeného modelu navrhnete parametry vibračního generátoru s ohledem na minimalizaci rozměrů a hmotnosti.

Seznam odborné literatury:

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.

Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

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

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

Fiala, P., Kadlecová, E.: Modelování elektromagnetických polí, VUT v Brně, Brno, 2005.

Internet

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 14.11.2008

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá úpravou konstrukce generátoru elektrické energie z vibrací, který je jedním ze způsobů řešení problematiky dlouhodobě stabilního zdroje energie pro napájení bezdrátových senzorů. Na základě rešerše studující aktuální stav problematiky je navržena nová konstrukce generátoru, která se snaží vylepšit vlastnosti současného generátoru s ohledem na zachování co nejmenších rozměrů a hmotnosti. Jedním z výstupů této práce jsou výsledky simulací s parametry navrženého generátoru a jejich následné vyhodnocení.

## **Summary**

This thesis deals with modifications to the construction of vibration-to-electricity energy converter, which is one of possible solutions to problem of sustainable and stable energy source for wireless sensor supply. Upon the exploration of the present state of this problem, new construction of generator is proposed. The aim of this proposal is to enhance the existing generator properties with respect to retention of its dimensions and its weight. Results obtained by simulations of model with proposed parameters are presented and analysed.

## **Klíčová slova**

Vibrace, Energie z vibrací, Vibrační generátor, Získávání energie z prostředí, Elektromagnetická indukce, Nelineární tuhost

## **Keywords**

Vibration, Energy from Vibrations, Vibrational Power Generator, Energy Harvesting, Energy Scavenging, Electromagnetic Induction, Nonlinear Stiffness

## **Bibliografická citace**

JUROSZ P. *Mechatronický návrh elektromagnetického vibračního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

## **Čestné prohlášení**

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího DP.

Pavel Jurosz, Brno, 2009

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval všem lidem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce, především pak Ing. Zdeňku Hadašovi Ph.D. za jeho podnětné rady a připomínky.

---

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Rešerše</b>	<b>11</b>
2.1	Získávání energie z prostředí . . . . .	11
2.1.1	Piezoelektrická přeměna . . . . .	13
2.1.2	Elektrostatická přeměna . . . . .	14
2.1.3	Elektromagnetická přeměna . . . . .	15
2.2	Analýza současného stavu . . . . .	16
2.2.1	Experimentální generátory . . . . .	16
2.2.2	Komerční generátory . . . . .	21
2.2.3	Elektromagnetický generátor z VUT Brno . . . . .	23
2.3	Srovnání jednotlivých konstrukčních variant . . . . .	25
2.4	Cíle řešení . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Řešení</b>	<b>28</b>
3.1	Volba konstrukčního řešení . . . . .	28
3.2	Konstrukce generátoru . . . . .	28
3.2.1	Magnetický obvod . . . . .	29
3.2.2	Tuhost mechanismu . . . . .	32
3.2.3	Páka generátoru . . . . .	38
3.2.4	Uložení páky v rámu generátoru . . . . .	39
3.2.5	Cívka . . . . .	40
3.2.6	Rám generátoru . . . . .	42
3.2.7	Generátor jako celek . . . . .	43
3.3	Model generátoru . . . . .	43
3.4	Návrh optimálních parametrů generátoru . . . . .	47
3.4.1	Parametry cívky . . . . .	47

---

3.4.2	Páka generátoru . . . . .	50
3.5	Výsledky simulací a jejich zhodnocení . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>

---

# 1 Úvod

Spolu s neustálým rozvojem bezdrátových technologií a senzorických systémů, které prostupují převážnou většinou technických oborů, jdou ruku v ruce i nároky na jejich napájení. Přestože se výrobci těchto zařízení snaží o dosažení co nejnižší energetické spotřeby svých zařízení, nutnost dodávání energie pochopitelně přetrvává.

Na první pohled se jako nejlogičtější variantou napájení jeví použití baterií, jejichž vývoj rovněž pokračuje rychlým tempem. Jejich nevýhodou však zůstává relativně nízká životnost a degradace vlastností s časem, která navíc může být uspíšena nepříznivými vlivy okolního prostředí. Životnost baterie tak často předurčuje životnost celého systému. Proto se zájem mnoha vědeckých pracovišť po celém světě již mnoho let upírá ke zdrojům, jejichž účinnost zůstává vysoká i po několika letech provozu. Patří k nim především obnovitelné zdroje energie, které k napájení připojených aplikací využívají prakticky nevyčerpatelnou energii okolního prostředí. Prostředí, ve kterých technické soustavy pracují, jsou však velice rozdílná a proto se liší i zařízení, která přeměnu energie zprostředkovávají. Při jejich návrhu se musí zohlednit nejen nároky konkrétní aplikace, ale i možnosti, které prostředí kolem této aplikace poskytuje.

Forem, ve kterých se energie v okolním prostředí nachází, je mnoho. V této práci je stručně pojednáno o některých z nich a podrobněji je rozebrána problematika využití energie z vibrací. Ty jsou nepříjemnou, nicméně nedílnou součástí mnoha technických aplikací a jejich využití pro přeměnu na energii elektrickou je proto nasnadě. Tato práce se zabývá především elektromagnetickou přeměnou energie mechanických vibrací na energii elektrickou, kterou zprostředkovává zařízení zvané vibrační generátor. Tento způsob přeměny má mnoho specifik, které inženýr během návrhu generátoru nemůže opomenout.

Vytvoření celkového návrhu generátoru je komplexní problém a podle toho se k němu musí přistupovat. Není možné navrhnout jednu část generátoru, aniž by inženýr nemyslel na to, jak jeho návrh ovlivní část jinou. Systematický přístup k řešení je nutností.

Proto se i tato práce snaží přistupovat k uvedenému problému systematicky. Od

---

získání informací o současném stavu problematiky přes srovnání možných variant až po konkrétní návrh elektromagnetického generátoru a vytvoření jeho modelu, na základě kterého jsou provedeny simulace a jejich vyhodnocení.

---

## 2 Rešerše

### 2.1 Získávání energie z prostředí

V prostředí kolem zařízení, která pro svou funkci potřebují zdroj elektrické energie, je akumulováno velké množství energie v různých formách. Z hlediska jejího využití pro převod na energii elektrickou patří mezi nejdůležitější formy energie zářivá (energie elektromagnetického záření), tepelná a mechanická. Možnosti využití jednotlivých forem energie se liší.

Zářivou energii reprezentuje především energie slunečního záření, k jejíž přeměně na energii elektrickou se využívají fotovoltaické články. V současné době jsou nejrozšířenější články z krystalického křemíku, u kterých bylo v laboratorních podmínkách dosaženo až 25% účinnosti, u komerčně dodávaných článků pak asi 20%. V současné době jsou nejúčinnějšími články třívrstvé články vyvinuté v laboratořích společnosti Boeing Spectrolab, u kterých byla ověřena 40,7% účinnost. [1] Jejich komerční využití však doposud nebylo zahájeno.

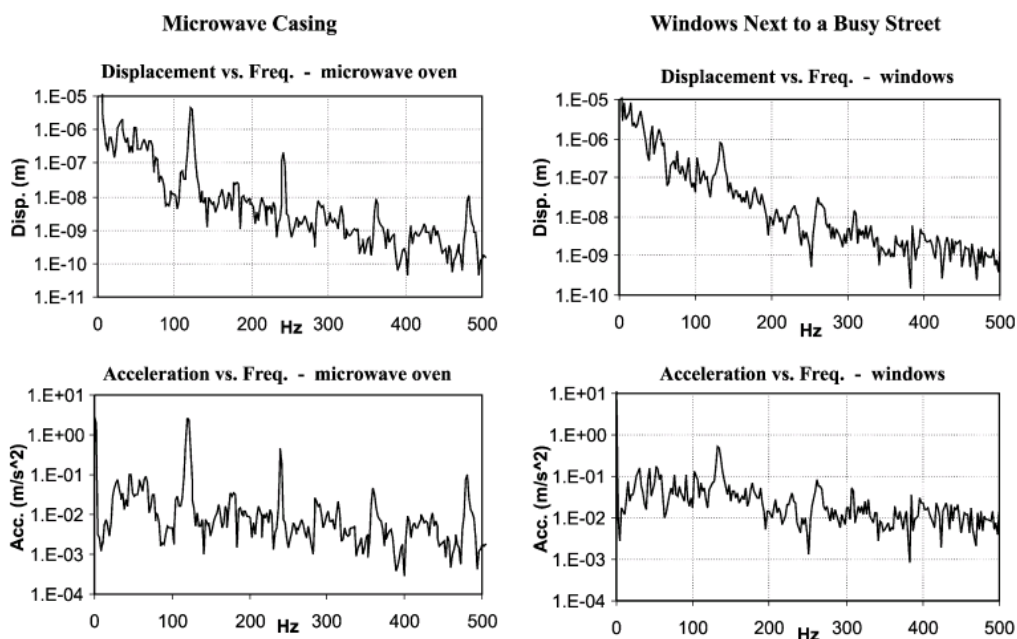
Za jasného slunečního počasí dosahuje kolmo dopadající záření maximální hustoty energie až  $100 \text{ mW/cm}^2$  a v tomto ohledu tak sluneční záření patří k nejlepším obnovitelným zdrojům energie. Pokud vezmeme do úvahy účinnost komerčně vyráběných solárních článků, můžeme generovat výkon o hustotě kolem  $20 \text{ mW/cm}^2$ . S klesajícím osvětlením se však výkon dopadajícího záření prudce snižuje a v osvětlené místnosti může hustota energie generované solárním článkem klesnout až pod  $10 \mu\text{W/cm}^2$  [2]. Při instalaci solárních článků se proto musí počítat s jejich správným umístěním a především s vlivem klimatických podmínek.

Stabilnější zdroj energie představuje energie tepelná. Teoretická účinnost termoelektrického generátoru je rovna účinnosti Carnotova cyklu, v praxi se však dosahuje mnohem nižší účinnosti (pod 1%). Termoelektrické generátory využívající Seebeckův jev, které patří mezi nejrozšířenější, dosahují při rozdílu teplot  $10^\circ\text{C}$  hustoty výkonu asi  $15 \mu\text{W/cm}^2$ . Vyšších výkonů bylo dosaženo u piezoelektrických generátorů pracujících na principu tepelné roztažnosti. Výkonová hustota u takových zařízení dosahuje při teplotním rozdílu  $5^\circ\text{C}$  hodnot až  $100 \mu\text{W/cm}^2$  [2].

Další formou energie, kterou je možné využít, je energie mechanická. Tou se vyznačují především pohybující se objekty, ať už kapalného či pevného skupenství.

Energie proudícího vzduchu využívají průtokové generátory. Kromě klasických větrných turbín s lopatkami roztáčejícími rotor elektrického generátoru existují i jiné konstrukce. Jednou z nich je několik sériově zapojených piezoelektrických plátek, které vlajou ve větru a díky tomu se deformují, čímž na nich vzniká náboj. O piezoelektrických generátorech bude pojednáno v kapitole 2.1.1. Odhadovaná účinnost těchto ohebných piezoelektrických elementů činí  $(0,01 \div 0,1)\%$ . Vědci z University of Minnesota dokázali s generátorem s piezoelektrickými elementy z polyvinylidenfluoridu o rozměrech  $18 \times 25 \times 0,05 \text{ mm}$ , nalepenými na jádru o tloušťce  $0,4 \text{ mm}$ , generovat výkon  $10 \text{ mW}$  při rychlosti větru asi  $5,4 \text{ m/s}$  [3].

Ke generování elektrické energie lze využít i energii mechanických vibrací těles. Vibrace jsou součástí většiny technických soustav, jejich frekvence a amplitudy se však výrazně liší. Příklad vibračního spektra mikrovlnné trouby a kancelářského okna vedoucího do rušné ulice je zobrazen na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Spektrum vibrací mikrovlnné trouby a okna kanceláře vedoucího do rušné ulice (zdroj: [4])

K přeměně energie mechanických vibrací na elektrickou energii se využívá tří principů:

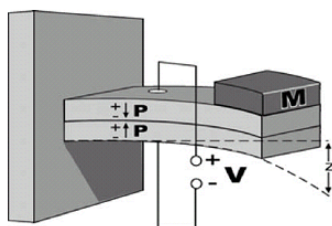
- piezoelektrické přeměny,
- elektrostatické přeměny,
- elektromagnetické přeměny.

### 2.1.1 Piezoelektrická přeměna

Piezoelektrické generátory pracují na základě přímého piezoelektrického jevu: piezoelektrický krystal při své deformaci vyvolané tlakem, tahem, ohybem nebo krutem generuje elektrické napětí.

Piezoelektrické elementy jsou k dispozici v několika formách: jako monokrystaly, jako piezokeramický či polymerní materiál nebo ve formě tenkých vrstev.

Příklad generátoru pracujícího na tomto principu je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Princip piezoelektrického generátoru (zdroj: [4])

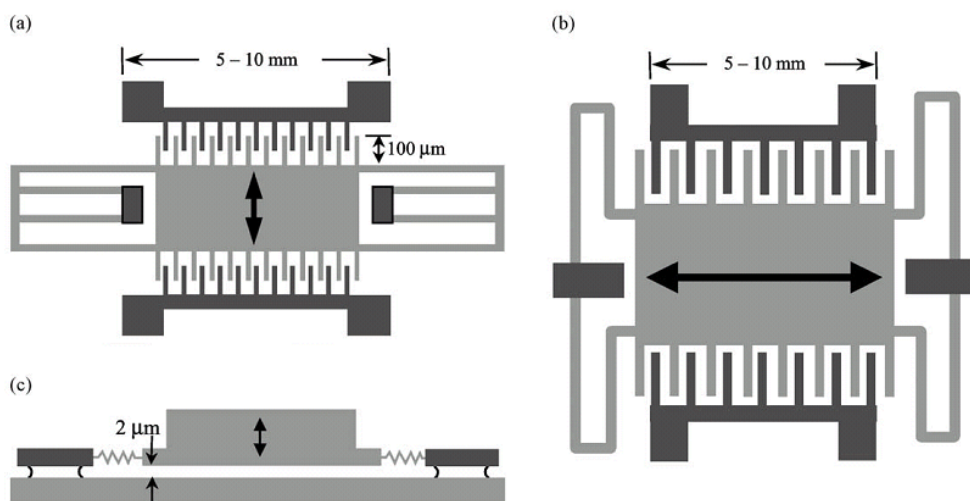
Zobrazený typ piezoelektrického generátoru patří mezi nejpoužívanější. Sestává z jedné či více vrstev piezoelektrického bimorfu (v tomto případě ve tvaru plátku), které bývají pro zvýšení tuhosti mechanismu připevněny na nosník. Na konci nosníku bývá pro zvýšení výkonu generátoru umístěna seismická hmota. Tato konstrukce je schopna pracovat i na nízkých frekvencích.

Využití piezoelektrických generátorů je v současné době na vzestupu, v japonském Tokiu ku příkladu probíhá testování jejich použití v podlaze nádražní budovy s frekventovaným pohybem osob. Odhaduje se, že systém o rozloze  $25 \text{ m}^2$  bude za normálního provozu schopný dodávat  $1400 \text{ kW/s}$ , což odpovídá spotřebě všech displejů nacházejících se na nádraží.

## 2.1.2 Elektrostatická přeměna

Základem elektrostatické přeměny je proměnný kapacitor. Princip spočívá ve změně kapacity takového kondenzátoru, která vyvolá změnu napětí mezi deskami kondenzátoru (při konstantním náboji), případně pohyb náboje z desek kondenzátoru (při konstantním napětí). V obou případech dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou.

Několik možných konstrukcí elektrostatických generátorů je zobrazeno na obrázku 2.3. Obrázek 2.3a) představuje soustavu, u níž se díky relativnímu pohybu seismické hmoty, jehož směr je naznačen šipkou, mění míra plošného překrytí destiček. Tmavou barvou jsou obarveny části, které jsou pevně vázány k vibrující podložce, světlou pak volně se pohybující část soustavy. Kapacita kondenzátorů v soustavě na obrázku 2.3b) se mění vlivem proměnlivé velikosti vzduchové mezery. Na obrázku 2.3c) pak je zobrazena soustava, kterou tvoří jedna dvojice větších desek, mezi kterými se nachází vzduchová mezera o proměnné tloušťce.



Obrázek 2.3: Typy elektrostatických generátorů (zdroj: [4])

Největší nevýhodou třetí z uvedených konstrukcí je velké tlumení vlivem vytěšňování vzduchu z prostoru mezi deskami a při malé vzdálenosti mezi deskami také možnost interakce mezi povrchy desek. Minimální vzdálenost mezi deskami proto nemůže být zmenšována pod určitou hranici, což nepříznivě ovlivňuje nejvyšší

dosažitelnou kapacitu kondenzátoru. Proto se tato konstrukce i přes některé výhody příliš nevyužívá.

Použití zbylých dvou konstrukcí je závislé především na amplitudě vibrací. Při vyšších amplitudách je výhodnější konstrukce s proměnnou mírou překrytí elektrod, nicméně toto řešení je náchylnější na parazitní kapacity v systému a při vibracích v jiném, než požadovaném směru, může dojít ke zkratu mezi vedlejšími elektrodami. Pro malé amplitudy je nejvhodnější konstrukce zobrazená na obrázku 2.3b).

Největší nevýhodou všech elektrostatických generátorů je skutečnost, že k zahájení své funkce potřebují cizí zdroj energie. Velkou výhodou naopak představuje možnost jejich výroby MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologií a s tím spojená integrace s ostatní elektronikou.

### 2.1.3 Elektromagnetická přeměna

Elektromagnetické generátory využívají zákona elektromagnetické indukce, který poprvé demonstroval Michael Faraday v roce 1831 a který matematicky popsal Franz Ernst Neumann v roce 1845. Tento zákon říká, že při změně magnetického indukčního toku se ve vodiči indukuje elektromotorické napětí o velikosti

$$\epsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\vec{B} \cdot \vec{S}). \quad (2.1)$$

Úpravou tohoto vztahu lze odvodit, že ve vodiči pohybujícím se v magnetickém poli o intenzitě  $\vec{B}$  relativní rychlostí  $\vec{v}$  (nezáleží tedy, zda se pohybuje vodič v magnetickém poli nebo naopak) působí na elektrony vodiče magnetická síla  $\vec{F}_{mag}$ , která má za následek vznik indukovaného elektrického pole o intenzitě  $\vec{E}_i$  dané vztahem

$$\vec{E}_i = \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2.2)$$

Napětí, které se v tomto vodiči indukuje, je pak dáno vztahem

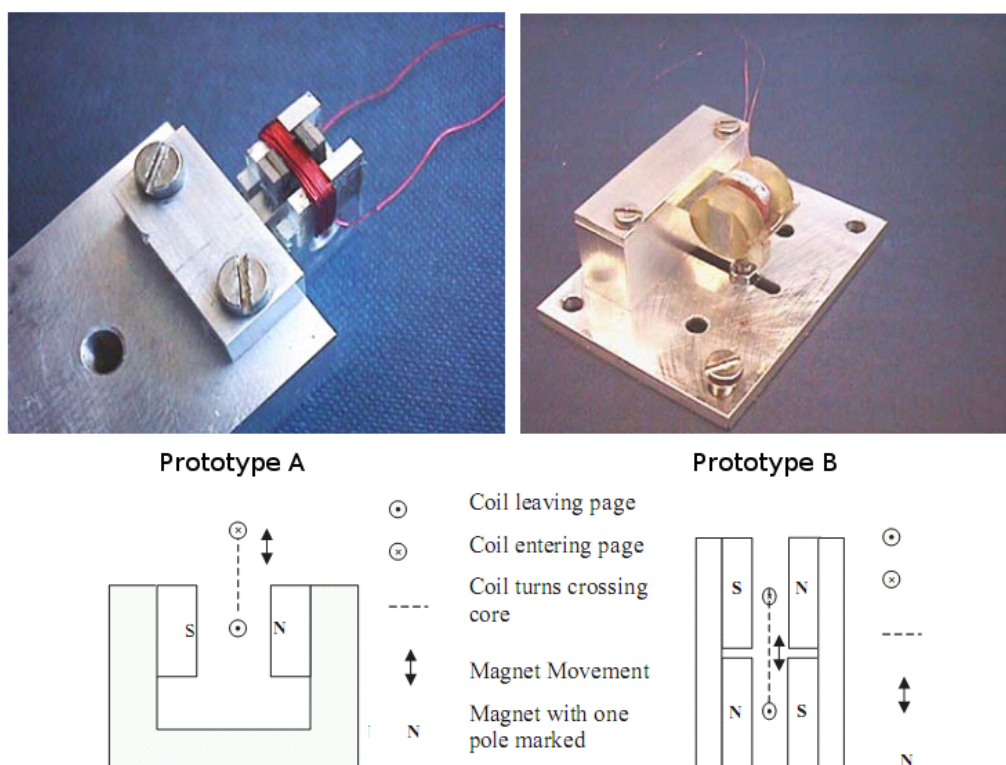
$$U_i = \vec{E}_i \cdot \vec{l} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}, \quad (2.3)$$

kde  $\vec{l}$  je délka vodiče procházející magnetickým polem [18]. Vztah 2.3 popisuje princip přeměny mechanické energie na energii elektrickou a je základem činnosti elektromagnetických generátorů.

## 2.2 Analýza současného stavu

### 2.2.1 Experimentální generátory

Vývojem elektromagnetických generátorů se zabývá velké množství vědeckých pracovníků po celém světě. Jedním z nejznámějších je University of Southampton, kde P. Glynne-Jone s kolektivem vytvořili dva funkční prototypy vibračních generátorů zobrazených na obrázku 2.4 [5].



Obrázek 2.4: Prototypy generátorů z University of Southampton (zdroj: [5])

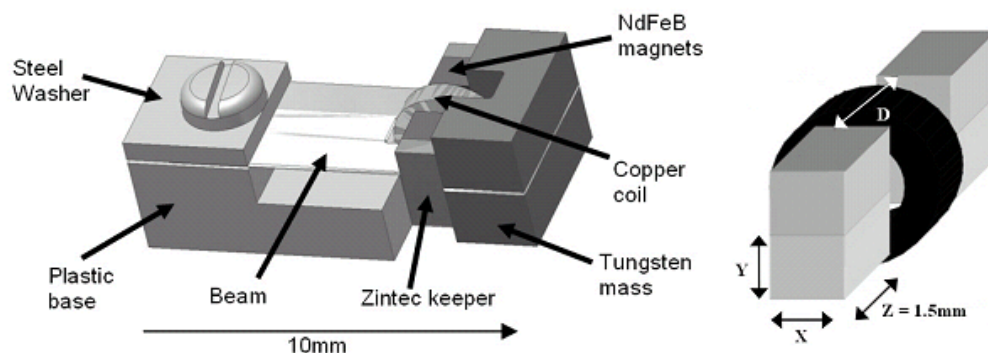
Prototyp A sestával z dvojice NdFeB magnetů upevněných na nástavci tvaru C, mezi kterými se pohybovala cívka. Při experimentu byl při optimální zátěži a amplitudě vibrací  $0,36\text{ mm}$  generován maximální výkon  $37\ \mu\text{W}$ . Testy dále ukázaly, že při amplitudě  $0,85\text{ mm}$  by byl dosažen výkon až  $180\ \mu\text{W}$ . Napětí indukované na cívce však bylo nízké (řádově desetiny voltu) a výroba obtížná, neboť cívka byla navinuta kolem nosníku s nástavcem s magnety. Proto byl sestrojen prototyp B, který řeší problém s konstrukcí i s nízkým napětím. Jeho magnetický obvod sestává ze čtveřice

pohybujících se magnetů. Ve vyrobeném prototypu byla cívka navinuta ručně, konstrukce generátoru však umožňuje i strojové vinutí cívky nebo využití cívky tištěné. Ta může být velmi tenká, tudíž lze vlivem menší vzduchové mezery dosáhnout větší magnetické indukce procházející cívkou. Při testech byl při stejných vibracích generován více než čtyřnásobný výkon při výstupním napětí kolem  $1\text{ V}$ . S prototypem B byly navíc provedeny praktické testy, při kterých byl generátor připevněn na blok motoru automobilu. Během tříminutové cesty bylo dosaženo průměrného výkonu  $157\ \mu\text{W}$  s maximální hodnotou  $3,9\ \text{mW}$ .

Generátor podobný popsané variantě A nasimuloval a vyrobil také M. El-hami ze stejné univerzity, který však namísto pohybující se cívky a statických magnetů využil opačnou konstrukci. Při stejné rezonanční frekvenci generoval s výrobkem o objemu  $240\ \text{mm}^3$  výkon  $530\ \mu\text{W}$ . [6]

Další tým z University of Southampton, zabývající se vývojem elektromagnetických generátorů, se ustavil kolem S. P. Beebyho. Generátor vychází z prototypu B, který byl popsán výše a je optimalizován pro umístění na vzduchovém kompresoru, který vibruje s relativně vysokými amplitudami a frekvencí  $(50 \div 60)\text{ Hz}$ . Vývoj generátoru byl financován v rámci evropského projektu VIBES (Vibration Energy Scavenging).

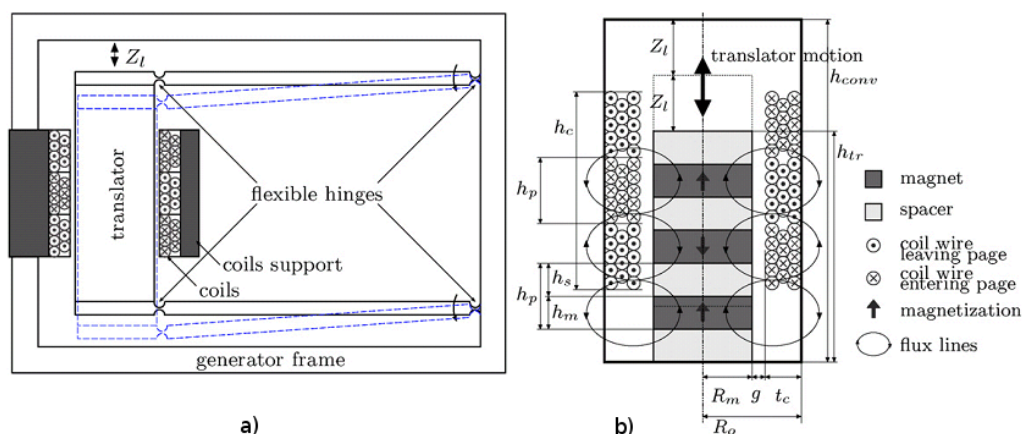
Konstrukci tvoří nosník, na kterém je připevněn nástavec s čtveřicí magnetů a přídatnou hmotou (viz obrázek 2.5). Nosník je k základně připevněn šroubem, který umožňuje nastavení rezonanční frekvence generátoru.



Obrázek 2.5: CAD model generátoru a soustavy magnetů z University of Southampton (zdroj: [7])

Oproti předloze se objem vlastního generátoru zmenšil z  $3,15\text{ cm}^3$  na  $0,15\text{ cm}^3$ . Materiály byly optimalizovány tak, aby byla seismická hmotnost co největší a zároveň objem generátoru co nejmenší. Proto byl za materiál přídavné hmoty zvolen wolfram vyznačující se vysokou hustotou, nástavec magnetů je vyroben z pozinkované měkké oceli. Tuhost generátoru je v této konstrukci dána materiálovými vlastnostmi a rozměry nosníku. V tomto případě byla zvolena beryliová ocel a optimální rozměry byly určeny na základě FEM analýzy. Při experimentech byl při frekvenci  $56,6\text{ Hz}$  a amplitudě vibrací  $60\text{ mg}$  generován výkon  $17,8\text{ }\mu\text{W}$ . Střední hodnota napětí však činí pouze  $52\text{ mV}$ , proto bude pro praktické použití nutné toto napětí zvýšit, například využitím cívky s více závitů nebo zmenšením vzduchové mezery.

V laboratořích Ústavu informačních technologií a elektrotechniky Švýcarského federálního institutu technologií (ETH) byl sestaven válcový mikrogenerátor s paralelogramovým závěsem (viz obrázek 2.6a)) [8] pro generování energie z lidského pohybu. Předpokládají se tedy vibrace s vysokými amplitudami a nízkou frekvencí.

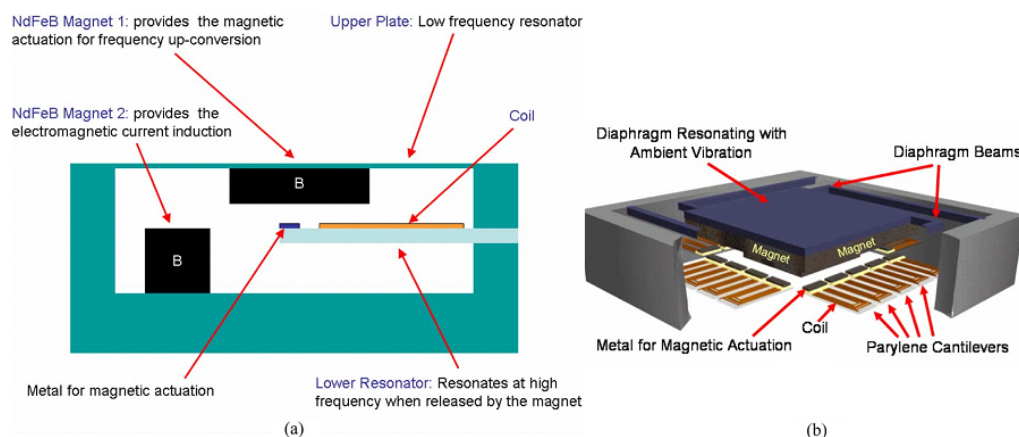


Obrázek 2.6: Schéma generátoru ze Swiss Federal Institute of Technology (zdroj: [8])

Samotný generátor má válcový tvar. Rotor je z permanentních magnetů oddělených vložkami s magneticky měkkého materiálu, který plní funkci koncentrátoru magnetického toku a zmenšuje odpudivé síly mezi opačně polarizovanými sousedními magnety. Na statoru z nemagnetického materiálu jsou navinuty cívky spojené do série, přičemž výška každé cívky odpovídá součtu výšky jednoho mag-

netu a vložky (viz obrázek 2.6b)). Pohyb magnetického obvodu ve vertikálním směru zajišťuje paralelogram, jehož hlavní nevýhodou je prostorová náročnost a vychylování v bočním směru. Výhodou naopak je absence komponentů způsobujících tření a oproti pružině také lepší vedení ve směru pohybu. Testovací výrobek měl objem rotoru a statoru  $0,5 \text{ cm}^3$ , celkový objem včetně paralelogramu pak  $30,4 \text{ cm}^3$ . Vyrobený prototyp byl testován na různých místech lidského těla. Při rezonanční frekvenci asi  $15 \text{ Hz}$  dodával na odporovou zátěž  $10^4 \Omega$  výkon asi  $35 \mu\text{W}$ .

Odborníci z University of Michigan navrhli mikrogenerátor zvyšující úroveň vibrační prostředí [9]. Navržený systém má dvě rezonanční struktury (viz obrázek 2.7). Horní rezonátor tvoří membrána s nízkou rezonanční frekvencí odpovídající cílové aplikaci:  $(1 \div 100) \text{ Hz}$ . Na horní rezonátor je uchycen NdFeB magnet, který slouží ke zvyšování frekvence. Spodní rezonátor pak tvoří soustava nosníků s vyšší vlastní frekvencí, které nesou závit cívky. Na konci každého nosníku pak je umístěn magneticky měkký materiál, který může být přitahován horním magnetem.



Obrázek 2.7: Schéma generátoru z University of Michigan (zdroj: [9])

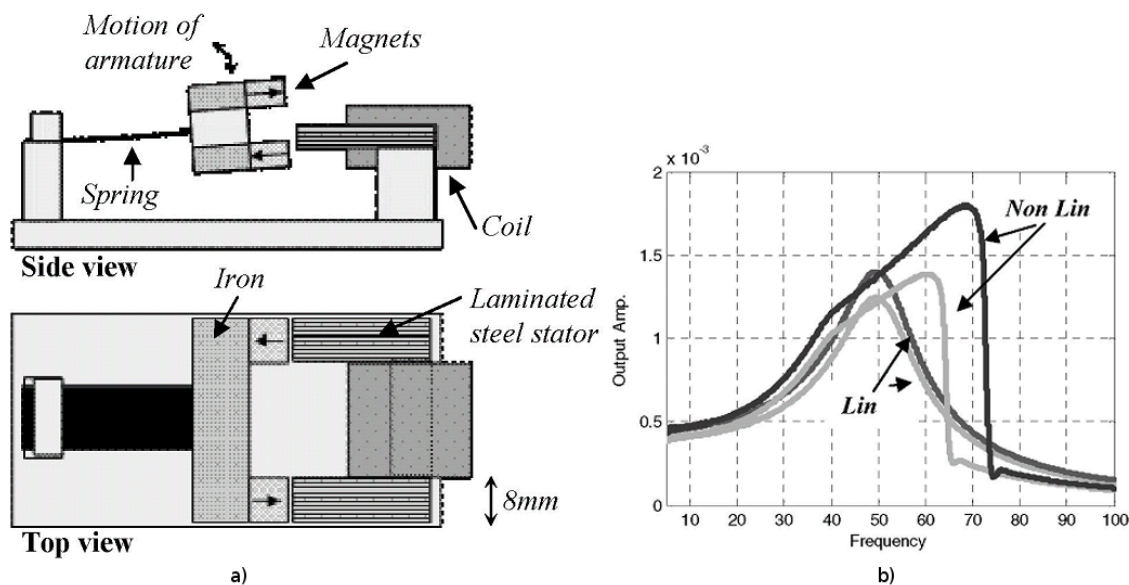
Princip zvyšování frekvence spočívá v tom, že vlivem vibrační prostředí se rozkmitá membrána a horní magnet se tak přiblíží ke spodnímu rezonátoru. V určité fázi pohybu magnet zachytí nosník, vytáhne ho směrem nahoru a jakmile již magnetická síla mezi magnetem a materiálem na konci nosníků nestačí na další prohnutí nosníku, spodní rezonátor se rozkmitá s frekvencí, která může být nastavena v rozmezí  $(1 \div 20) \text{ kHz}$ . Přestože je cívka v tomto případě menší, stejně jako výchylka nosníku, autoři uvádějí, že při nižších frekvencích je přeměna energie ve srovnání

s tradičními konstrukcemi podobné velikosti efektivnější. Konstrukce s membránou navíc umožňuje vytvořit v prostoru nosníků vakuum, což by snížilo mechanické ztráty a tím pádem zvýšilo generovaný výkon. Tato konstrukce je vhodná především pro výrobu technologií MEMS.

Při simulaci mikrogenerátoru (nosníky s rozměry  $400 \times 300 \times 10 \mu m$ , magnet  $2 \times 2 \times 1 mm$ ) došlo při vibracích prostředí o frekvenci  $10 Hz$  ke zvýšení frekvence na  $11,4 Hz$ . Maximální simulovaný výkon na jeden nosník činil  $2,5 \mu W$ , maximální napětí  $150 mV$ . Pro praktickou demonstraci činnosti byl vyroben vzorek s většími rozměry (nosník  $50 \times 15 \times 0,4 mm$ , magnet  $20 \times 20 \times 5 mm$ ) s cívkou se 3 závitů. Při experimentu došlo ke zvýšení frekvence z  $1 Hz$  na  $50 Hz$ , maximální okamžitý výkon byl  $120 nW$  při maximálním okamžitém napětí  $6 mV$ . Tyto hodnoty jsou velice nízké, avšak experiment a především simulace ukázaly, že tento princip může být velice perspektivní, především ve spojení s MEMS technologií.

Vývojem elektromagnetického generátoru se zabývali také Burrow s kolektivem na University of Bristol [11]. Jejich úkolem bylo vytvořit generátor s výkonem  $75 mW$  pracující na frekvencích ( $25 \div 50$ )  $Hz$  při relativně velkých amplitudách. Kmitající částí generátoru je pružný nosník s dvěma opačně polarizovanými členy tvaru "C", přičemž každý z nich je tvořen dvěma NdFeB magnety a železným nástavcem. Změnou vzdálenosti mezi těmito členy lze generátor přizpůsobit různým amplitudám vibrací. Stator se skládá z ocelových plechů ve tvaru "C" tvořících jádro, na kterém je navinuta cívka. Schéma generátoru je na obrázku 2.8a).

Tento generátor je zajímavý mimo jiné nelineární pružnostní charakteristikou nosníku, kterou vytvářejí nejen materiálové charakteristiky samotného nosníku, ale i magnetické síly působící mezi magnety rotoru a statorem. Tato nelinearita má vliv na amplitudovou charakteristiku generátoru. Tento vliv je znázorněn na obrázku 2.8b), na kterém je vykreslena amplitudová charakteristika při přechodu z nižších frekvencí na vyšší. Na tomto obrázku lze vidět, že v případě nelineární pružnostní charakteristiky generátoru je oproti své lineární variantě amplituda nosníku vybudena na vyšší hodnoty a navíc dochází k rozšíření rozsahu frekvencí, na kterých tento generátor vyrábí dostatečný výkon. Tmavě zbarvená křivka pak zobrazuje hodnoty pro případ, kdy byla amplituda vstupních vibrací zvýšena o 10%. Amplituda generátoru s lineární charakteristikou se v tomto případě zvětšila proporcionálně (tzn. také o 10%), amplituda generátoru s nelineární charakteristikou se však zvedla



Obrázek 2.8: Schéma generátoru z University of Bristol a jeho amplitudofrekvenční charakteristika (zdroj: [11])

o cca 30%. Nevýhodou tohoto generátoru však je skutečnost, že při přechodu od vyšších budících frekvencí k nižším má amplitudová charakteristika jiný tvar, než při přechodu od nižších frekvencí k vyšším. Navíc může v případě malých změn amplitud budících vibrací docházet k velkým změnám generovaného výkonu, což je nejlépe vidět na obrázku 2.8b) při frekvenci asi 70 Hz. V průběhu měření na vyrobeném prototypu byl při budící frekvenci 32 Hz a optimálním odporu zátěže generován výkon 100 mW s amplitudou napětí 2,5 V.

Vývojem elektromagnetického generátoru se zabýval i Xinpíng Cao se svým týmem na Hong Kong University of Science and Technology [10]. Jejich systém sestává z vlastního generátoru, usměrňovače a zvyšujícího měniče a zařízení pro akumulaci energie. Tento generátor funguje na principu translačního pohybu válcového magnetu uvnitř válcově navinuté cívky.

### 2.2.2 Komerční generátory

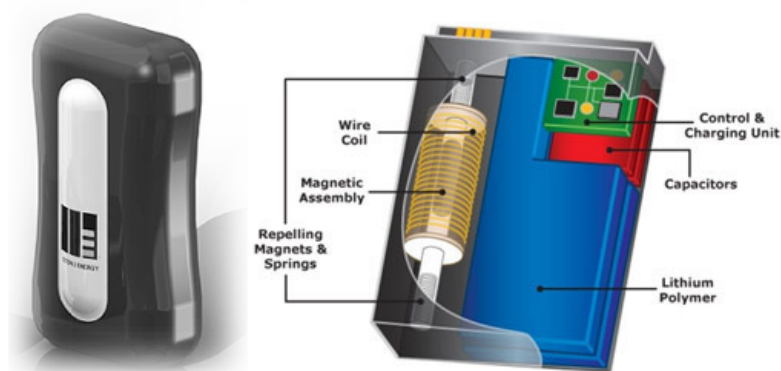
Jednou z nejznámějších společností zabývajících se výrobou a prodejem elektromagnetických generátorů je společnost Perpetuum Ltd.[12], za jejím vznikem stojí vědci

z University of Southampton. Jejich výrobky vychází z konstrukcí vyvinutých na University of Southampton, popsaných v předchozí kapitole. Společnost vyrábí několik typů generátorů lišících se podle úrovně vibrací, na kterých mají pracovat. Model PMG27-17 (viz obrázek 2.9) je například navržen pro vibrace s na frekvenci  $17,2 \text{ Hz}$  s amplitudou  $0,025 \text{ g}$ , při kterých generuje výkon  $2 \text{ mW}$ . K dispozici jsou i modely pro dopravní prostředky a elektrické stroje, které vibrují s frekvencí  $(100 \div 120) \text{ Hz}$ .



Obrázek 2.9: Generátor PMG27-17 společnosti Perpetuum Ltd. (zdroj: [12])

Další společností působící na poli vývoje generátorů energie patří M2E Power, Inc [13]. Mezi hlavní oblasti zájmu této společnosti patří generátory energie pro vojenské aplikace, přenosné nabíječky malých zařízení (viz obrázek 2.10), zařízení zvyšující účinnost elektromobilů a hybridních automobilů, ale i MEMS zařízení.



Obrázek 2.10: Přenosná nabíječka společnosti M2E Power (zdroj: [13])

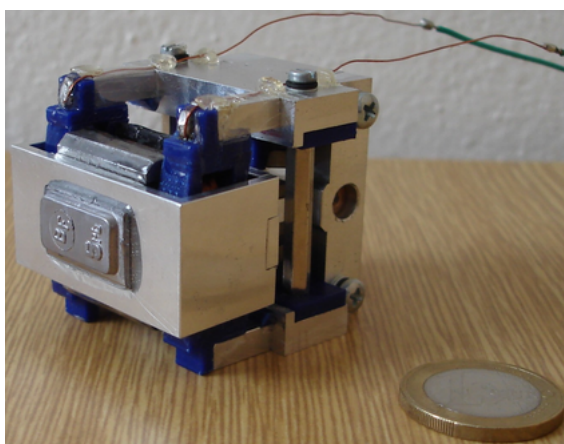
Společnost Ferro Solutions má ve své nabídce vibrační generátor s označením VEH-360 (viz obrázek 2.11), který dokáže při vibracích s frekvencí  $60\text{ Hz}$  a amplitudě  $0,1\text{ g}$  generovat výkon až  $10,8\text{ mW}$  [14]. V rozsahu  $\pm 1,5\text{ Hz}$  kolem rezonanční frekvence je zaručeno generování minimálně poloviny tohoto výkonu.



Obrázek 2.11: Generátor společnosti Ferro Solutions (zdroj: [14])

### 2.2.3 Elektromagnetický generátor z VUT Brno

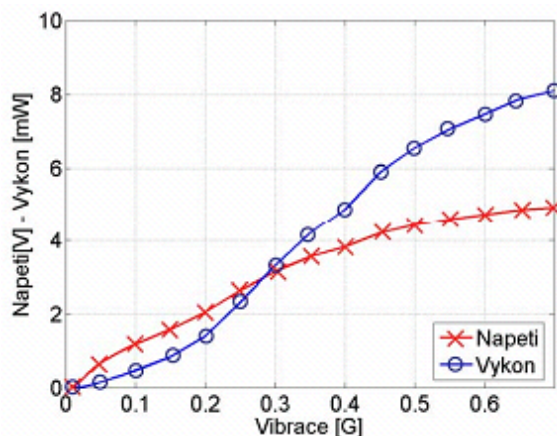
Tato práce se zabývá konstrukčními úpravami vibračního generátoru vyvíjeného na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, který je zobrazen na obrázku 2.12. Generátor je určen pro vibrace s frekvencí  $17,2\text{ Hz}$  s průměrnou intenzitou  $0,45\text{ g}$ .



Obrázek 2.12: Generátor z VUT Brno

Generátor sestává z páky nesoucí budicí obvod a cívky připevněné k rámu. Páka generátoru je vyfrézována z duralu a na svém konci nese dvojici nástavců s několika sériově vyráběnými magnety tvořícími magnetický obvod. Vzhledem ke kruhové trajektorii pohybu této soustavy jsou nástavce navrženy tak, aby vzduchová mezera byla co nejmenší a zároveň aby nedocházelo ke kontaktu magnetů budicího obvodu s cívkou. Na spodní a horní straně páky jsou přilepeny magnety, které spolu s opačně polarizovanými magnety na rámu generátoru vytvářejí tuhost mechanismu. Rotační pohyb páky zajišťuje osa z kalené oceli umístěná v kluzném teflonovém pouzdru vlisovaném do rámu. Tuhost rezonančního mechanismu lze pomocí distančních kroužků a rozpěrných sloupků mezi držáky magnetů měnit a generátor tak v rámci určitého intervalu ladit na určitou frekvenci vibrací. Vztah mezi natočením páky a silou působící proti pohybu páky není zcela lineární, což ovlivňuje amplitudovou frekvenční charakteristiku podobným způsobem, jak bylo popsáno v kapitole 2.2.1 a znázorněno na obrázku 2.8b). Duralový rám generátoru dále obsahuje mechanický doraz pro případ, že by páka při svém pohybu překonala sílu odpuzujících se magnetů, kdy by mohlo dojít k mechanickému kontaktu mezi magnety. Maximální výchylka páky zároveň nesmí překročit hodnotu odpovídající vzdálenosti mezi magnety budicího obvodu, při které by se na cívce indukovalo napětí opačné polarity. Cívka je navinuta na plastovou kostru připevněnou k rámu. Vzhledem k tvaru kostry a cívky, který kopíruje kruhovou trajektorii pohybu budicího obvodu, je navíjení cívky obtížné a proto bylo provedeno ručně.

Tento generátor byl navržen pro vibrace s frekvencí asi  $17\text{ Hz}$  a se zrychlením  $0,2\text{ g}$  až  $0,7\text{ g}$ . V zadání stálo, aby generovaný výkon dosáhl hodnoty asi  $5\text{ mW}$  při napětí  $2,5\text{ V}$ . Výsledky, kterých bylo dosaženo na vyrobeném prototypu, jsou zobrazeny na obrázku 2.13, na kterém je vykreslena závislost napětí a výkonu generátoru na zrychlení budících vibrací při odporové zátěži  $4,3\text{ k}\Omega$ . Ze závislosti lze vyčíst, že požadovaná hodnota výstupního napětí byla dosažena při zrychlení od  $0,25\text{ g}$  výše, požadovaný výkon  $5\text{ mW}$  pak při hodnotách od  $0,4\text{ g}$  výše.



Obrázek 2.13: Citlivost napětí a výkonu generátoru z VUT Brno na hodnotě budících vibrací (zdroj: [15])

## 2.3 Srovnání jednotlivých konstrukčních variant

Pro srovnání výkonu generátorů se často využívá výkonové hustoty  $P_V$ , která je dána poměrem generovaného výkonu  $P$  a objemu generátoru  $V$ . Zjištěné výsledky byly shrnuty do tabulky 2.1. Uvedené hodnoty nelze brát jako přímé srovnání, neboť výkon generátoru je závislý na frekvenci a amplitudě budících vibrací. Každý z uvedených generátorů však vycházel z odlišných předpokladů, co se budících vibrací týče, a tomu také odpovídají odlišné výsledky.

Popis	F [Hz]	A [g]	V [cm <sup>3</sup> ]	P [mW]	P <sub>V</sub> [mW/cm <sup>3</sup> ]
Glynne-Jones (prot. A)	332	0,28	0,84	0,18	0,214
Glynne-Jones (prot. B)	332	0,28	3,15	0,75	0,238
El-hami	332	25μm	0,24	0,53	2,2
Beeby	56,6	0,06	0,15	0,018	0,12
ETH	15	-	0,5	0,035	0,07
Michigan	1	-	0,01	0,004*	0,4
Bristol	32	-	50	180	3,6
VUT Brno	34	0.7	44,8	8	0,18
Perpetuum Ltd.	17.2	0,025	117**	2	0,017**
Ferro Solutions	60	0,1	165**	10,8**	0,065**

\* - údaj platí jen pro jeden nosník

\*\* - údaj platí pro celý výrobek včetně elektroniky a vnějšího obalu

Tabulka 2.1: Srovnání vibračních generátorů

## 2.4 Cíle řešení

Současná verze vibračního generátoru je funkční, pro průmyslové využití je však potřebné provést určité úpravy. Cílem této práce je navrhnout takové úpravy, které povedou k výrobě menšího a lehčího elektromagnetického generátoru, aniž by došlo k citelné ztrátě výkonu. Při návrhu je nutné pamatovat i na životnost generátoru, neboť dlouhodobá životnost a malá ztráta výkonu vlivem stárnutí by měly být hlavními přednostmi všech vibračních generátorů. Nesmíme zapomínat ani na snadnou vyrobiteľnost generátoru.

Požadavky na výsledný návrh jsou následující:

- požadovaný výkon: asi 5 mW,
- minimální napětí: asi 2,5 V,
- charakter pracovních vibrací: frekvence 17,2 Hz, amplituda zrychlení od 0,2 do 0,7 g,
- výchylka páky generátoru: ±10°,
- co nejmenší hmotnost a velikost.

Ačkoliv je frekvence budících vibrací zadána, navržený generátor by měl generovat energii s požadovaným výkonem a napětím při co nejširším spektru vibrací.

Abychom dosáhli těchto cílů, bude nutné provést úpravy konstrukce budicího obvodu, rezonančního mechanismu, cívky i rámu generátoru. Výsledkem bude návrh nového generátoru, proto je po dokončení návrhu zmíněných konstrukcí nutné provést výpočtovou simulaci celé soustavy.

---

## 3 Řešení

### 3.1 Volba konstrukčního řešení

Elektromagnetický generátor funguje na základě Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Ten říká, že změna magnetického indukčního toku vyvolá ve vodiči umístěném v magnetickém poli vznik napětí. Je proto jasné, že součástí elektromagnetického generátoru musí být magnetický obvod a cívka. K naladění generátoru na úroveň okolních vibrací pak slouží rezonanční mechanismus. Celá soustava je vázána k rámu, který je pevně spojen s podložkou a přenáší vibrace na rezonanční mechanismus.

Z principu elektromagnetické indukce vyplývá, že při volbě konstrukce lze v zásadě vycházet ze dvou možností: pohybujícího se budicího obvodu a pevně umístěné cívky nebo pohybující se cívky a pevně umístěného budicího obvodu. Důležitý je jen relativní pohyb mezi cívkou a magnetickým polem.

Varianta s pohybující se cívkou má dva základní nedostatky. Prvním je nutnost vyvedení vodičů z kmitající cívky do staticky umístěného elektronického obvodu, druhým pak skutečnost, že hodnota generovaného výkonu přímo závisí na hmotnosti kmitající hmoty. Samotná cívka je však lehká a proto by pro dosažení požadovaného výkonu bylo nutné zvýšit hmotnost kmitající části generátoru pomocí přídavné seismické hmoty, což by zvýšilo celkovou hmotnost i velikost generátoru. Oproti tomu při druhé uvedené variantě tvoří hmotnost páky generátoru především magnetický obvod a není proto nutné přistupovat k umělému zvyšování hmotnosti.

Z uvedených důvodů byla pro další uvažování zvolena varianta s cívkou připevněnou k rámu generátoru a pohybujícím se magnetickým obvodem.

Volby konstrukcí jednotlivých částí generátoru budou popsány v dalších kapitolách.

### 3.2 Konstrukce generátoru

### 3.2.1 Magnetický obvod

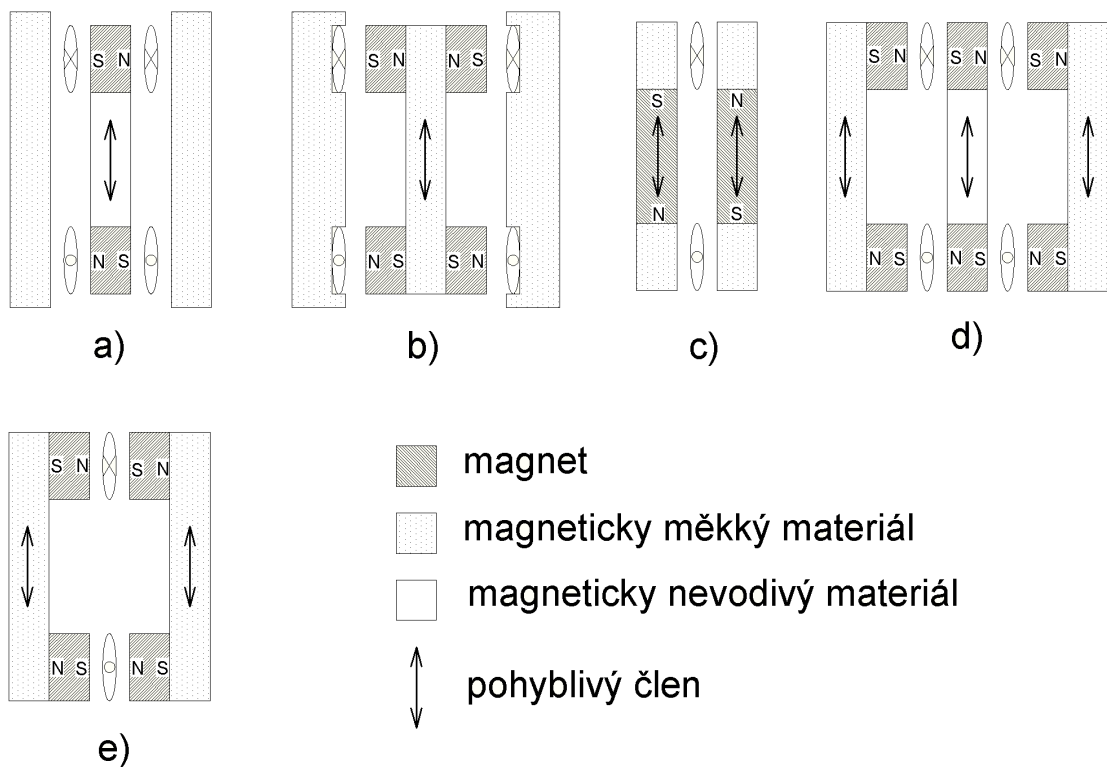
Úkolem magnetického obvodu je vytváření dostatečně vysoké hodnoty magnetické indukce procházející vzduchovou mezerou, ve které se nachází cívka.

Co se uspořádání magnetického obvodu a cívky týče, bylo uvažováno několik verzí, z nichž některé jsou ve formě průřezů zobrazeny na obrázku 3.1. Šipkou jsou vyznačeny pohyblivé části, elipsa naznačuje průřez cívky. Na obrázku 3.1a) je princip, kdy se magnetický tok vytvářený permanentními magnety uzavírá přes staticky umístěné bloky z magneticky měkkého materiálu tvořící stator. Podobný princip je vyobrazen i na obrázku 3.1b), cívka je však umístěna do drážek statorových bloků a díky soustavě magnetů a pólového nástavce se v soustavě vytvářejí dva magnetické toky. Největší nevýhodou obou zmíněných principů jsou reakční síly mezi magnety a statorovými bloky. Pro správnou funkci by konstrukce generátoru musela zajistit takové vedení rotoru, aby nedocházelo k jeho vychylování do stran. To by vyžadovalo použití dalších konstrukcí, které by do soustavy mohly zavést nechtěné odporové síly. Na obrázcích 3.1c), 3.1d) a 3.1e) jsou schématicky naznačeny varianty, kdy pohyblivou část generátoru tvoří soustava magnetů a pólových nástavců. Jako nejvhodnější byla zvolena varianta e), při které je hodnota magnetická indukce ve vzduchové mezeře vysoká, přičemž objem a s tím související hmotnost obvodu zůstávají přijatelné.

Z možných magnetů se jako nejvhodnější jeví magnety ze vzácných zemin, konkrétně ze směsi neodymu, železa a bóru (NdFeB), neboť tyto magnety mají nejsilnější magnetické účinky ze všech běžně dostupných materiálů. Jejich nevýhodou je zhoršování magnetických vlastností při vyšších teplotách (konkrétní hodnota závisí na použité směsi) a křehkost.

V rámci této práce byly zvoleny magnety o rozměrech 20x7x2,5 mm typu VMM 6 UH, jejichž magnetické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Pólové nástavce musí být vzhledem ke své funkci vyrobeny z magneticky měkkého materiálu. V tomto případě byla zvolena ocel M3, u které dochází k nasycení, kterému musíme vhodným průřezem nástavce zabránit, při hustotě magnetického toku asi 1,8 T. Vzhledem k použitému materiálu a poloze budicího obvodu na konci páky bude tato část tvořit převážnou část momentu setrvačnosti rezonančního mechanismu a proto je vhodné odlehčit nástavce zkosením hran. Musíme však dávat



Obrázek 3.1: Návrhy uspořádání magnetického obvodu a cívky

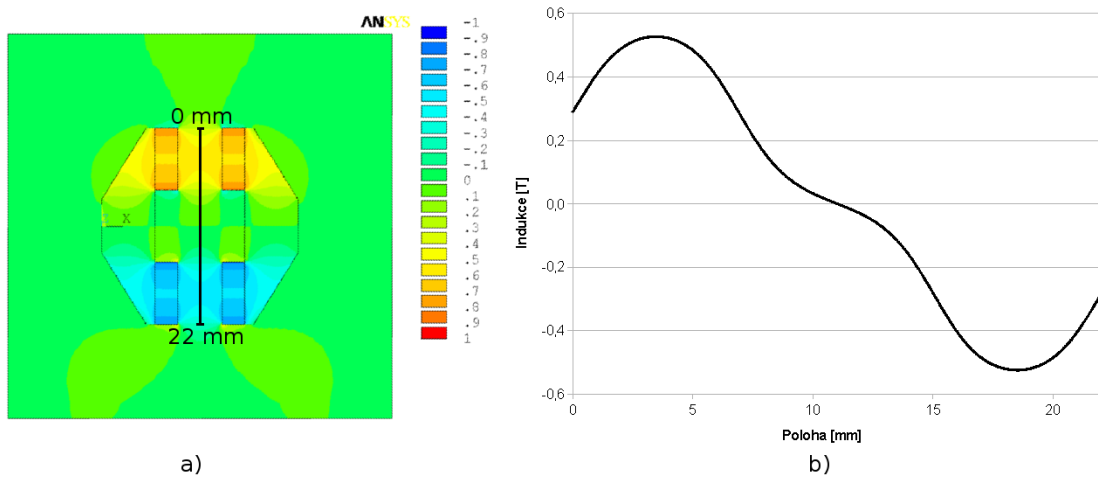
pozor, aby nedošlo k nasycení materiálu.

Pro zjištění rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře bylo vytvořeno makro napsané v jazyku APDL (ANSYS Parametric Design Language) pro program ANSYS. Model je řešen pomocí rovinných prvků PLANE53 a vzhledem k jeho jednoduché struktuře je výpočet relativně nenáročný. Výsledné rozložení magnetické indukce ve směru osy  $x$  je vyobrazeno na obrázku 3.2a). Na obrázku je znázorněna i cesta podél středu vzduchové mezery, po které byl vykreslen průběh magnetické indukce, jenž je zobrazen na obrázku 3.2b).

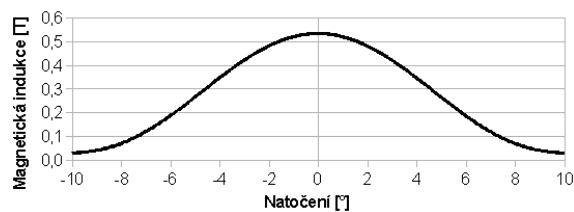
Pro účely simulace bylo nutné tuto charakteristiku přepočítat tak, abychom získali závislost magnetické indukce na natočení páky generátoru. Ukázalo se, že tuto charakteristiku, jež je zobrazena na obrázku 3.3, lze dostatečně přesně popsat následujícím polynomem šestého stupně:

Parametr	Hodnota
Povrchová úprava	Pasivace
Remanence [mT]	1200 ÷ 1280
Koercitivita [kA/m]	876 ÷ 915
Max. energetický součin [kJ/m <sup>3</sup> ]	286 ÷ 302
Teplotní odolnost [°C]	180

Tabulka 3.1: Parametry použitých magnetů budicího obvodu



Obrázek 3.2: Rozložení magnetické indukce ve směru osy x



Obrázek 3.3: Závislost magnetické indukce ve středu vzduchové mezery na natočení páky

$$B_x(\varphi) = -3,4709 \cdot 10^{-7} \cdot \varphi^6 + 5,4972 \cdot 10^{-21} \cdot \varphi^5 + 1,2173 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi^4 - 5,6682 \cdot 10^{-19} \cdot \varphi^3 - 0,0138 \cdot \varphi^2 + 1,2598 \cdot 10^{-17} \cdot \varphi + 0,5398 \quad (3.1)$$

Tento polynom bude využit při vytváření modelu systému, které bude popsáno v dalších kapitolách.

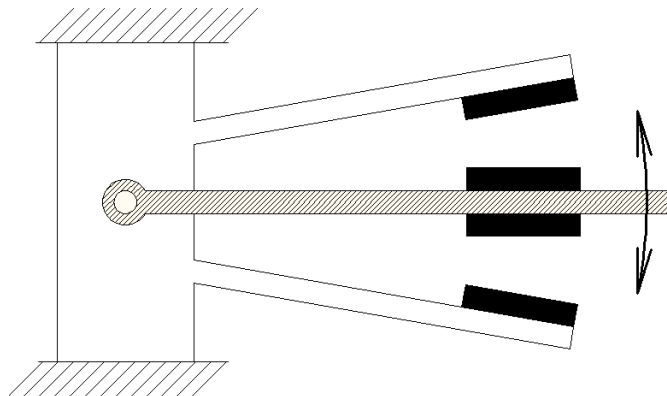
### 3.2.2 Tuhost mechanismu

Aby generátor pracoval efektivně, musí být naladěn na charakter okolních vibrací. To znamená, že vlastní frekvence mechanismu musí odpovídat frekvenci okolních vibrací. Vlastní úhlová frekvence soustavy je obecně dána vztahem

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (3.2)$$

kde  $K$  je zobecněná tuhost a  $M$  zobecněná hmotnost. Naším úkolem tedy je nalézt takovou konstrukci mechanismu, pomocí níž dosáhneme požadované tuhosti, která při určité hmotnosti rezonančního mechanismu generátoru bude odpovídat zadané frekvenci okolních vibrací.

Možných konstrukcí, pomocí kterých lze dosáhnout požadované tuhosti, je mnoho. Již v dřívějších verzích generátoru vytvořeného na VUT v Brně se osvědčila varianta s dvěma sadami odpuzujících se magnetů, která je schématicky zobrazena na obrázku 3.4. Na rámu je umístěna dvojice magnetů, která spolu s dvojicí magnetů na páce vytváří tuhost mechanismu.



Obrázek 3.4: Uspořádání magnetů vytvářejících tuhost mechanismu

Výhodou tohoto řešení je absence materiálového tlumení, které se objevuje například u řešení pomocí pružin či nosníků. To se projeví ve zvýšení kvality rezonančního mechanismu a tím pádem také ve zvýšení generovaného výkonu.

Stejně jako v případě budicího obvodu byly využity NdFeB magnety. Jejich nevýhodou je, kromě již zmíněného zhoršování magnetických vlastností při vyšších teplotách, také vysoká křehkost a proto je nutné vhodnou konstrukcí generátoru zajistit, aby nemohlo dojít ke vzájemnému kontaktu magnetů, který by mohl vést až k jejich poškození.

Vhodným uspořádáním magnetů můžeme dosáhnout několika výhodných vlastností soustavy. Z hlediska stabilního uložení páky v rámu generátoru je žádoucí, aby na páku působila normálová síla ve směru od uložení. O tomto problému bude více pojednáno v kapitole 3.2.4. Správným využitím magnetů dále můžeme dosáhnout nelineární (progresivní) tuhostní charakteristiky, která má vliv na spektrum frekvencí, na kterých generátor pracuje efektivně. V kapitole 2.2.1 byl popsán generátor z University of Bristol, který využívá podobné vlastnosti.

K výpočtu tuhostní charakteristiky jsme opět využili programu ANSYS a jazyka APDL, pomocí kterého byl vytvořen skript, jež v cyklu počítá síly působící mezi magnety v jednotlivých polohách páky. Každý cyklus sestává z následujících částí:

- definice parametrů
- vytvoření modelu (objemů)
- přiřazení materiálů a magnetických vlastností jednotlivým objemům
- nastavení velikosti sítě
- vytvoření sítě
- vytvoření okrajových podmínek
- výběr elementů, ke kterým se bude vztahovat výsledek
- nastavení řešiče
- řešení a uložení výsledků

Model soustavy byl realizován pomocí prvku SOLID97 sloužícího k modelování 3D magnetických polí. Tento prvek je založen na formulaci magnetického vektorového potenciálu, používá se pro analýzy nízkofrekvenčních magnetických polí a je tedy vhodný pro tuto magnetostatickou úlohu [16].

Vzhledem k použití 3D prvku může být počet elementů vzniklých po vytvoření sítě velmi vysoký (což by vedlo k obrovskému výpočetnímu času) a bylo tedy nutné

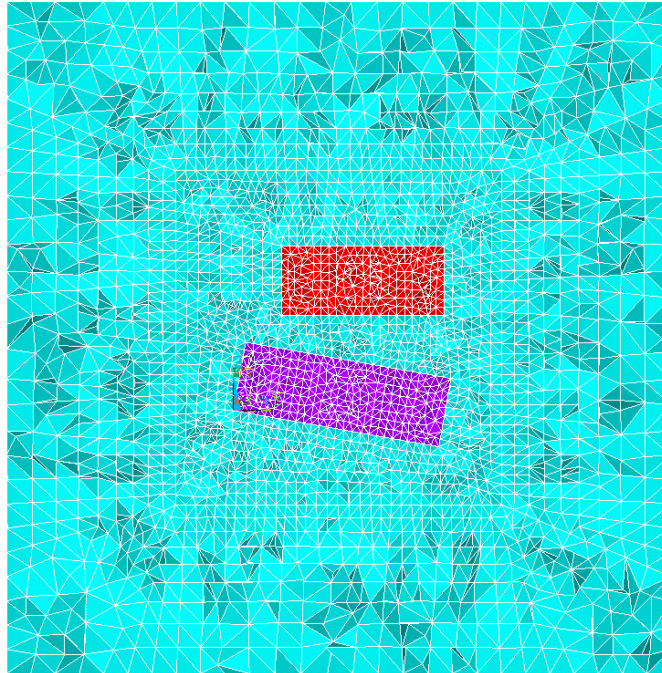
vytvořit co nejjednodušší síť, aniž by došlo ke zkreslení výsledků. Pro určení optimální velikosti elementu jsme mohli využít skutečnosti, že ANSYS pro výpočet silových účinků magnetů využívá dvou zcela odlišných metod (principu virtuálních prací a Maxwellova tenzoru napětí) a lze tedy předpokládat, že pokud se výsledky získané pomocí obou metod shodují, jsou správné. Maxwellův tenzor napětí slouží k výpočtu sil působících na tělesa pomocí povrchového integrálu a vychází z Maxwellových rovnic. Metoda virtuálních prací vychází z definice, podle které infinitezimální změna vnitřní energie napjatosti musí být rovna změně vnější práce vykonané zatížením. Síly jsou v tomto případě počítány pro vzduchové elementy přiléhající k tělesům, ke kterým se má výsledek vztahovat (v našem případě magnet na páce).

Vlastní model je velice jednoduchý a sestává ze dvou magnetů (modelovaných kvádrovými bloky) a vzduchu, který je obklopuje. Po vleklých pokusech o nalezení optimální velikosti elementů vznikl parametrický model, jehož síť je v řezu zobrazena na obrázku 3.5. Magnet uchycený k rámu je zobrazen fialovou barvou, magnet na páce barvou červenou, modrou barvou je znázorněn vzduch. U každé z těchto tří částí musíme definovat magnetické vlastnosti, v případě magnetů musíme navíc dbát na jejich správnou orientaci, neboť použité magnety nejsou izotropní (jsou polarizovány jen v jednom směru).

Výsledkem každého cyklu (odpovídajícího určitému natočení páky generátoru) je šest hodnot, konkrétně směrové složky síly získané výpočty na základě principu virtuálních prací (první trojice hodnot) a Maxwellova tenzoru napětí (druhá trojice hodnot). Tyto hodnoty jsou vztaženy ke kartézskému souřadnému systému modelu a vzhledem k rotační povaze pohybu páky bylo vhodné přepočítat je do normálové a tečné složky. Hodnota v ose kolmé k rovině pohybu se blíží nule (magnety jsou v tomto směru uloženy symetricky) a pro další využití je irelevantní. Pro hromadný import hodnot z výstupu programu ANSYS, jejich přepočet a vytvoření datového souboru vhodného pro import do jiných programů (OpenOffice Calc/MS Office, Matlab) byl vytvořen skript v jazyce PHP. Vzhledem k tomu, že model sestává jen ze dvou magnetů, kdežto celou soustavu tvoří magnety čtyři, je součástí tohoto skriptu i sečtení všech magnetických účinků působících v konkrétní poloze páky.

Cílem výpočtů bylo nalézt charakteristiku, která splní následující požadavky:

- Linearizovaná hodnota tuhosti musí být taková, aby byla v součinnosti s hmotností rezonančního mechanismu zachována vlastní frekvence této části ge-



Obrázek 3.5: Průřez sítí modelu magnetů vytvořené v programu ANSYS

nerátoru odpovídající frekvenci budících vibrací.

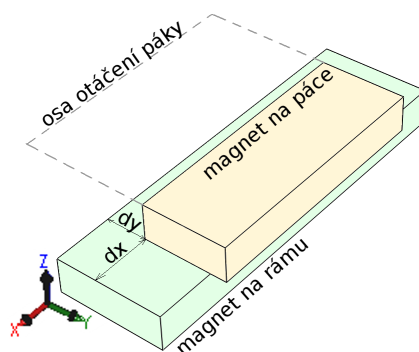
- Na páku by měla působit normálová síla takové velikosti, aby při parazitních vibracích ve směru od uchycení k budicímu obvodu nemohlo dojít k vypadnutí hrotů z důlků, ve kterých je páka uložena.
- Na páku by měla působit síla, která při parazitních bočních vibracích zamezí pohybu páky generátoru do stran, při kterém by mohlo dojít ke kontaktu mezi magnety budicího obvodu a cívkou.
- Je žádoucí, aby tuhostní charakteristika vykazovala progresivní charakter, při kterém dochází ke zvýšení rozsahu frekvencí, na nichž generátor pracuje dostatečně efektivně.
- Kvůli špatné opracovatelnosti magnetů je nutné použít sériově vyráběné magnety.

Těchto požadavků lze dosáhnout použitím magnetů vhodné velikosti a jejich vzájemnou polohou. Kontaktu magnetů lze snadno zabránit použitím mecha-

Parametr	Hodnota
Povrchová úprava	Pasivace
Remanence [mT]	1170÷1210
Koercitivita [kA/m]	876÷915
Max. energetický součin [kJ/m <sup>3</sup> ]	263÷286
Teplotní odolnost [°C]	180

Tabulka 3.2: Parametry použitých magnetů

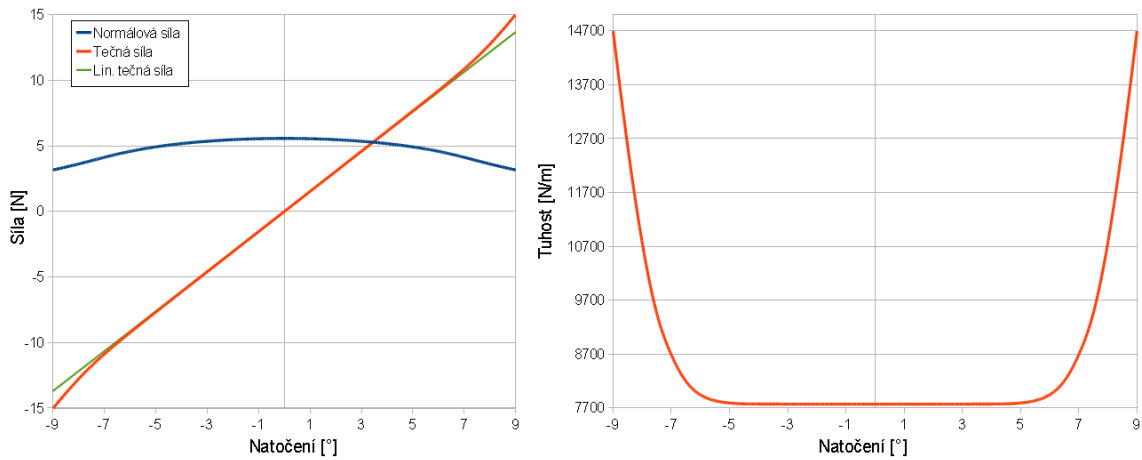
nického dorazu, jako dostačující se však jeví využít magnetických vlastností magnetů a umístit je tak, aby na sebe při teoretickém nárazu přesně dolehly svými plochami, jak je znázorněno na obrázku 3.6. Síla, která mezi oběma magnety v této konfiguraci při vzájemném přiblížení působí, je natolik velká, že za normálních provozních podmínek ke kontaktu nemůže dojít. Na zmíněném obrázku jsou znázorněny i rozměry  $dx$  a  $dy$ , které definují vzájemnou polohu magnetů při teoretickém dotyku.



Obrázek 3.6: Vzájemná poloha magnetů páky a rámu

Bylo provedeno velké množství výpočtů z různými konfiguracemi, na základě kterých byly zvoleny běžně vyráběné magnety typu VMM 5 UH o rozměrech 20 x 9 x 3 mm (magnet připevněný k rámu) a 20 x 7 x 3 mm (magnet na páce) s magnetováním ve směru nejmenšího rozměru. Magnetické vlastnosti těchto magnetů jsou shrnuty v tabulce 3.2.

Magnety jsou ve směru, který je na obrázku 3.6 označen jako  $dy$ , posunuty o 0,8 mm a nejsou tedy uloženy symetricky. Výsledná závislost působící síly na natočení je zobrazena na obrázku 3.7a).



Obrázek 3.7: a) Závislost síly mezi magnety na natočení b) Závislost tuhosti na natočení

Modrou barvou je zobrazena normálová složka síly, červenou pak její tečná složka. Linearizovaná hodnota tečné složky je vyznačena zelenou barvou a její směrnice, která udává tuhost mechanismu a slouží ke správnému naladění generátoru, má pro většinu rozsahu natočení hodnotu asi  $7720 \text{ N/m}$ . Jak je na obrázku vidět, při větších výchylkách má závislost tečné síly na natočení nelineární charakter. Tím je dána i nelineární závislost tuhosti na natočení, jejíž důsledky se projeví v pozdějších simulacích.

Pokud známe průběh tečné složky síly, není obtížné odvodit také závislost tuhosti na natočení páky, neboť hodnota tuhosti mechanismu je dána směrnicí tečny silové závislosti v příslušné poloze páky. Tato závislost je přehledně zobrazena na obrázku 3.7b) a lze ji popsat následujícím polynomem:

$$k(\varphi) = 0,03071 \cdot \varphi^6 - 1,72868 \cdot \varphi^4 + 24,12689 \cdot \varphi^2 + 7738, \quad (3.3)$$

kde  $\varphi$  je natočení páky generátoru ve stupních.

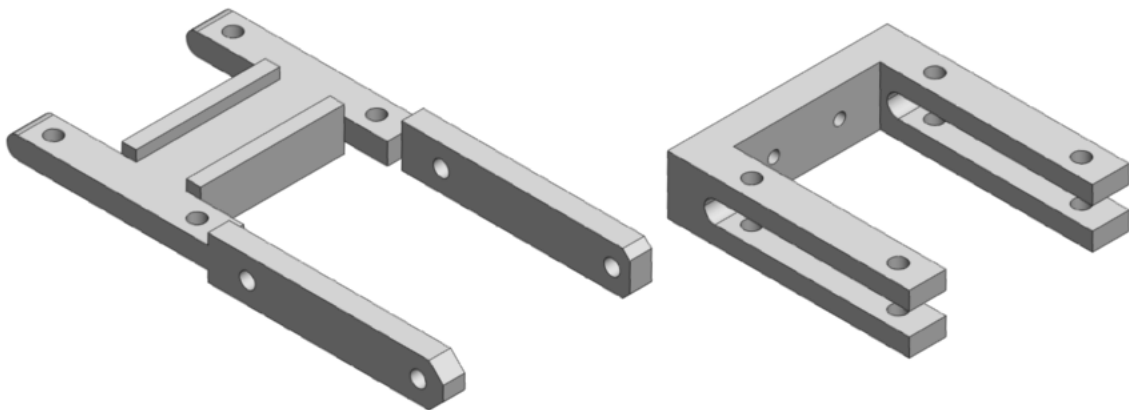
Vzhledem k použití magnetů o stejné délce (20 mm) je jasné, že požadavek síly vracející páku do stabilní polohy při působení bočních vibrací nebyl splněn. Výsledkem výpočtů, při kterých byl na rámu použit delší magnet, totiž byla lineární či dokonce regresivní závislost síly na natočení, což není žádoucí. Páku však ve správné poloze udržuje normálová síla, která má v závislosti na natočení páky hod-

notu  $3 \div 6 N$ , což odpovídá zrychlení asi  $4 \div 8 g$ . Díky uložení v důlcích, které bude popsáno v kapitole 3.2.4, by proto hroty měly setrvat ve správné poloze i při malých bočních vibracích.

### 3.2.3 Páka generátoru

Vlastní tělo páky slouží jako základna pro budicí obvod a magnety vytvářející tuhost mechanismu a spolu s těmito elementy tvoří rezonanční obvod. Rotační pohyb páky je realizován pomocí hrotů v důlcích - tato soustava bude popsána v kapitole 3.2.4. Celý rezonanční obvod musí být naladěn na frekvenci budících vibrací a je proto nutné dbát na správný poměr tuhosti a momentu setrvačnosti páky.

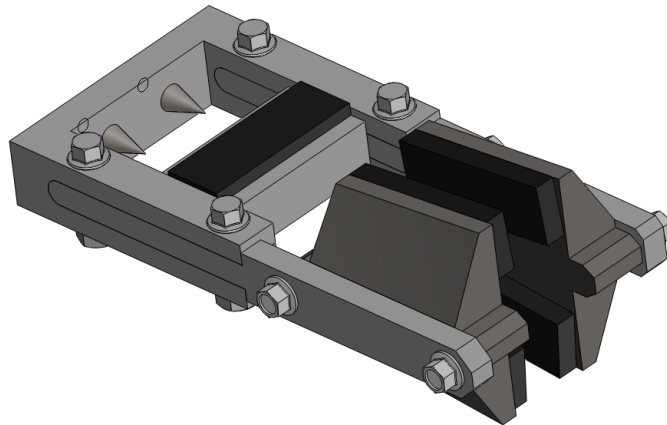
Tělo páky je složeno ze dvou částí, které do sebe přesně zapadají. Jsou spojeny čtyřmi šrouby M2x0,4 délky 10 mm a matkami. Obě části jsou vyfrézovány z duralu. Část, jejíž CAD model je zobrazen na obrázku 3.8 vlevo, obsahuje dva závity pro našroubování ocelových hrotů, na kterých bude páka uložena. Druhá část (na obrázku vpravo) má na spodní a horní straně drážky pro magnety vytvářející tuhost, které budou k tělu páky přilepeny sekundovým lepidlem. Ramena na konci páky v sobě mají vyvrtány otvory pro šrouby M2 délky 8 mm, kterými bude k páce připevněn budicí obvod.



Obrázek 3.8: CAD model částí tvořících tělo páky

Celkový pohled na páku osazenou ocelovými hroty, magnety a budicím obvodem je vyobrazen na obrázku 3.9.

Fyzikální vlastnosti této páky jsou shrnuty v tabulce 3.3.



Obrázek 3.9: CAD model osazené páky generátoru

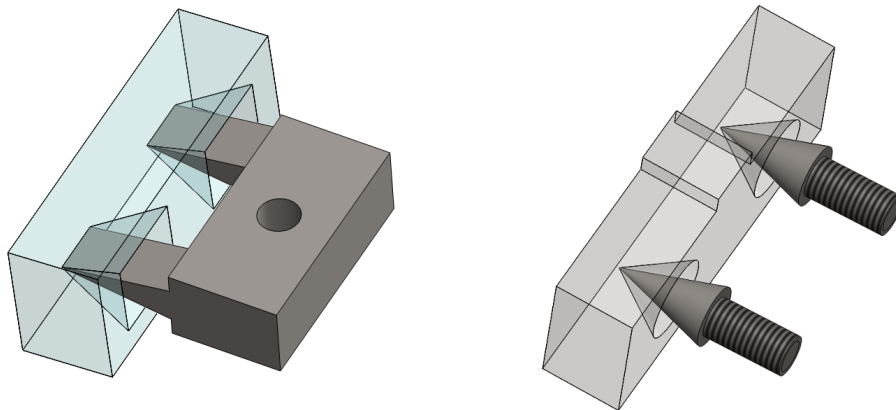
Parametr	Hodnota
Hmotnost [g]	71,12
Poloměr setrvačnosti [mm]	37,2
Moment setrvačnosti [g/mm <sup>2</sup> ]	98 419
Délka [mm]	65,8
Šířka [mm]	34,4
Výška [mm]	24

Tabulka 3.3: Fyzikální parametry páky

### 3.2.4 Uložení páky v rámu generátoru

V původní verzi generátoru bylo uložení páky řešeno pomocí osy z kalené oceli, která se otáčela v teflonových kluzných pouzdrech vlisovaných do rámu. Toto řešení je jednoduché, pro dosažení co nejvyššího generovaného výkonu však je vhodné snížit tlumení na co nejnižší hodnoty a proto bylo použito řešení, které je součástí jednoho z patentů podaných Vysokým učením technickým v Brně [23]. Tím je uložení páky na ocelových břitech nebo hrotech, jak je znázorněno na obrázku 3.10. Dá se předpokládat, že menším tlumením se bude vyznačovat uložení pomocí hrotů a proto bylo použito právě toto řešení.

Samotný rám je vyfrézován z duralu a protože by v případě cyklického namáhání kontaktu typu dural-ocel docházelo ke značnému opotřebování duralové součásti, bylo nutné do rámu vlepít (případně nalisovat) ocelovou vložku s důlky.



Obrázek 3.10: Způsoby uložení páky v rámu generátoru

Samotné hroty nesou závit M2, pomocí kterého se dají snadno zašroubovat do těla páky.

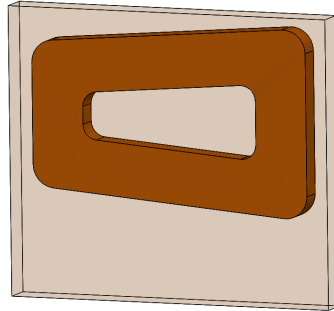
Vzhledem ke konstrukci páky nemůže dojít k úplnému vypadnutí hrotů z důlků, při působení parazitních vibrací ve směru osy hrotů by však hroty mohly ztrácet kontakt s povrchem důlků a následné nárazy by vedly k rychlejšímu opotřebení vrcholů hrotů. Proto je nutné, aby na páku působila normálová síla, která zajistí stálý kontakt hrotů s důlků. Této síly lze dosáhnout vhodným posunutím magnetů vytvářejících tuhost mechanismu, jak je naznačeno na obrázku 3.6 souřadnicí  $dy$ . Jak již bylo napsáno v kapitole týkající se tuhosti mechanismu, normálová síla působící na uložení páky v rámu činí  $3 \div 6 \text{ N}$ , což odpovídá zrychlení v normálovém směru o hodnotě asi  $4 \div 8 \text{ g}$ . Při vybuzení rotačního pohybu páky se k této normálové síle navíc přidává i síla odstředivá, jejíž velikost se mění v závislosti na aktuální rychlosti otáčení páky.

### 3.2.5 Cívka

Z principu elektromagnetické indukce, jenž lze popsat například pomocí vzorce 2.3, vyplývá, že maximální napětí se indukuje na částech závitů cívky, které jsou vedeny kolmo k vektorům magnetické indukce a rychlosti.

Vzhledem k rotačnímu pohybu páky s budícím obvodem je vhodná cívka lichoběžníkového tvaru, která je znázorněna na obrázku 3.11. Během rotace páky

tak v magnetickém poli permanentních magnetů budicího obvodu setrvává větší část cívky po delší část trajektorie, než by tomu bylo u cívky a budicího obvodu obdélníkového tvaru. Ze stejného důvodu má stejný tvar i budicí obvod.



Obrázek 3.11: CAD model cívky zalité v pryskyřici

Možností výroby cívek existuje několik. Pro generátory malých velikostí jsou vhodné cívky tištěné, jejichž největší výhodou je velmi malý průřez vodiče a dobrá tvarovatelnost. Vyznačují se však větším měrným elektrickým odporem, což by u rozměrnějších vibračních generátorů, mezi které patří i generátor v této práci, mohlo představovat určitý problém.

Pro generátor uvažovaných rozměrů se jako vhodnější jeví metoda strojového navinutí cívky, která je vzhledem k tvaru cívky proveditelná. Výroba v tomto případě probíhá formou postupného navíjení na kostru s bočními stěnami s následným odstraněním kostry.

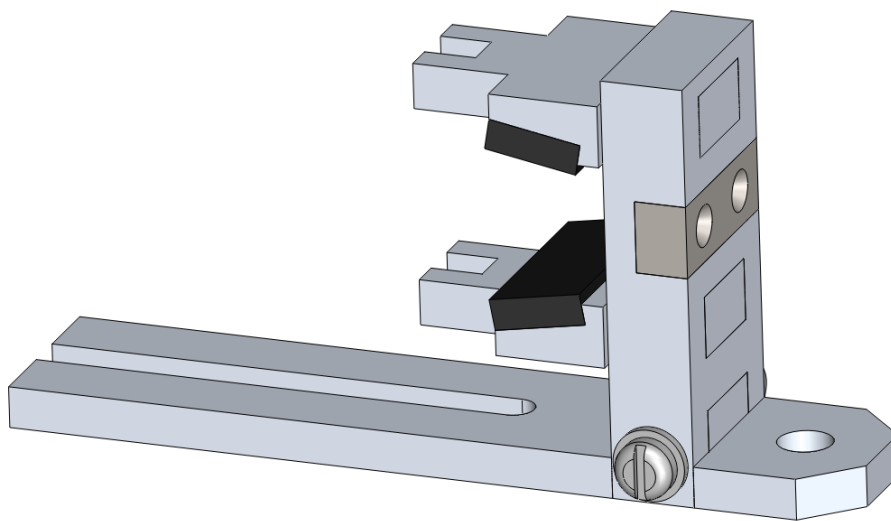
Vzhledem k nutnosti pevného uchycení cívky k rámu generátoru bude navinutá cívka zalita do pryskyřice, čímž vznikne kompaktní, nerozebíratelný kvádrový blok. Ten bude vložen do drážek, které k tomuto účelu vznikly v prodloužených držácích magnetů vytvářejících tuhost a do drážky v základně rámu. V obou případech bude použito i lepidlo. Při reálném využití, kdy je nutné generátor chránit proti vlivům vnějšího prostředí, navíc bude blok s cívkou připevněn ke krytům generátoru, čímž bude jeho poloha přesně vymezena.

O parametrech cívky bude pojednáno v kapitole 3.4.1.

### 3.2.6 Rám generátoru

Rám generátoru, jehož CAD model je k vidění na obrázku 3.12, je tvořen těmito částmi:

- základna,
- stojan s důlky,
- držáky magnetů a cívky.



Obrázek 3.12: CAD model rámu generátoru

Základna slouží k pevnému uchycení generátoru ke konkrétní vibrující soustavě, k čemuž slouží díra pro šroub velikosti M5. Dále obsahuje drážku, do které bude vlepen pryskyřicový blok s cívkou a díru pro spojení se stojanem šroubem M3.

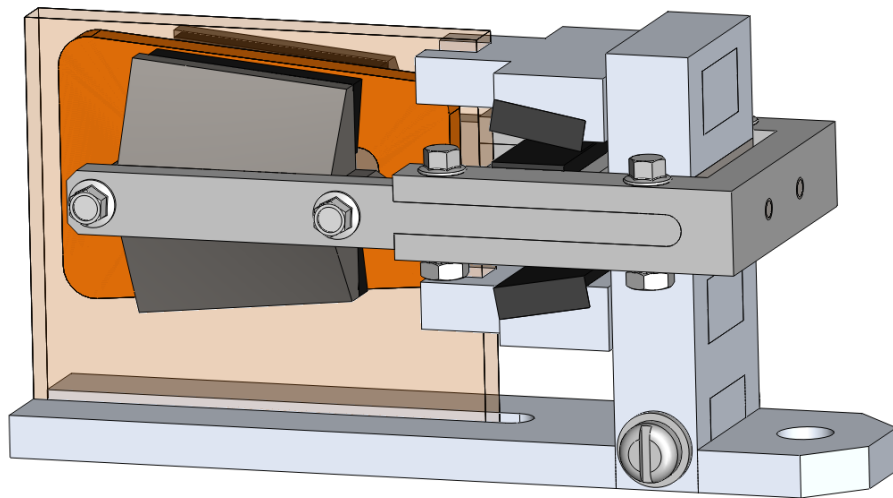
Stojan má ve svém těle otvory pro vlepění držáků magnetů a drážku pro vlepění ocelového bloku s důlky pro uložení hrotů.

Držáky magnetů slouží k přesné fixaci magnetů vytvářejících tuhost a pro uchycení cívky.

Všechny uvedené části rámu (kromě důlků pro uložení páky) jsou vyfrézovány z duralu, aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti.

### 3.2.7 Generátor jako celek

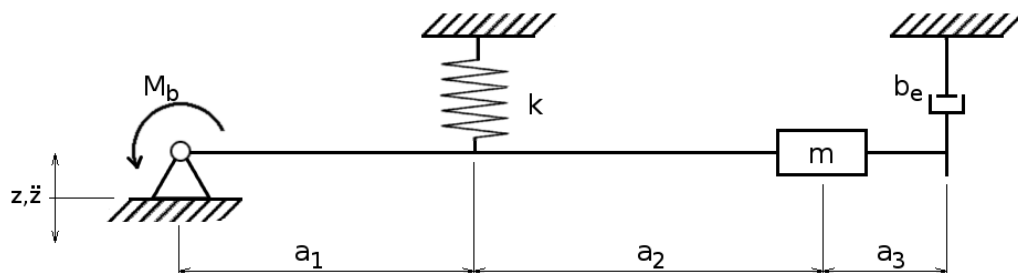
Celkový pohled na CAD model generátoru je zobrazen na obrázku 3.13. Jeho rozměry činí  $30 \times 40 \times 82 \text{ mm}$ , hmotnost  $125 \text{ g}$ .



Obrázek 3.13: CAD model generátoru

## 3.3 Model generátoru

Schéma soustavy, z níž se při sestavování modelu vycházelo, je zobrazeno na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Model generátoru

Jako vztažný bod byla zvolena rotační vazba. Páka osazená budícím obvodem je modelována hmotným bodem o hmotnosti  $m$  s poloměrem setrvačnosti  $a_1 + a_2$ .

Tuhost rezonančního mechanismu  $k$  tvoří síla mezi odpuzujícími se magnety na páce a rámu generátoru. V pouzdře, ve kterém se otáčí osa páky, působí třecí moment  $M_b$  ve směru proti pohybu páky.

Vibrace  $z$  v mechanismu vybudí relativní pohyb  $\varphi$ , díky kterému se v cívce indukuje elektromotorické napětí  $\epsilon_i$ . Elektromagnetický převod energie má za následek vznik elektromagnetického tlumení  $b_e$ , které spolu s třecím momentem  $M_b$  působí proti pohybu páky generátoru.

Pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu lze pro tento systém odvodit pohybovou rovnici

$$m(a_1 + a_2)^2 \cdot \ddot{\varphi} + b_e a_3^2 \cdot \dot{\varphi} + k a_1^2 \cdot \varphi + M_b = m(a_1 + a_2) \cdot \ddot{z} \quad (3.4)$$

Matematický popis tlumení v uložení páky je velice obtížný a proto byl v rámci tohoto modelu použit jednoduchý model viskózního tření, který je popsán následující rovnicí:

$$M_b = b \cdot \dot{\varphi} \quad (3.5)$$

Koeficient  $b$  byl pro účely simulace vypočten na základě odhadu faktoru kvality tohoto uložení. Přesnější model tlumení by mohl být získán po uskutečnění experimentu s prototypem generátoru, výroba takového prototypu však není součástí této práce.

Matematický popis elektromagnetického tlumení  $b_e$  je oproti tomu snazší, neboť vychází z rovnosti generovaného elektrického výkonu a disipativního mechanického výkonu. Pro celkový generovaný výkon platí vztah

$$P = \frac{U_i^2}{\sqrt{R_z^2 + R_c^2 + jX_L}}, \quad (3.6)$$

kde  $R_c$  je odpor cívky a  $R_z$  představuje odporovou zátěž. Induktivní reaktanci  $X_L$  můžeme zanedbat, neboť indukčnost cívky bez jádra je velmi malá. Pokud uvažujeme cívku o  $N_c$  závitů s aktivní délkou závitu  $l_c$ , můžeme vztah pro indukované napětí 2.3 zjednodušit do této podoby:

$$U_i = v \cdot B_x \cdot l_c \cdot N_c \quad (3.7)$$

a pro celkový generovaný výkon pak lze psát

$$P = \frac{((a_1 + a_2 + a_3) \cdot \dot{\varphi} \cdot B_x \cdot l_c \cdot N_c)^2}{R_z + R_c} \quad (3.8)$$

Jakmile ke generátoru připojíme zátěž, proud indukovaný v cívce vyvolá brzdicí moment, který působí proti příčině vzniku tohoto proudu a zpětně tak ovlivňuje dynamické chování soustavy. Disipativní mechanický výkon, který je z generátoru odebírán touto elektromagnetickou tlumicí silou, je dán vztahem

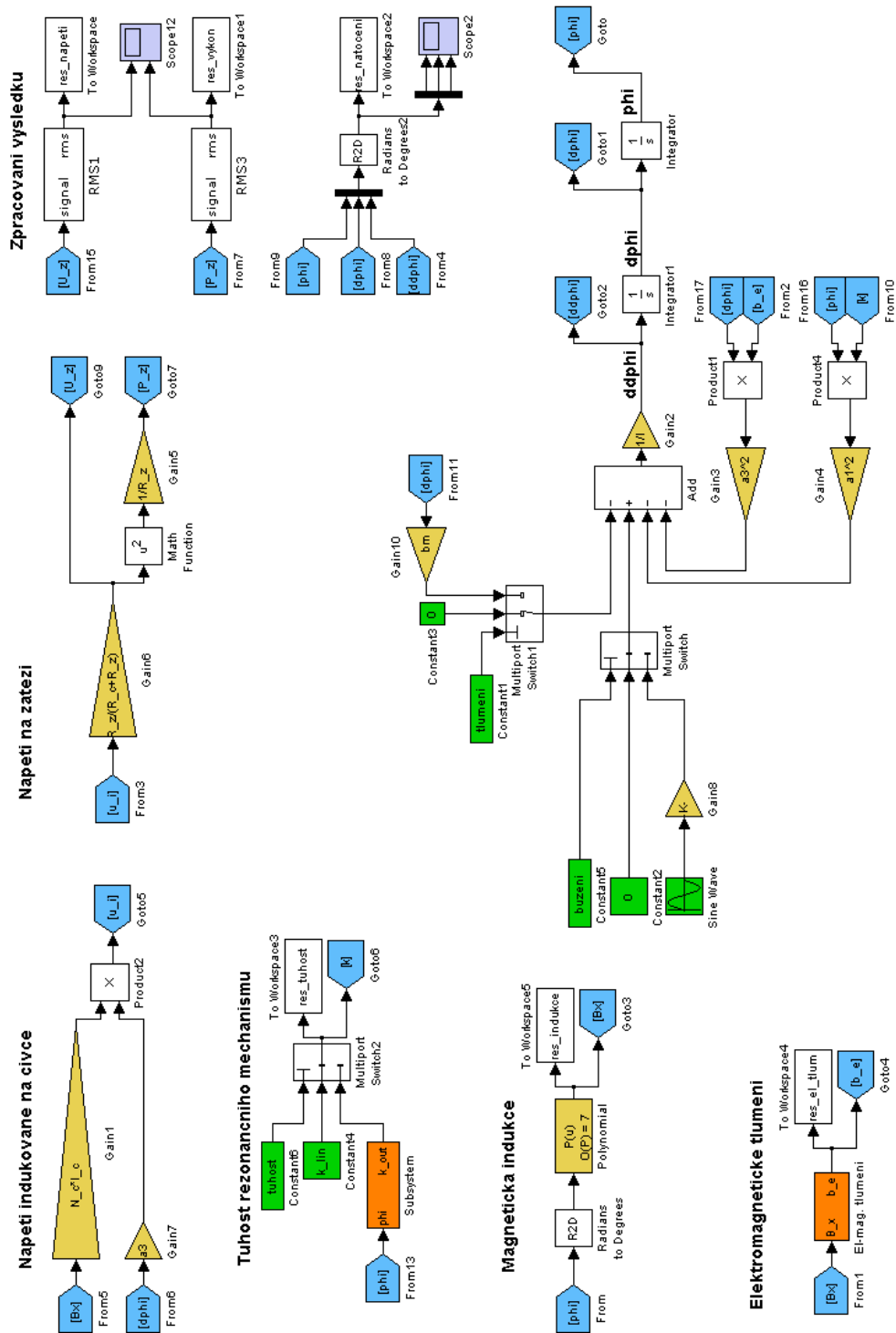
$$P = b_e \cdot ((a_1 + a_2 + a_3) \cdot \dot{\varphi})^2 \quad (3.9)$$

Porovnáním rovnic 3.8 a 3.9 můžeme pro elektromagnetické tlumení  $b_e$  odvodit vztah

$$b_e = \frac{(B_x \cdot l_c \cdot N_c)^2}{R_z + R_c} \quad (3.10)$$

Nelineární tuhost rezonančního mechanismu, která byla podrobně popsána v předcházejících kapitolách, můžeme aproximovat polynomem 3.3 odvozeným na základě výpočtů v programu ANSYS. Podobně můžeme aproximovat i nelineární závislost magnetické indukce ve vzduchové mezeře  $B_x$ , a to pomocí polynomu 3.1.

Na základě všech výše uvedených rovnic mohl vzniknout model vytvořený v programu Matlab-Simulink, jehož struktura je zobrazena na obrázku 3.15.



Obrázek 3.15: Model generátoru v programu Matlab Simulink

## 3.4 Návrh optimálních parametrů generátoru

### 3.4.1 Parametry cívky

Ze vzorce 2.3 vyplývá, že napětí indukované na cívce je úměrné počtu závitů cívky. Tato závislost však není lineární, neboť elektromagnetické tlumení, které během procesu indukce vzniká, má za následek snížení amplitudy vybuzeného pohybu páky a tím zpětně ovlivňuje hodnotu indukovaného napětí. Celá soustava je komplexní a její jednotlivé složky jsou vzájemně propojené. Při návrhu optimálních parametrů proto musíme brát v úvahu především velikost odporové zátěže, která bude ke generátoru připojena, neboť pro každou hodnotu zátěže jsou optimální parametry cívky jiné. Obdobně platí, že pro každou cívku lze nalézt optimální hodnotu odporové zátěže, pro kterou je generovaný výkon maximální.

Odpor cívky je dán vztahem

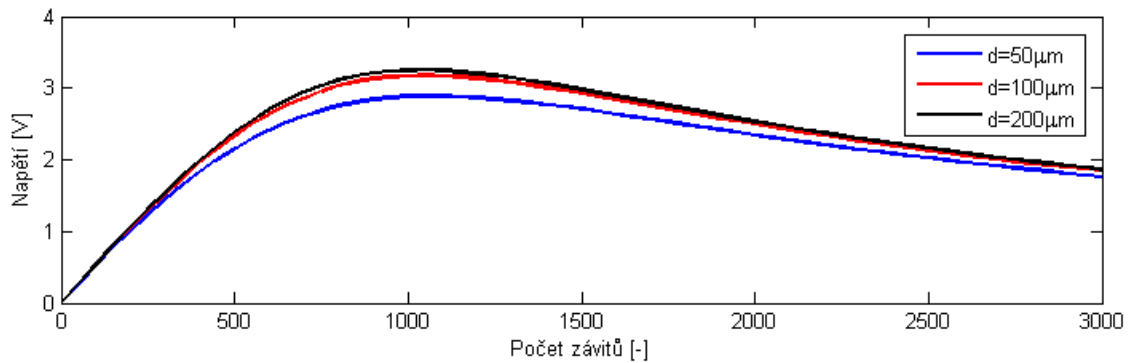
$$R_c = N \cdot \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (3.11)$$

kde  $N$  je počet závitů cívky,  $\rho$  je měrný elektrický odpor (pro měď má hodnotu  $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  při teplotě  $20^\circ C$  [22]),  $l$  je délka jednoho závitu cívky a  $S$  je průřez cívky. Z uvedeného vztahu plyne, že parametry cívky, kterým můžeme ovlivňovat vlastnosti generátoru, jsou průřez drátu  $d$  a počet závitů cívky  $N$ .

Jak již bylo napsáno, jedním ze způsobů návrhu parametrů cívky je její optimalizace pro konkrétní aplikaci, tedy konkrétní hodnotu připojené odporové zátěže.

Nejdříve byly provedeny simulace, jejichž cílem bylo určit vhodný průměr drátu cívky. Pro tyto účely činila hodnota zátěžného odporu  $3 k\Omega$ , který přibližně odpovídá senzoru ve stand-by režimu. Z výsledného grafu uvedeného na obrázku 3.16 vyplývá, že se zvyšujícím se průměrem drátu  $d$  se hodnota generovaného výkonu i napětí zvyšuje, ovšem závislost není ani zdaleka lineární.

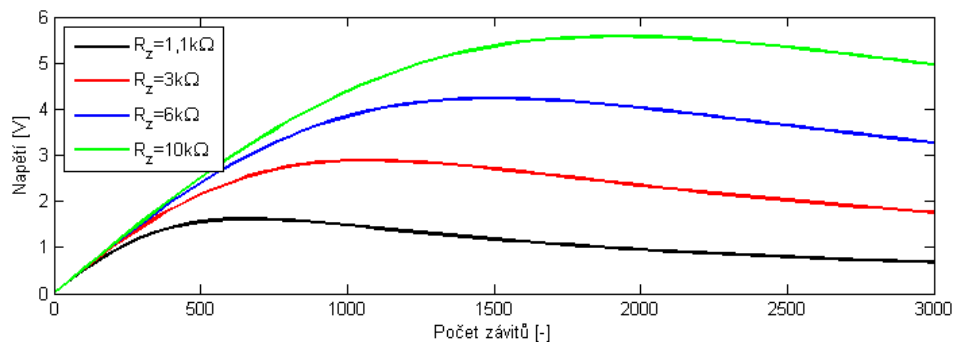
Vzhledem k tomu, že celkový průřez cívky roste s kvadrátem průměru drátu, je zřejmé, že z uvedených běžně dostupných průměrů drátů se jako nejefektivnější jeví průměr  $50 \mu m$ . Podle vztahů uvedených v [24] by celkový průřez cívky s 1000 závitů při koeficientu plnění 0,7 (přibližná hodnota pro strojové navíjení) činil asi  $3 mm^2$ , což vzhledem ke konstrukci generátoru nepředstavuje žádný problém. Použit bychom mohli i drát o průměru  $100 \mu m$ , v tomto případě by průřez cívky činil asi  $11 mm^2$ . Při vyšším počtu závitů, případně i nutnosti ručního navíjení cívky (koeficient plnění



Obrázek 3.16: Závislost generovaného napětí na počtu závitů a průměru drátu cívky

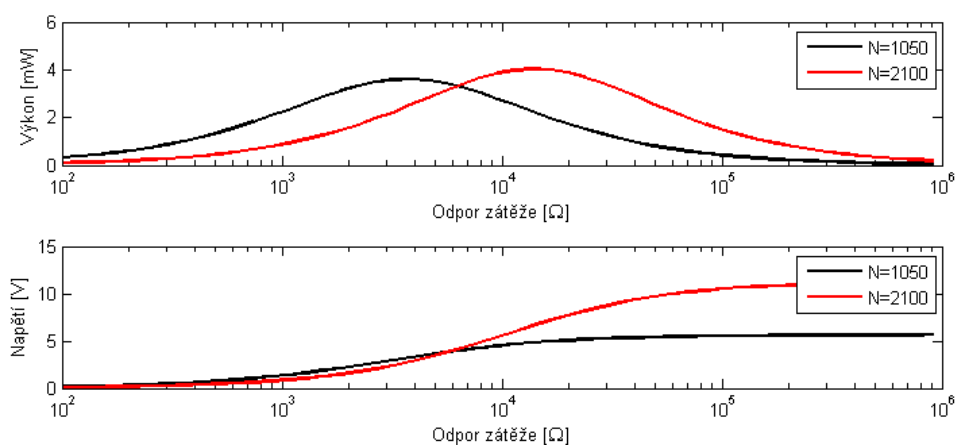
asi 0,5) by se však mohlo stát, že prostor pro pryskyřicový blok s cívkou by byl příliš těsný. Proto při dalších simulacích budeme využívat drátu o průměru  $50 \mu\text{m}$ , kterým zajistíme bezproblémové umístění do vzduchové mezery i při vyšším počtu závitů, případně ručním navíjení cívky.

Jak již bylo řečeno, optimální počet závitů cívky závisí především na hodnotě zátěžného odporu. Na obrázku 3.17 je zobrazena závislost generovaného efektivního napětí a středního výkonu na počtu závitů pro několik hodnot odporových zátěží, ze které je patrné, že s rostoucím odporem zátěže vzrůstá optimální počet závitů cívky. Pokud není řečeno jinak, všechny následující výpočty byly získány simulacemi při intenzitě vibrací  $0,1 g$ .



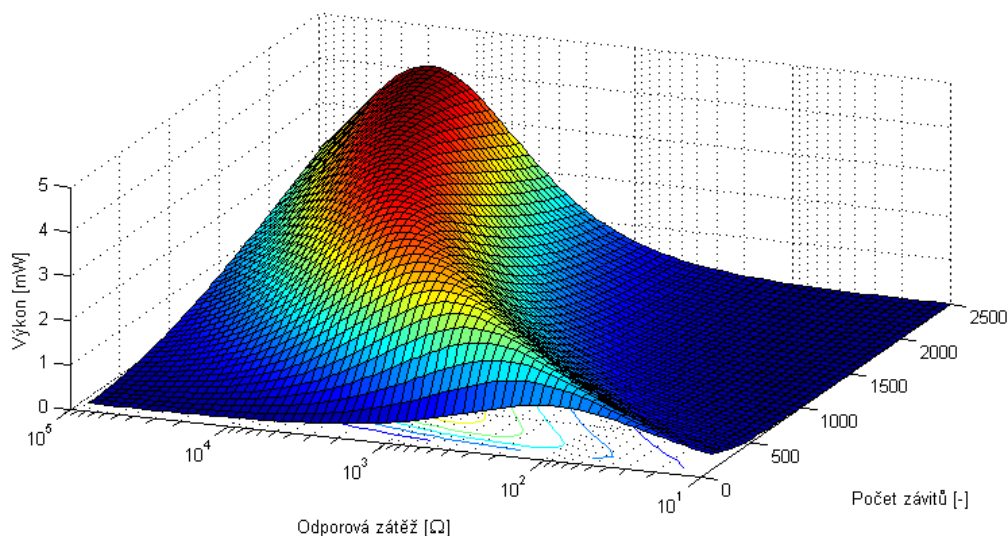
Obrázek 3.17: Závislost generovaného napětí a výkonu na počtu závitů a pro různé hodnoty odporové zátěže

Na obrázku 3.18 je graf závislosti generovaného efektivního napětí a středního výkonu na hodnotě připojené odporové zátěže pro dva počty závitů cívky. Jak lze na tomto obrázku vidět, do hodnoty asi  $6\text{ k}\Omega$  se na cívce s méně závitů generuje vyšší efektivní napětí, než na cívce s více závitů. Důvodem je mnohem vyšší hodnota elektromagnetického tlumení na cívce s dvojnásobným počtem závitů, díky které dochází k utlumení vybuzeného pohybu rezonančního mechanismu. To opět dokládá nutnost navrhování parametrů cívky pro konkrétní aplikaci. Střední výkon se ani s výraznou změnou počtu závitů příliš nemění. Jak bude ukázáno v kapitole 3.5, na hodnotu generovaného výkonu má kromě charakteristik budících vibrací vliv především kvalita rezonančního mechanismu.



Obrázek 3.18: Závislost generovaného napětí a výkonu na připojené odporové zátěži pro různý počet závitů

3D graf, který názorně postihuje popisovanou vazbu mezi optimálními počtem závitů a odporovou zátěží, je na obrázku 3.19.



Obrázek 3.19: Závislost generovaného středního výkonu na připojené odporové zátěži a počtu závitů cívky

### 3.4.2 Páka generátoru

Vzhledem k tomu, že při návrhu konstrukce páky generátoru je nutno počítat se zachováním vlastní frekvence této soustavy, probíhala jistá forma optimalizace již během vlastního návrhu. Cílem bylo nepřekročit hmotnost a rozměry předchozího prototypu generátoru vyrobeného na VUT v Brně.

Pokud by bylo nutné přistoupit ke změně celkových rozměrů soustavy, musely by kromě úpravy geometrických a fyzikálních rozměrů (vlastní rozměry součástí, poloměr setrvačnosti a hmotnost rezonančního mechanismu) proběhnout také nové výpočty tuhostní charakteristiky s jinou konfigurací magnetů za účelem zachování vlastní frekvence soustavy, která musí stále odpovídat frekvenci budících vibrací.

## 3.5 Výsledky simulací a jejich zhodnocení

V publikacích [15] a [21] byly odvozeny vztahy pro výpočet generovaného výkonu

$$P = \frac{m\zeta_e\Omega\omega^2\eta^3 Z_0^2}{(2\zeta_o\eta)^2 + (1 - \eta^2)^2}, \quad (3.12)$$

resp. maximálního výkonu generovaného generátorem naladěným na frekvenci budících vibrací:

$$P_{max}^{el} = \frac{m\zeta_e\omega^3 Z_0^2}{4\zeta_o^2} = \frac{m\zeta_e A_v^2}{4\omega\zeta_o^2} \quad (3.13)$$

V uvedených vzorcích se vyskytují tyto veličiny: poměrný elektrický útlum  $\zeta_e$  úměrný elektromagnetickému tlumení dle vztahu

$$\zeta_e = \frac{b_e}{2m\Omega}, \quad (3.14)$$

poměrný útlum soustavy  $\zeta_o$  daný vztahem

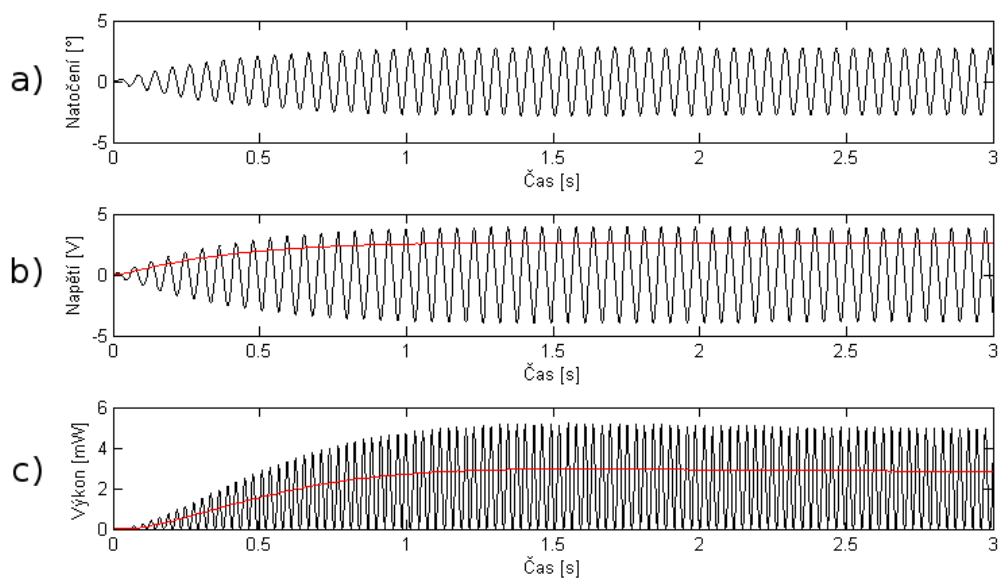
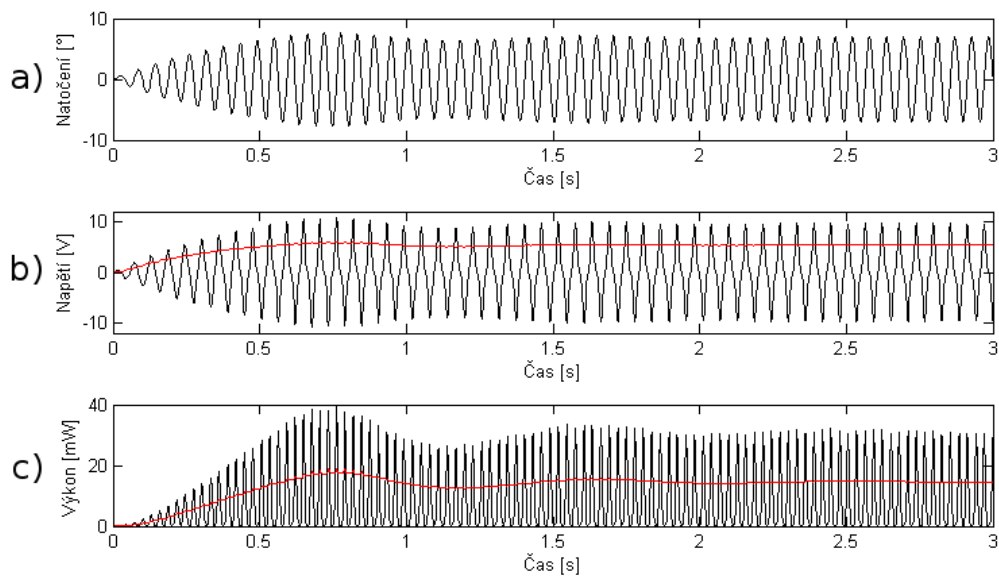
$$\zeta_o = \frac{b_e + b_m}{2m\Omega}, \quad (3.15)$$

vlastní úhlová frekvence generátoru  $\Omega$ , frekvence budících vibrací  $\omega$  (v našem případě  $17,2 \text{ Hz}$ ) a jejich amplituda  $Z_0$ , součinitel naladění generátoru  $\eta$  daný poměrem budící frekvence a vlastní frekvence generátoru (pro vztah 3.13 platí  $\eta = 1$ ), hmotnost rezonančního mechanismu  $m$  a zrychlení budících vibrací  $A_v$ .

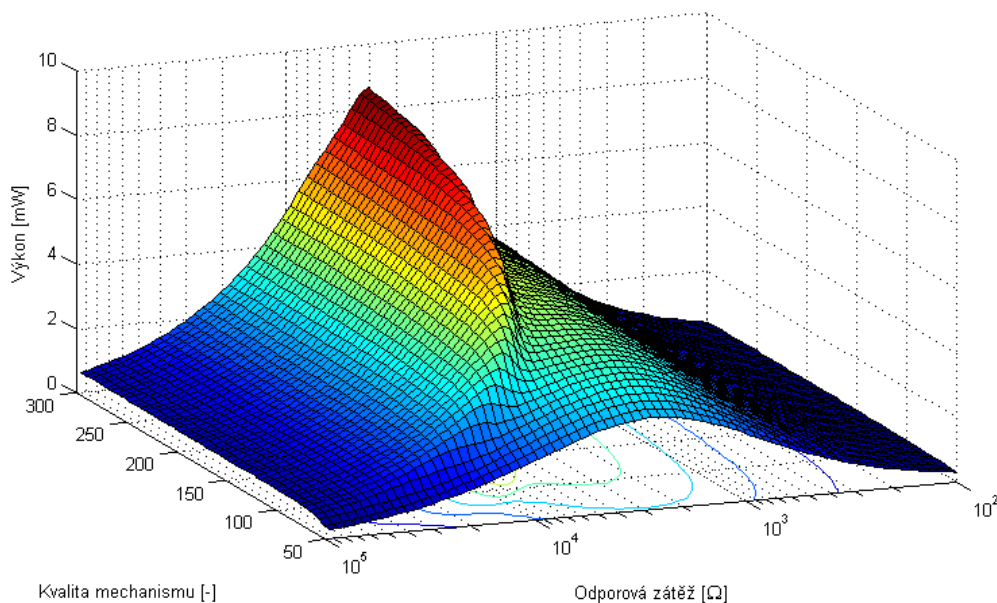
Vztahy 3.12 a 3.13 však jsou pouze přibližné, neboť při jejich odvozování došlo k několika zjednodušením. Simulace proto probíhaly výhradně v programu Matlab/Simulink na modelu soustavy, který byl popsán v kapitole 3.3.

Některé výsledky simulací při vibracích o intenzitě  $0,1 g$  se zátěžným odporem  $3 k\Omega$  a kvalitou generátoru  $Q = 50$  jsou uvedeny na obrázku 3.20. Výchylka páky (obr. 3.20a)) při této úrovni vibrací dosahuje nízkých hodnot a tuhost v tomto případě můžeme považovat za konstantní. Efektivní hodnota napětí (na obr. 3.20b) červenou barvou) dosahuje ustálené hodnoty  $2,6 V$ , střední výkon (na obr. 3.20c) červenou barvou) pak hodnoty  $2,9 mW$ .

Jiná situace však nastává při vibracích o vyšší amplitudě, případně při vyšším kvalitativním faktoru generátoru. Na obrázku 3.21 jsou zobrazeny výsledky simulací, ve kterých byla amplituda budících vibrací oproti předchozímu případu zvýšena na  $0,3 g$ . Jak je vidět na obr. 3.21a), výchylky zde v krajních polohách dosahují vyšších hodnot, při kterých tuhost není konstantní. To má vliv i na tvar výstupního napětí (obr. 3.21b)), který není ani po odeznění přechodového děje harmonický. Efektivní hodnota napětí v tomto případě činí po ustálení asi  $4,4 V$ , střední hodnota výkonu  $14,5 mW$ .

Obrázek 3.20: Výsledky simulace pro vibrace o amplitudě  $0,1g$ Obrázek 3.21: Výsledky simulace pro vibrace o amplitudě  $0,3g$

Na obrázku 3.22 je zobrazena 3D charakteristika závislosti generovaného středního výkonu na připojené odporové zátěži a kvalitě rezonančního mechanismu generátoru. Simulace proběhly na modelu s cívkou s 1050 závitů, intenzita budících vibrací činila 0,1 g.

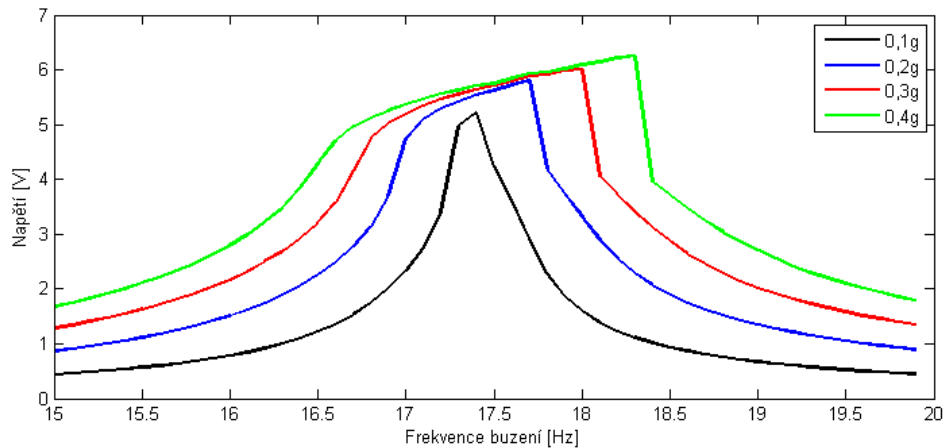


Obrázek 3.22: Závislost generovaného výkonu na kvalitě generátoru a připojené odporové zátěži

Z obrázku je patrné, že kvalita rezonančního mechanismu je důležitým faktorem ovlivňujícím výkon generátoru a také to, že pro konkrétní cívku se optimální hodnota odporové zátěže s kvalitou rezonančního mechanismu mění. Důvodem je skutečnost, že hodnota generovaného výkonu závisí na poměru elektromagnetického a mechanického tlumení, jak bylo vysvětleno v [15]. Simulace závislosti středního výkonu na kvalitě generátoru byla provedena především kvůli skutečnosti, že hodnota mechanického tlumení je v jednotlivých fázích pohybu páky generátoru různá (aktuální hodnota skutečného tření, které je jedním z dominantních faktorů určujících kvalitu generátoru, závisí mimo jiné na rychlosti páky) a stanovit hodnotu generovaného výkonu je bez správného modelu tření obtížné.

Na obrázku 3.23 je znázorněna závislost generovaného efektivního napětí na budící frekvenci pro několik amplitud vibrací. Tyto výsledky byly získány na základě

simulací na modelu s vysokou kvalitou rezonančního mechanismu ( $Q = 200$ ), kdy se výchylka páky generátoru blíží maximální možné výchylce 10 stupňů.



Obrázek 3.23: Závislost generovaného napětí na frekvenci a amplitudě budících vibrací

Při amplitudě vibrací  $0,1\text{ g}$  má charakteristika tvar typický pro amplitudo-frekvenční charakteristiky lineárních systémů, neboť maximální výchylka, kterou páka generátoru při této intenzitě vibrací dosahuje, činí asi 5 stupňů. S rostoucí intenzitou vibrací však páka dosahuje stále větších výchylek a dostává se do poloh, ve kterých se již silně projevují nelinearity závislosti síly mezi magnety utvářejícími tuhost na natočení, které brání dalšímu zvyšování výchylky. Díky tomu neroste ani hodnota napětí (zvyšuje se jen o hodnotu danou skutečností, že velikost generovaného napětí zprostředkovaně závisí i na frekvenci budících vibrací) a amplitudo-frekvenční charakteristika je tak oříznutá. Rozsah frekvencí, na kterých generátor za těchto podmínek generuje užitečné stabilní napětí, se tak výrazně zvyšuje.

Nutno podotknout, že výsledky zobrazené 3.23 jsou jen nasimulované a skutečná amplitudo-frekvenční charakteristika se bude mírně lišit. V nelineárních systémech, mezi které navržený generátor bezesporu patří, totiž tvar této charakteristiky závisí i na dalších faktorech, jako směr a rychlost přejezdu přes rezonanční frekvenci. Získání takové charakteristiky by však vyžadovalo experimenty s reálným vibračním generátorem.

---

## 4 Závěr

Tato práce se zabývala úpravami konstrukce stávajícího vibračního generátoru. V rešeršní části bylo pojednáno o možnostech získávání energie z prostředí se zvláštním zaměřením na mechanické vibrace. Byl zanalyzován současný stav na poli elektromagnetických generátorů jak ve vědecké, tak v komerční sféře.

Ve druhé části práce byl podrobně popsán postup při návrhu jednotlivých částí vibračního generátoru a na základě navrženého řešení byl vytvořen model, pomocí kterého byly optimalizovány parametry elektrické části generátoru. Na tomto modelu proběhlo několik simulací, jejichž výsledky byly podrobně analyzovány.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout konstrukční úpravy stávajícího vibračního generátoru s ohledem na jeho výrobu, generovaný výkon a co nejmenší rozměry a hmotnost. Konečné řešení generátoru je rozměrově srovnatelné s předchozí konstrukcí a váží o 8 gramů méně. Zadání tedy bylo splněno. Díky odlišnému řešení uložení páky generátoru v rámu bylo dosaženo menšího mechanického tlumení a s tím souvisejícího vyššího generovaného výkonu. Vzhledem k experimentálně neověřenému modelu tlumení nelze přesně říci, od jaké hladiny vibrací generátor generuje dostatečný výkon. Ze simulací však vyplývá, že požadavky na hodnoty výstupních veličin by měly být splněny při amplitudách vibrací nad  $0,13 g$ , což vyhovuje zadání. Navíc lze předpokládat, že požadavkům by vyhověl i o něco menší model navržené konstrukce. Úprava geometrických parametrů generátoru však musí jít ruku v ruce se změnou konfigurace magnetů vytvářejících tuhost rezonančního mechanismu (kvůli zachování vlastní frekvence generátoru), úpravou budicího obvodu a v neposlední řadě i parametrů cívky.

Výroba funkčního prototypu generátoru nebyla součástí zadání této práce a proto neproběhl experiment, pomocí kterého bychom získali mnoho užitečných dat. Příkladem takového experimentu může být experimentální určení odezvy na počáteční výchylku, na základě které bychom byli schopni odvodit přesnější model tření v místě uložení rezonančního mechanismu a získat tak přesnější model soustavy. Z toho vyplývá, že by bylo vhodné navázat na tuto práci a v řešení problému pokračovat vytvořením funkčního prototypu navrženého vibračního generátoru.

---

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] SCIENTIFIC AMERICAN: SUPEREFFICIENT, COST-EFFECTIVE SOLAR CELL BREAKS CONVERSION RECORDS [online]. 2006 [cit. 20. 3. 2009]. Dostupný z WWW: (<http://www.sciam.com/article.cfm?id=superefficient-cost-effec>).
- [2] IVAN STOJMEŇOVÍČ: *Handbook of Sensor Networks*, ISBN 0471744131, 2005
- [3] WILLIAM P. ROBBINS; IAN MARUSIC: *Wind-Generated Electricity Using Flexible Piezoelectrics*, Prezentováno na: NSF-Sponsored Faculty Workshop: Reforming the Electric Energy Systems Curriculum, 2006
- [4] ROUNDY, SHAD; WRIGHT, PAUL K.; RABAEY, JAN. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 2003, vol. 26, no. 11, s. 1131-1144.
- [5] GLYNNE-JONES, P.; TUDOR, M. J.; BEEBY, S. P.; WHITE, N. M.. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, vol. 110, no. 1-3, s. 344-349.
- [6] EL-HAMI M.; GLYNNE-JONES, P.; WHITE, N.M.; HILL, M.; BEEBY, S.; JAMES, E.; BROWN, A. D.; ROSS, J. N.. Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 92, no. 1-3, s. 335-342.
- [7] TORAH, R. N.; BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; O'DONNELL, T.; ROY, S.. Development of a Cantilever Beam Generator Employing Vibration Energy Harvesting. In *PowerMEMS 2006 - The 6th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, Berkeley, U.S.A.: November 29 - December 1, 2006, 2006. s. 181-184.
- [8] VON BÜREN, T.; TRÖSTER, G.. Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator. *Sensors and Actuators A*, 2007, 135, s.n., s. 765-775.

- 
- [9] KÜLAH, H.; NAJAFI, K.. Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications. *IEEE Sensors Journal*, March 2008, 8, 3, s. 261-268.
- [10] CAO, XINPING; CHIANG, WEN-JEN; KING, YA-CHIN; LEE, YI-KUEN. Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC-DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, March 2007, 22, 2, s. 679-685.
- [11] BURROW, S.; CLARE, L.: A Resonant Generator with Non-Linear Compliance for Energy Harvesting in High Vibrational Environments. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07*. Antalya, Turkey, May 3 - 5, 2007. 2007, p. 715-720. ISBN 1-4244-0742-7.
- [12] PERPETUUM LTD., PRODUCTS [online]. 2007 [cit. 13. 3. 2009]. Dostupný z WWW: [http://www.perpetuum.co.uk/home.php?page\\_id=6](http://www.perpetuum.co.uk/home.php?page_id=6).
- [13] M2E POWER INC. [online]. 2007-2008 [cit. 13. 3. 2009]. Dostupný z WWW: <http://www.m2epower.com/technology/overview.htm>.
- [14] FERRO SOLUTIONS, INC.: VEH-360 DATASHEET [online]. 2008 [cit. 15. 3. 2009]. Dostupný z WWW: [http://www.ferrosi.com/files/VEH360\\_datasheet.pdf](http://www.ferrosi.com/files/VEH360_datasheet.pdf).
- [15] HADAŠ, Z.: *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*, Disertační práce, VUT v Brně, 2007
- [16] ANSYS, INC.: *Release 10.0 Documentation for ANSYS*, ANSYS 10.0, 2009
- [17] 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.
- [18] MĚŘIČKA, J., ZOUBEK, Z.: *Obecná teorie elektrického stroje*, SNTL, Praha, 1973
- [19] BREPTA, R., PŮST, L., TUREK, F.: *Mechanické kmitání*, Sobotáles, Praha, 1994

- 
- [20] FIALA, P., KADLECOVÁ, E.: *Modelování elektromagnetických polí*, VUT v Brně, Brno, 2005
- [21] BEEBY, S. P., TUDOR, M. J., TORAH, R. N., KOUKHARENKO, E., ROBERTS, S., O'DONNELL, T., ROY, S.: Macro and Micro Scale Electromagnetic Kinetic Energy Harvesting Generators. In *DTIP of MEMS & MOEMS 2006 in Stresa*. Stresa, Italy, April 26 - 28, 2006. 2006, p. 1647 - 1653. ISBN 2-916187-03-0.
- [22] WIKIPEDIA.ORG: RESISTIVITY [online]. 2009 [cit. 21. 5. 2009]. Dostupný z WWW: (<http://en.wikipedia.org/wiki/Resistivity>).
- [23] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ BRNO, BRNO. *Elektromagnetický vibrační generátor pro nízké frekvence vibrací*. Int.Cl.: H 02 K 35/02. Česká republika. Patentový spis 299911. 29.12.2008.
- [24] VAN DEN BOSSCHE, A., VALCHEV, V.: *Inductors and transformers for power electronics*, CRC Press, 2005. ISBN 1574446797. s. 137-146.

---

## 6 Seznam příloh

**Příloha 1: Výkres sestavy - Páka**

**Příloha 2: Výkres sestavy - Rám**

**Příloha 3: CD**

Obsah CD dle složek:

- /DP.text/  
Elektronická forma diplomové práce
- /files\_ANSYS/magnetic\_flux/  
Zdrojové kódy v jazyce APDL pro výpočet magnetické indukce
- /files\_ANSYS/magnetic\_force/  
Zdrojové kódy v jazyce APDL pro výpočet magnetických sil
- /files\_ANSYS/magnets\_data/  
Informace o vlastnostech použitých magnetických materiálů
- /files\_Matlab/  
Simulační model generátoru v prostředí Matlab/Simulink a soubory pro zpracování výsledků
- /files\_PHP/  
Zdrojové soubory v jazyce PHP pro zpracování výsledků z programu ANSYS
- /files\_Matlab/magnetic\_flux/  
Skript pro výpočet závislosti magnetické indukce
- /files\_SolidWorks/  
CAD model generátoru v programu SolidWorks
- /files\_AutoCAD/  
Výrobní výkresy