



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

TESTOVÁNÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU S PŘÍČNOU CÍVKOU

TEST OF VIBRATION POWER GENERATOR WITH TRANSVERSAL COIL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN DRBOHLAV

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK HADAŠ, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Drbohlav

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

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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 bakalářské práce:

Testování vibračního generátoru s příčnou cívkou

v anglickém jazyce:

Test of Vibration Power Generator with Transversal Coil

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrační generátor je zařízení, které vyrábí elektrickou energii z vibrací strojních soustav. Výkon takového zařízení je v řádu několika miliwatt, ale s vývojem moderní elektroniky i tento výkon dostačuje pro napájení diagnostických a mobilních zařízení. Úkolem této práce je dle vytvořeného návrhu toto zařízení oživit, otestovat a analyzovat jeho případné využití.

Cíle bakalářské práce:

1. Oživení vibračního generátoru dle zadané technické dokumentace.
2. Navržení konstrukčních úprav z hlediska montáže, výroby a minimalizace hmotnosti.
3. Otestovat na základě měření na vibrační stolici parametry tohoto zařízení.
4. Analyzovat možnosti jeho využití jako autonomního zdroje elektrické energie.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá oživením a otestováním parametrů vibračního elektromagnetického generátoru, návrhem konstrukčních úprav a vytvořením numerického modelu popisujícího chování generátoru v prostředí MATLAB Simulink.

Abstract:

This work deals with the installation and testing the parameters of the electromagnetic vibration generator, designing of construction modifications and creating numerical model describing responses of generator in MATLAB Simulink.

Klíčová slova:

Energy Harvesting, Energy Scavenging, Vibrační generátor, Vibrační mikro-generátor, Nízkofrekvenční generátor, Nízko-výkonový generátor, Elektromagnetický generátor, Elektromagnetická indukce.

Key words:

Energy Harvesting, Energy Scavenging, Vibration micro-generator, Vibration generator, Low-frequency generator, Low-power generator, Electromagnetic generator, Electromagnetic induction.

DRBOHLAV, J. *Testování vibračního generátoru s příčnou cívkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a za využití informací získaných v průběhu studia a z uvedené literatury.

V Brně dne

.....

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za rady, připomínky a odbornou pomoc.

Obsah:

1. Úvod	11
2. Formulace problému a cíle práce	13
3. Elektromagnetický vibrační generátor	15
3.1. Mechanická část generátoru	15
3.2. Elektromagnetická část generátoru	16
4. Matematická analýza	17
4.1. Mechanické kmitání	17
4.2. Generace elektrické energie	18
4.3. Pohybová rovnice	19
4.4. Implementace modelu do prostředí MATLAB Simulink	20
4.5. Porovnání numerického modelu a skutečného generátoru	21
5. Konstrukce generátoru	23
5.1. Magnetický obvod	23
5.2. Páka	23
5.3. Cívka	24
5.4. Rezonanční mechanismus	24
5.5. Rám	25
6. Konstrukční úpravy	27
6.1. Konstrukční úpravy z hlediska montáže	27
6.1.1. Páka a magnetický obvod	27
6.2. Konstrukční úpravy z hlediska funkce	28
6.2.1. Kostra cívky	28
6.2.2. Rám	28
7. Výsledky testování generátoru	29
7.1. Odezva generátoru na počáteční výchylku	29
7.2. Měření na vibrační stolici	32
8. Závěr	35
9. Seznam použitých zdrojů	37
10. Seznam příloh	39

1. Úvod

S rozvojem miniaturizace bylo umožněno mnohým zařízením pracovat na dříve nemyslitelných místech. Ať už se jedná o senzory, či jakákoli jiná zařízení, vzhledem k možnosti bezdrátového přenosu informací jsou omezeny jen potřebou napájení. Při použití kabelových rozvodů energie se prakticky ztrácí veškeré výhody bezdrátové komunikace. Baterie ale nejsou také vždy vhodné, ať už pro omezenou životnost, či mnohdy problematickost jejich výměny. I proto se uvažuje o možnostech najít alternativní zdroj elektrické energie, který by využíval pokud možno nevyčerpatelných energetických zdrojů v blízkosti napájené soustavy.

Takový způsob získu elektrické energie je celosvětově označován jako Energy Harvesting nebo Energy Scavenging.

Nejdůležitější je při využití tohoto principu získu energie identifikace dostatečně silného zdroje prakticky jakékoli formy energie. Ať už se jedná o využití tepelné energie, solární energie, kinetické energie proudícího vzduchu, energie vibrací, či jakékoli formy biologického zdroje energie, vždy je dále třeba najít vhodný fyzikální princip nutný pro přeměnu na elektrickou energii s ohledem na možné rozměry a hmotnost vyvíjeného Energy Harvesting zdroje a požadovaného elektrického výkonu.

V technické praxi jsou asi nejběžnějším zdrojem energie mechanické vibrace o různé frekvenci a amplitudě. Pokud jsou dominantně přítomny nízké frekvence o vyšší amplitudě, jako nejvhodnější se jeví využít principu elektromagnetické indukce. V případě že jsou ale ve vibračním spektru nejvýrazněji zastoupeny vyšší frekvence, je vhodné pro přeměnu na elektrickou energii využít piezoelektrického jevu.

Na principu elektromagnetické indukce pracuje generátor, jehož oživením a testováním se zabývá tato práce.

2. Formulace problému a cíle práce

Na VUT byl v posledních letech vyvinut nízkofrekvenční vibrační elektromagnetický generátor, který je schopen z mechanické energie okolních vibrací generovat elektrickou energii potřebnou pro napájení bezdrátových senzorů. Takový generátor je v přítomnosti vhodných vibrací prakticky nevyčerpatelným zdrojem elektrické energie. Vyvíjený generátor má pracovat v prostředí, kde jsou přítomny mechanické vibrace o frekvenci kolem 17 Hz.

Na tento generátor lze nahlížet jako na soustavu složenou ze 2 základních vzájemně propojených a ovlivňujících-se částí – mechanickou a elektromagnetickou. Mechanická část zahrnuje pružný člen, kmitavý člen a jeho uložení v rámu. Dále pak ji ovlivňuje parazitní tlumení v místě uchycení pohyblivé části a zpětnovazební tlumení způsobené reakcí cívky na odběr elektrického výkonu. Elektromagnetickou část tvoří budící magnetický obvod připojený ke kmitavému členu a cívka uchycená v rámu.

Cílem této práce je provést montáž inovovaného modelu vyvíjeného vibračního generátoru a navrhnout konstrukční úpravy z hlediska zjednodušení montáže. Dále pak sestavený generátor otestovat a určit jeho parametry. S využitím zjištěných parametrů vytvořit simulační model generátoru. Na základě výsledků měření analyzovat možnost generátoru jako autonomního zdroje elektrické energie.

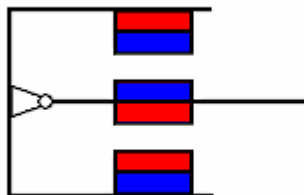
3. Elektromagnetický vibrační generátor

Vibrační generátor patří mezi tzv. Energy Harvesting zařízení, za jejichž pomoci je získávána elektrická energie z energie přítomné v jejich okolí.

3.1. Mechanická část generátoru

Základní částí vibračního generátoru je rezonanční mechanismus, který musí mít parametry nastaveny tak, aby předpokládaná frekvence budících vibrací byla blízká jeho rezonanční frekvenci.

Rezonanční mechanismus je obecně tvořen pohyblivým a pružným členem. Pohyblivý člen je v tomto případě páka uložená v rotačních vazbách, a pružným členem je sada permanentních magnetů nahrazujících pružiny. Magnety jsou umístěny na páce a rámu tak, aby se vzájemně odpuzovaly a v klidovém stavu udržovaly páku v rovnovážné poloze.

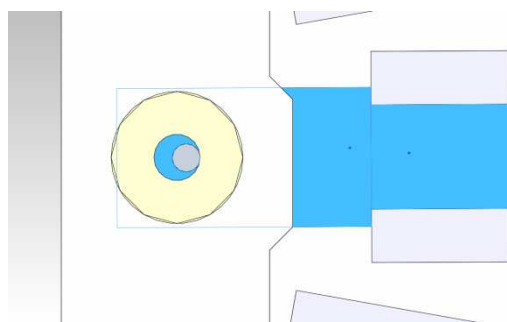


Obr. 1 Schema netlumeného rezonančního mechanismu

Uložení páky v rotačních vazbách je zajištěno pomocí osy uložené v pouzdrech. Pro omezení mechanického tření má pouzdro větší průměr než osa, vzhledem k malým úhlovým výchylkám při pohybu páky lze tedy její pohyb považovat za rotační.

$$m^* \cdot \ddot{q} + b^* \cdot \dot{q} + k^* \cdot q = m^* \cdot G \cdot \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

Relativní pohyb páky při buzení vibracemi s amplitudou zrychlení lze popsat rovnicí (3.1). V této rovnici zobecněné tlumení spojuje vliv mechanického i elektromagnetického tlumení. Elektromagnetické tlumení tvoří reakci cívky na pohyb páky s magnetickým budícím obvodem. Touto reakcí je myšlena přeměna pohybové energie na elektrickou energii indukovanou v závitě cívky a spotřebovávanou v připojené zátěži.



Obr. 2 Uložení osy páky

3.2. Elektromagnetická část generátoru

K přeměně energie okolních vibrací na elektrickou energii generátor využívá Faradayova zákona elektromagnetické indukce.

$$u_i = -Nc \cdot \frac{d\phi_E}{dt} \quad (3.2)$$

Změnu magnetického toku cívkou u tohoto generátoru zajišťuje kmitavý pohyb magnetického obvodu, spojeného s pákou generátoru, kolem cívky. Díky tomuto pohybu je v závitech cívky indukováno elektrické napětí. Magnetický budicí obvod je tvořen 4 sadami magnetů připevněnými na pólové nástavce tak, aby se magnetický tok uzavíral se přes závit cívky a rozptyl magnetického toku byl co nejmenší.

Elektrický výkon generovaný v závitech cívky je závislý na velikosti indukovaného napětí, vnitřním odporu cívky a odporu připojené zátěže. Protože cívka nemá magnetické jádro, lze předpokládat velmi nízkou reaktanci oproti vnitřnímu odporu cívky a připojené zátěži a její vliv je pro určení generovaného výkonu zanedbán.

$$P_e = \frac{u^2}{R_c + R_z} \quad (3.3)$$

Při odběru elektrického výkonu dochází k zatlumení pohybu páky. To je projevem přeměny mechanické energie pohybu páky, na elektrickou energii. Zatlumení pohybu páky zpětně omezuje amplitudu indukovaného napětí, čímž je realizovaná zpětná vazba mezi připojenou elektrickou zátěží a pohybem páky.

4. Matematická analýza

Součástí této práce je i konkretizace parametrů generátoru a vytvoření numerického modelu popisujícího chování vyrobeného generátoru, resp. pohyb páky a generování elektrické energie.

4.1. Mechanické kmitání

Nebuzený kmitavý pohyb páky bez připojené elektrické zátěže popisuje chování generátoru po vychýlení páky a následný přechod do rovnovážné polohy. Tento pohyb lze popsat rovnicí (4.1). Jednotlivé parametry je třeba zobecňovat k ose rotace páky.

$$m^* \cdot \ddot{q} + b^* \cdot \dot{q} + k^* \cdot q = 0 \quad (4.1)$$

Zobecněná hmotnost m^* je u rotačního pohybu momentem setrvačnosti k ose rotace. Páka má před podle modelu vytvořeném v programu SolidWorks moment setrvačnosti k ose rotace $m^* = 65 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Zobecněnou tuhost mechanismu k^* lze vypočítat z experimentálně určené vlastní frekvence Ω_0 .

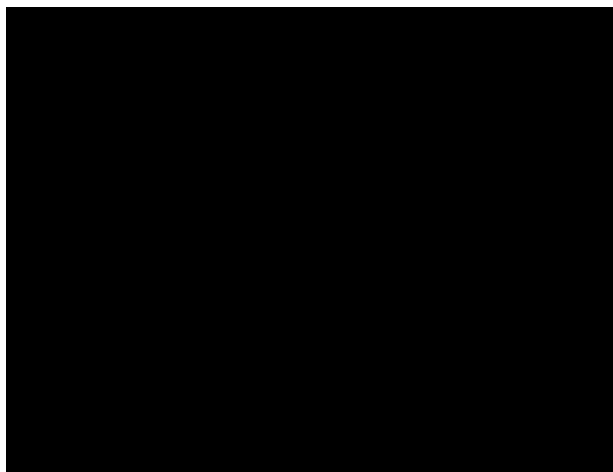
$$\Omega_0^2 = \frac{k^*}{m^*} \quad (4.2)$$

$$k^* = m^* \cdot \Omega_0^2 \quad (4.3)$$

$$\Omega_0 = 2\pi \cdot f_0 \quad (4.4)$$

Dosažením změřené vlastní frekvence $f_0 = 18,7 \text{ Hz}$ a momentu setrvačnosti je vypočtena lineární hodnota zobecněné tuhosti $k^* = 0,8975 \text{ N} \cdot \text{m}$. Tuhost mechanismu zůstane stejná i po vyvážení páky generátoru na požadovanou vlastní frekvenci $f_0 = 17 \text{ Hz}$.

Průběh magnetických odpudivých sil v závislosti na vzdálenosti magnetů, resp. na natočení páky, má nelineární průběh. Pro výpočet je možné tuto nelinearitu nahradit kombinací 2 linearizovaných částí charakteristiky. V grafu na Obr.3 je zobrazena závislost zobecněné tuhosti na úhlu natočení. Pro názornost je zde úhel natočení ve stupních, v numerickém modelu je úhel zadán v radiánech.



Obr. 3 Závislost zobecněné tuhosti na úhlu natočení

Hodnota zobecněného mechanického tlumení b_m^* je určena jako funkce poměrného útlumu b_p , resp. quality faktoru Q , který vyjadřuje poměr získané a disipované energie. Mechanické tlumení je u tohoto generátoru způsobováno odvalováním osy páky v pouzdrech.

$$b_m^* = 2 \cdot b_p \cdot \Omega_0 \cdot m^* \quad (4.5)$$

$$b_p = \frac{1}{2 \cdot Q} \quad (4.6)$$

$$b_m^* = \frac{\Omega_0 \cdot m^*}{Q} \quad (4.7)$$

4.2. Generace elektrické energie

Podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce pohyb páky spolu s magnetickým budícím obvodem kolem cívky způsobuje změnu magnetického indukčního toku cívkou $\frac{d\Phi_B}{dt}$, čímž je podle rovnice (3.2) v závitě cívky indukováno elektrické napětí u_i .

Magnetický indukční tok je přímo úměrný magnetické indukci B a ploše S , kterou prochází. Rychlost změny magnetického toku je rovna okamžité rychlosti pohybu páky. Magnetické pole působí zároveň na 2 místa cívky, aktivní délka závitu la je tedy dvojnásobná. Dosazením těchto podmínek získá rovnice tvar (4.8).

$$u_i = Nc \cdot B \cdot 2 \cdot la \cdot \dot{x} \quad (4.8)$$

Protože pohybová rovnice je vztažena k rotačnímu pohybu, je třeba i tuto rovnici upravit a rychlost pohybu určit v závislosti na úhlové rychlosti. Okamžitá rychlost pohybu magnetického budícího obvodu \dot{x} je určena pomocí úhlové rychlosti a vzdálenosti cívky od osy rotace lc .

$$u_i = Nc \cdot B \cdot 2 \cdot la \cdot lc \cdot \dot{q} \quad (4.9)$$

Získaný elektrický proud i je závislý na indukovaném napětí u_i , vnitřním odporu cívky Rc a odporu připojené zátěže Rz . Vzhledem k tomu, že cívka nemá magnetické jádro, lze předpokládat velmi nízkou reaktanci oproti vnitřnímu odporu cívky a připojené zátěži. Hodnota zdánlivého odporu cívky je tedy zanedbána.

$$i = \frac{u_i}{Rc + Rz} \quad (4.10)$$

Generovaný elektrický výkon p_e lze určit z generovaného elektrického napětí u_i a elektrického proudu i .

$$p_e = u_i \cdot i \quad (4.11)$$

Dosazením rovnic (4.9) a (4.10) získáme vzorec pro výpočet elektrického výkonu ve tvaru:

$$p_e = \frac{(Nc \cdot B \cdot 2 \cdot la \cdot lc \cdot \dot{q})^2}{Rc + Rz} \quad (4.12)$$

Při transformaci kinetické energie páky na elektrický výkon dochází vlivem elektromechanické přeměny energie k tlumení mechanického kmitání páky b_e . Toto tlumení lze určit z rovnice pro výpočet disipovaného výkonu p_d .

$$p_d = b_e \cdot \dot{x}^2 \quad (4.13)$$

Porovnáním rovnic (4.12) a (4.13) lze určit hodnotu elektromagnetického tlumení v závislosti na známých parametrech.

$$b_e = \frac{(Nc \cdot B \cdot 2 \cdot la)^2}{Rc + Rz} \quad (4.14)$$

4.3. Pohybová rovnice

Rovnice (3.1) popisuje chování buzeného generátoru bez oddělení vlivů mechanického a elektromagnetického tlumení. Pokud jsou tyto vlivy odděleny, je třeba rovnici upravit do tvaru (4.15).

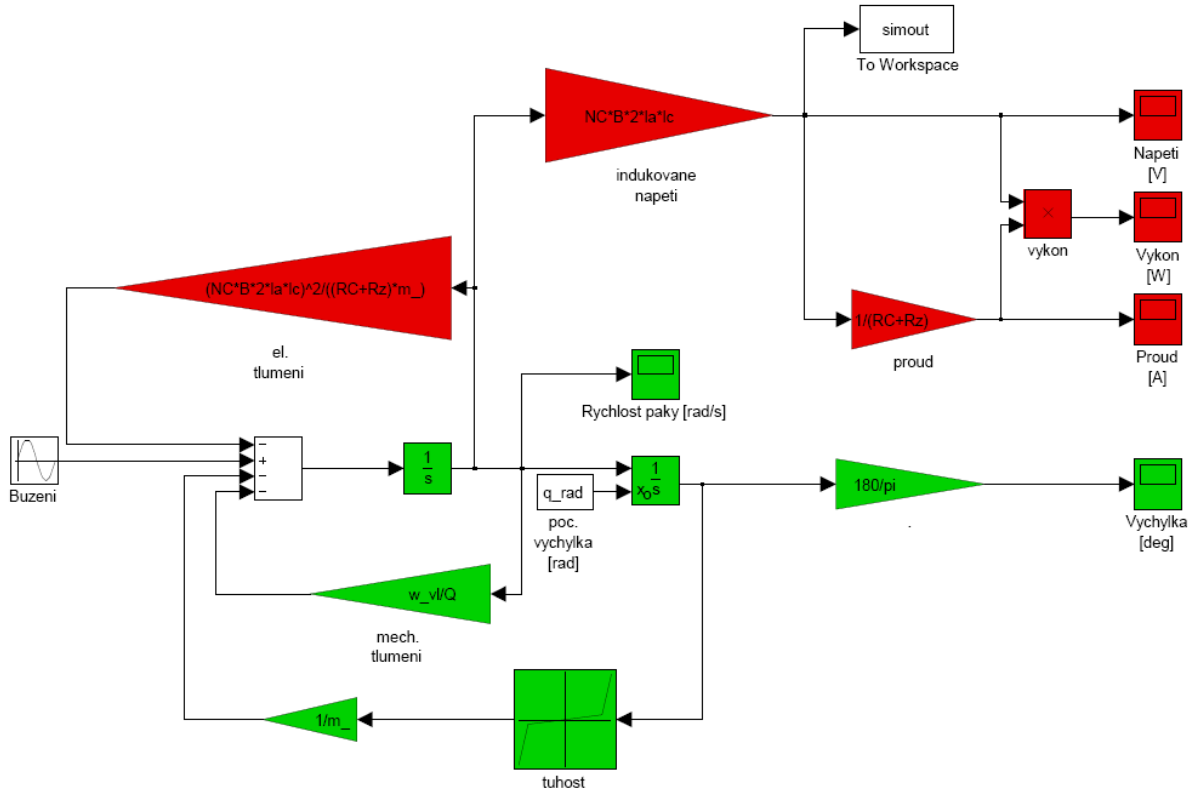
$$m^* \cdot \ddot{q} + (b_m^* + b_e^*) \cdot \dot{q} + k^* \cdot q = m^* \cdot G \cdot \sin(\omega t) \quad (4.15)$$

Dosažením rovnic popisujících mechanické (4.7) a elektromagnetické (4.14) tlumení do pohybové rovnice (4.15) a následnou úpravou rovnice pro její implementaci do prostředí Simulink se získá pohybová rovnice ve tvaru (4.16).

$$\ddot{q} + \frac{\Omega_0}{Q} \cdot \dot{q} + \frac{(Nc \cdot B \cdot 2 \cdot la \cdot lc)^2}{(Rc + Rz) \cdot m^*} \cdot \dot{q} + \frac{k^*}{m^*} \cdot q = G \cdot \sin(\omega t) \quad (4.16)$$

4.4. Implementace modelu do prostředí MATLAB Simulink

Na Obr.4 je zobrazen model vytvořený v prostředí MATLAB Simulink. Bloky označené zelenou barvou představují výpočet mechanického pohybu páky generátoru, červené bloky představují výpočet elektromagnetické části generátoru.

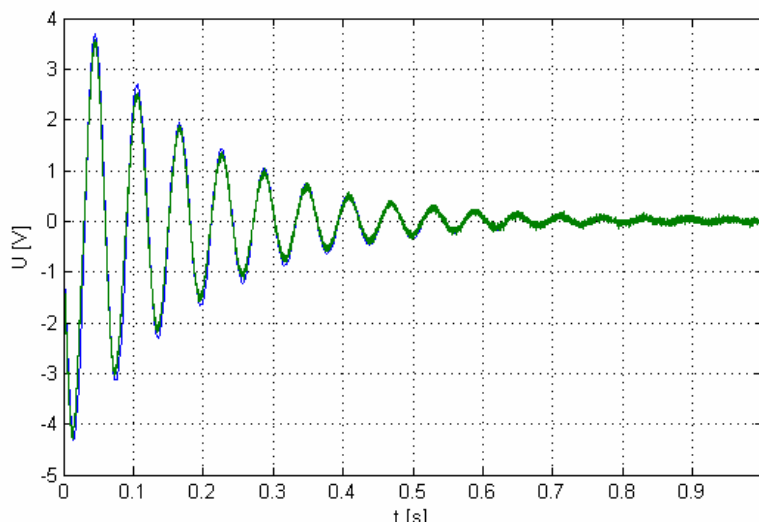


Obr. 4 Model generátoru v prostředí MATLAB Simulink

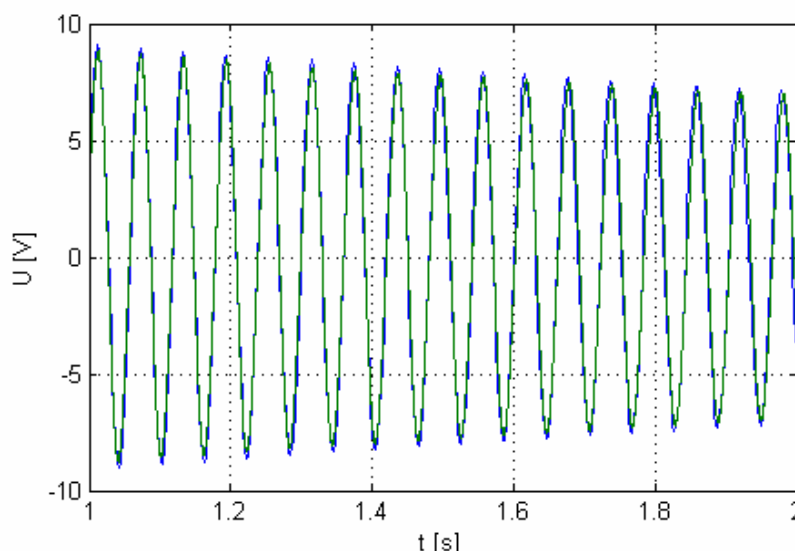
4.5. Porovnání numerického modelu a skutečného generátoru

Pro porovnání parametrů numerického modelu se skutečným generátorem posloužilo testování generátoru na počáteční výchylku.

Data naměřená na osciloskopu byla uložena do datového formátu a následně načtena do jednoho grafu se simulovaným průběhem. Modrá barva zobrazuje simulovaný průběh odezvy na počáteční výchylku, zelená naměřený. Vytvořený numerický model tedy s dostatečnou přesností popisuje chování generátoru.



Obr. 5 Odezva na počáteční výchylku $R_z = 1k\Omega$



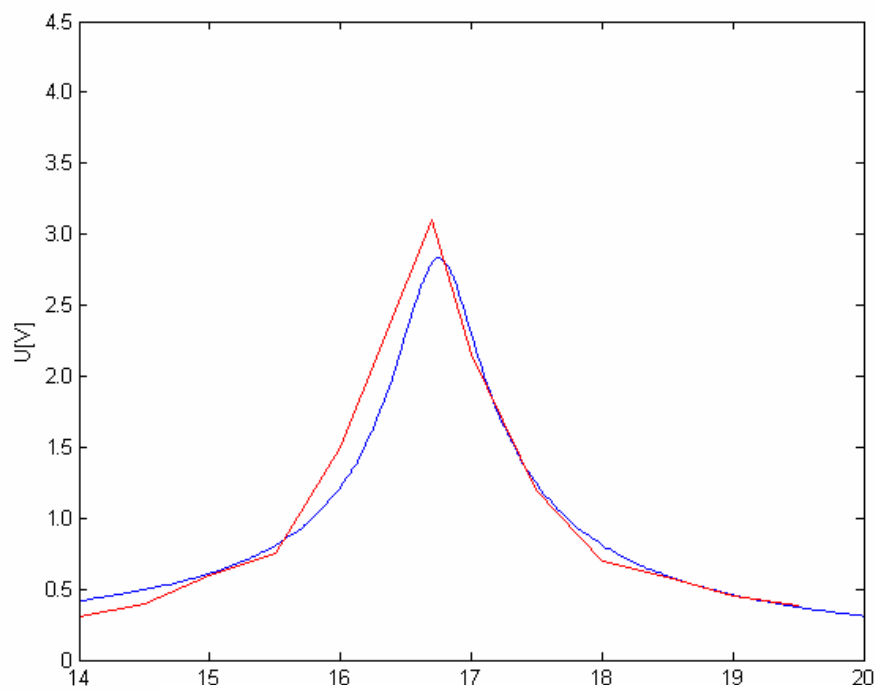
Obr. 6 Výřez odezvy na počáteční výchylku bez zátěže

Graf na Obr.5 zobrazuje průběh napětí generátoru s připojeným rezistorem $R_z = 1k\Omega$.

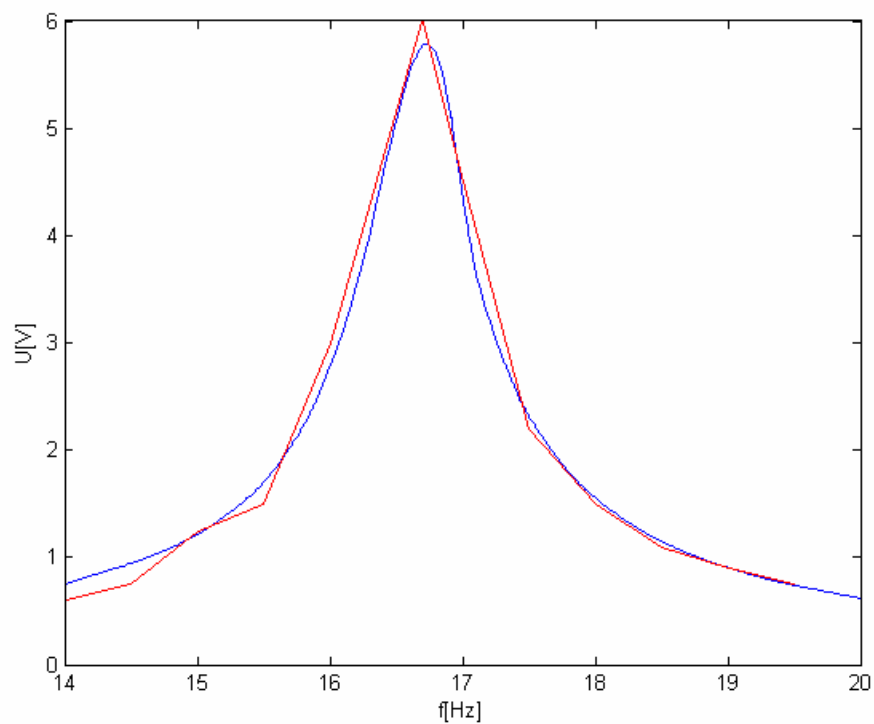
Graf na Obr.6 zobrazuje část průběhu napětí bez připojeného zatěžovacího rezistoru, generátor byl tedy zatížen jen vnitřním odporem osciloskopu $R_z = 1M\Omega$. Z celého průběhu je zde udělaný výřez, protože při zobrazení celého průběhu není rozeznatelný tvar průběhu napětí.

Dále byl porovnán naměřený a simulovaný průběh amplitudovo-frekvenční charakteristiky. Simulovaný průběh byl tvořen postupným nastavováním frekvence buzení a ukládáním maximálních hodnot amplitudy výstupního napětí.

Na Obr. 7 a Obr. 8 jsou zobrazeny porovnání průběhů pro různé amplitudy vibrací. Modrou barvou je zobrazen naměřený průběh, červenou barvou simulovaný.



Obr. 7 Amplitudovo-frekvenční charakteristika 50mG



Obr. 8 Amplitudovo-frekvenční charakteristika 0,1G

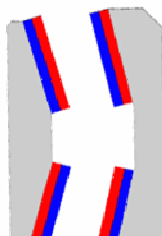
5. Montáž generátoru

5.1. Magnetický obvod

Magnetický obvod je tvořen sadou magnetů ze vzácných zemin NdFeB o rozměrech 5x10x2 mm a pólovými nástavci. Magnety jsou nalepeny sekundovým lepidlem na konce tvarovaných pólových nástavců vždy po 4ks tak, aby se přes pólové nástavce uzavíral magnetický tok a každý magnetický segment měl rozměr 20x10x2 mm.

Osvědčilo se nejprve slepit magnety za hrany do segmentů a až ty v celku nalepovat na pólové nástavce. Protože se magnety při lepení do segmentů vzájemně odpuzují, nejlepší bylo umístit je na list papíru položený na magneticky vodivém materiálu, kde přitažlivé magnetické síly způsobily tření výrazně omezující účinek odpudivých sil. Papír má za účel ochránit magnety před nežádoucím přilepením k podložce a je možné jej v případě přilepení k segmentu snadno odstranit.

Pólové nástavce jsou tvarovány vzhledem k rotačnímu pohybu páky kolem cívky.



Obr. 9 Schema magnetického budicího obvodu

5.2. Páka

Páka je tvořena ze dvou duralových částí, které do sebe zapadají přes drážky. Ve vnitřní části páky (Obr. 10) je nalisována kalená ocelová broušená a leštěná osa, sekundovým lepidlem přilepeny 2 magnety ze vzácných zemin NdFeB o rozměrech 20x6x2,3 mm a vnitřní část magnetického obvodu, vzhledem k velkým přitažlivým silám přilepeného metalickým epoxidovým lepidlem. Ke vnější části páky (Obr. 11) je přilepena vnější část magnetického obvodu metalickým epoxidovým lepidlem. Přesná poloha obou částí magnetického obvodu na páce byla vymezena za pomoci přesně přilepených plastových dorazů, které byly po vytvrzení epoxidového lepidla z páky odstraněny.

Obě části páky jsou spojeny jen přitažlivými silami magnetického obvodu (Obr. 12). Pro zamezení fyzického kontaktu magnetického obvodu s cívkou, čímž by došlo k jejímu poškození, je do drážky vnější části páky vlepena plastová podložka, která je zapilovaná na potřebný rozměr.



Obr. 10 Vnitřní část páky



Obr. 11 Vnější část páky



Obr. 12 Spojená páka

5.3. Cívka

U každého generátoru je cívka jedním z nejdůležitějších částí samotného generátoru - v jejích závitěch je při změně magnetického toku generován elektrický výkon.

U tohoto generátoru je cívka tvarovaná vzhledem k rotačnímu pohybu páky. Cívka je ručně navinuta z lakovaného měděného vodiče $\varnothing 50 \mu\text{m}$, má vnitřní odpor $R_c = 1672 \Omega$ a 2112 závitů. V průběhu vinutí byla cívka lakována polyuretanovým lakem, který po zaschnutí zachová požadovaný tvar cívky, poskytne závitům ochranu před mechanickým poškozením a funguje i jako dodatečná izolace. Vývody cívky jsou z lakovaného měděného vodiče $\varnothing 0,5 \text{ mm}$ a jsou vyvedeny na rám generátoru, kde jsou k nim připájeny cca 1 m dlouhé vodiče určené pro připojení měřicího zařízení či generátorem napájené soustavy.



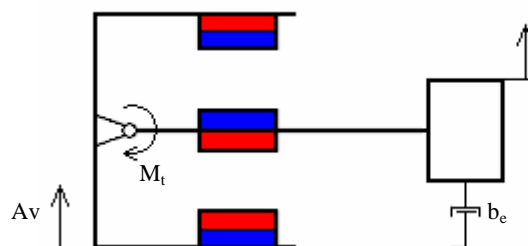
Obr. 13 Cívka

Z důvodu nepřesnosti při vyvrtání otvoru na osu do vnitřní části páky bylo potřeba kostru cívky zapilovat, aby se zamezilo kontaktu páky s cívkou. Pro usnadnění navíjení byly zabroušeny hrany na kostře cívky, o které se vodič při navíjení zachytával a trhal se.

5.4. Rezonanční mechanismus

Rezonanční mechanismus generátoru je tvořen sadou vzájemně se odpuzujících permanentních magnetů ze vzácných zemin nahrazujících pružiny, pákou s magnetickým obvodem, mechanickým tlumením v ložisku a tlumením způsobeným reakcí cívky. Požadavek na vlastní frekvenci rezonančního mechanismu tohoto generátoru je okolo 17Hz.

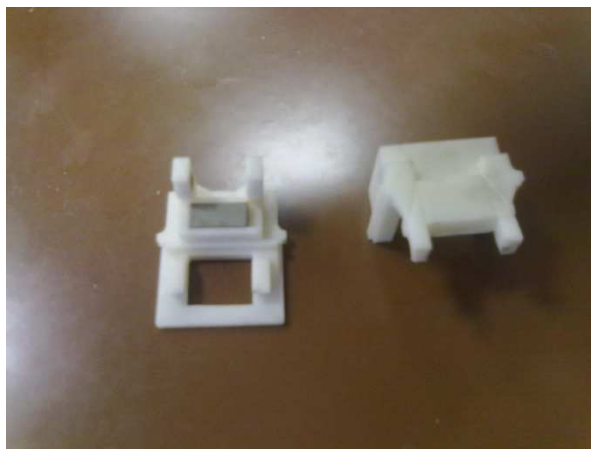
Po montáži generátoru byla na osciloskopu změřená vlastní frekvence $f_0 = 18,7\text{Hz}$. Frekvence byla snížena na $f_0 = 16,55\text{Hz}$ nalepením olověného závaží na vnější část páky.



Obr. 14 Schema rezonančního mechanismu

5.5. Rám

Rám je tvořen ze 3 částí, které po sestavení slouží pro ukotvení cívky, umístění magnetů nahrazujících pružiny rezonančního mechanismu a jako opora osy páky generátoru.



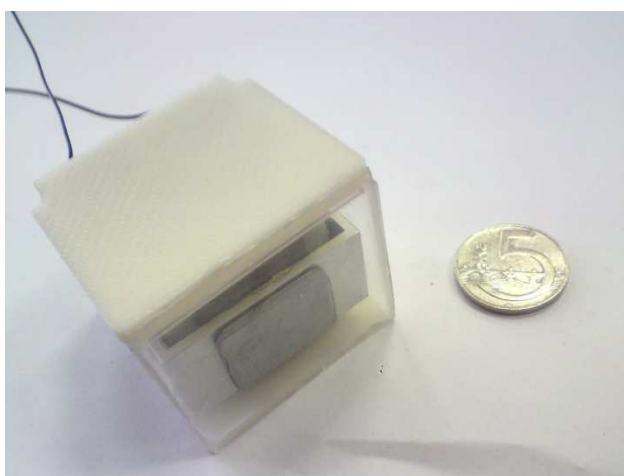
Obr. 15 Rozložený rám generátoru

Osa páky je uložena v pouzdech nalisovaných do rámu generátoru. Poloha v axiálním směru je vymezena pomocí sady distančních kroužků tak, aby nedocházelo ke kontaktu páky a magnetického obvodu s kostrou cívky.

Vlivem nepřesnosti výroby a montáže má páka v axiálním směru 2 krajní polohy s odlišnými vlastnostmi. V jedné je chod generátoru bezproblémový, v druhé je výrazně vyšší mechanické tření.

Úchyty kostry cívky bylo nutno, stejně jako kostru cívky, pro zamezení kontaktu s pákou na vnitřní straně zapilovat; pro umožnění umístění cívky s vývody bylo potřeba úchyty na horní části rámu generátoru zapilovat na vnější straně.

Na závěr byl na generátor umístěn průhledný plastový kryt, který jeho vnitřní prostor chrání před poškozením.



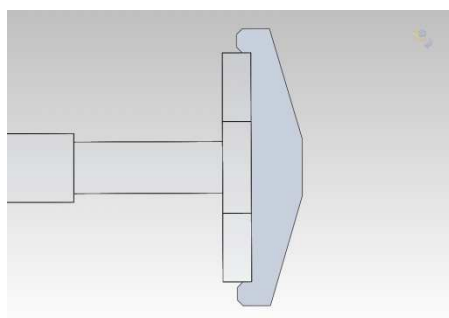
Obr. 16 Finální podoba generátoru

6. Konstrukční úpravy

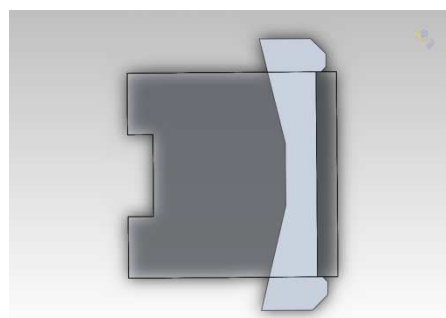
6.1. Konstrukční úpravy z hlediska montáže

6.1.1. Páka a magnetický obvod

Vzhledem k usnadnění přesného umístění obou částí magnetického obvodu na páku při lepení by bylo vhodné mít vystouplé vnější hrany pólových nástavců tak, aby mezi nimi vznikla “drážka“ do které by zapadala příslušná plocha části páky. Tím by bylo docíleno přesné umístění magnetického obvodu ve směru pohybu páky.

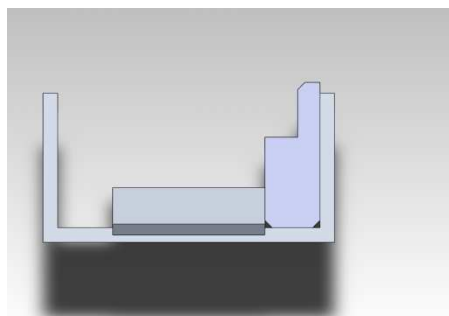


Obr. 17 Úprava vnitřního pólového nástavce

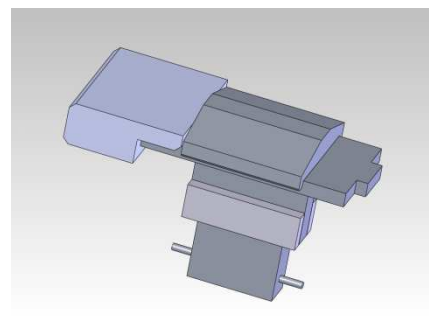


Obr. 18 Úprava vnějšího pólového nástavce

V axiálním směru se pro vymezení středové polohy na vnější části páky (Obr. 11) nabízí použití hranolů, které by přesnou pozici docílily vymezením vzdálenosti od bočnice páky. Na vnitřní části páky (Obr. 12) by přesnou pozici bylo možné zajistit pomocí pravoúhlého profilu, který by se opřel o boční hranu páky.

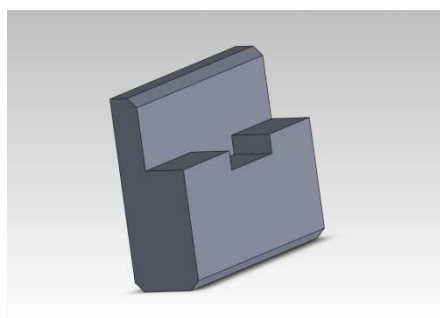


Obr. 19 Doraz vnější



Obr. 20 Doraz vnitřní

Oba dorazy by pro omezení počtu různých pomocných montážních dílů bylo možné vyrobit jako jeden kus.

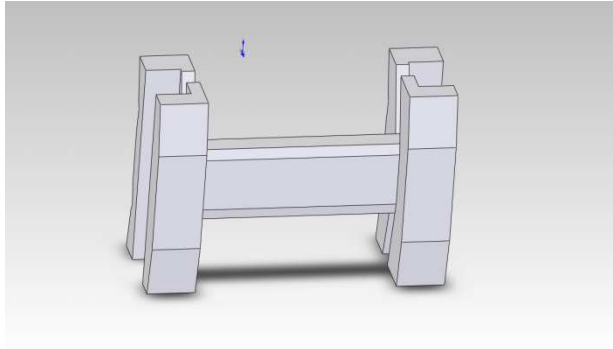


Obr. 21 Doraz

6.2. Konstrukční úpravy z hlediska funkce

6.2.1. Kostra cívky

Aby se odstranila potřeba zapilování bočnic kostry cívky při nepřesně vyvrtaném otvoru ve vnitřní části páky, stačilo by cívku rozšířit, či alespoň z vnitřní části omezit tloušťku bočnic, které by byly případným pilováním zeslabeny.

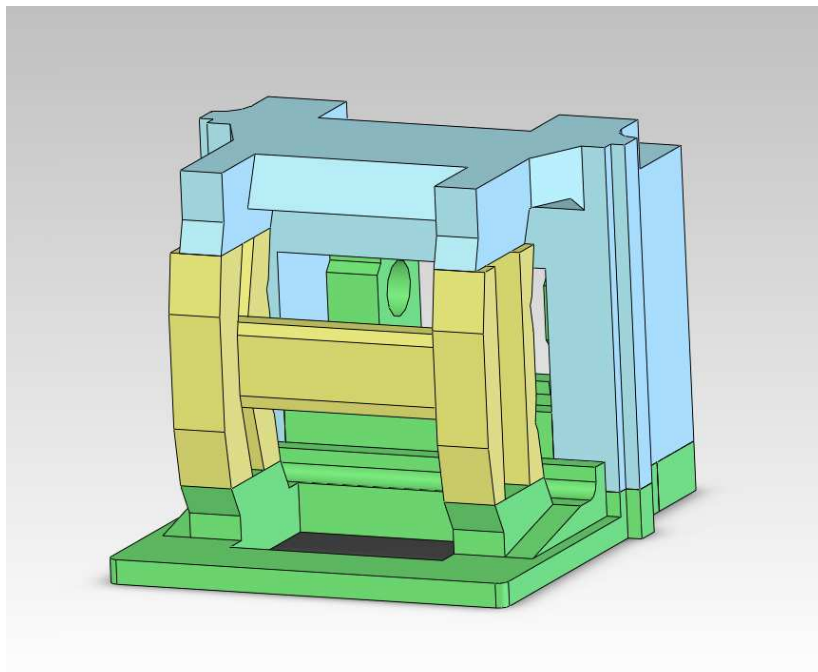


Obr. 22 Úprava kostry cívky

6.2.2. Rám

U rámu se pro funkčnost generátoru problematickými ukázaly úchyty cívky. Aby nebylo potřeba je zapilovat, bylo by vhodné jejich vnitřní rozteč uzpůsobit upravené kostře cívky.

Aby se nemusely pilovat vnější strany úchytů horní části rámu, stačilo by je z vnější části oproti kostře cívky zúžit, čímž by se uvolnil prostor pro vývody.



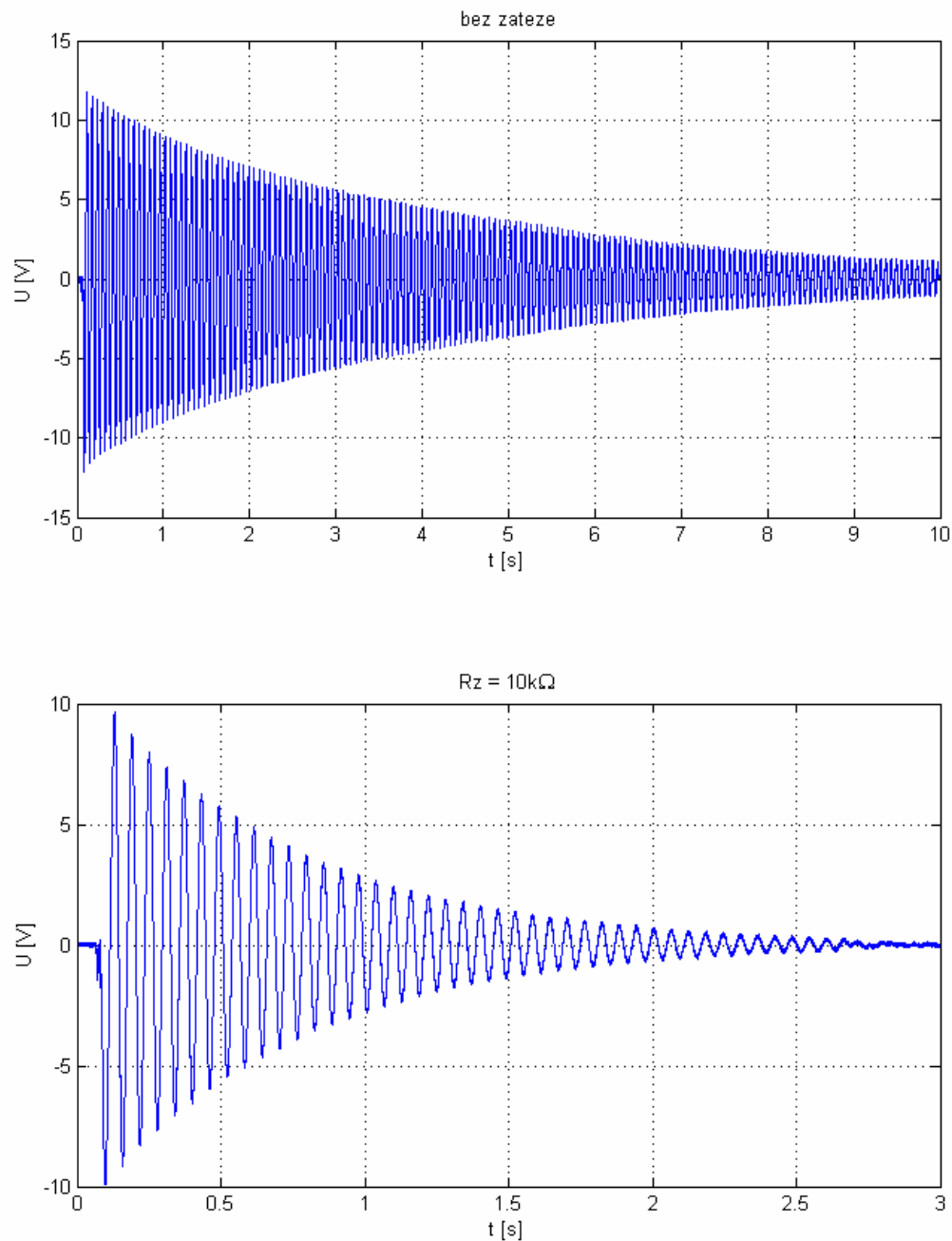
Obr. 23 Úprava rámu generátoru

7. Výsledky testování generátoru

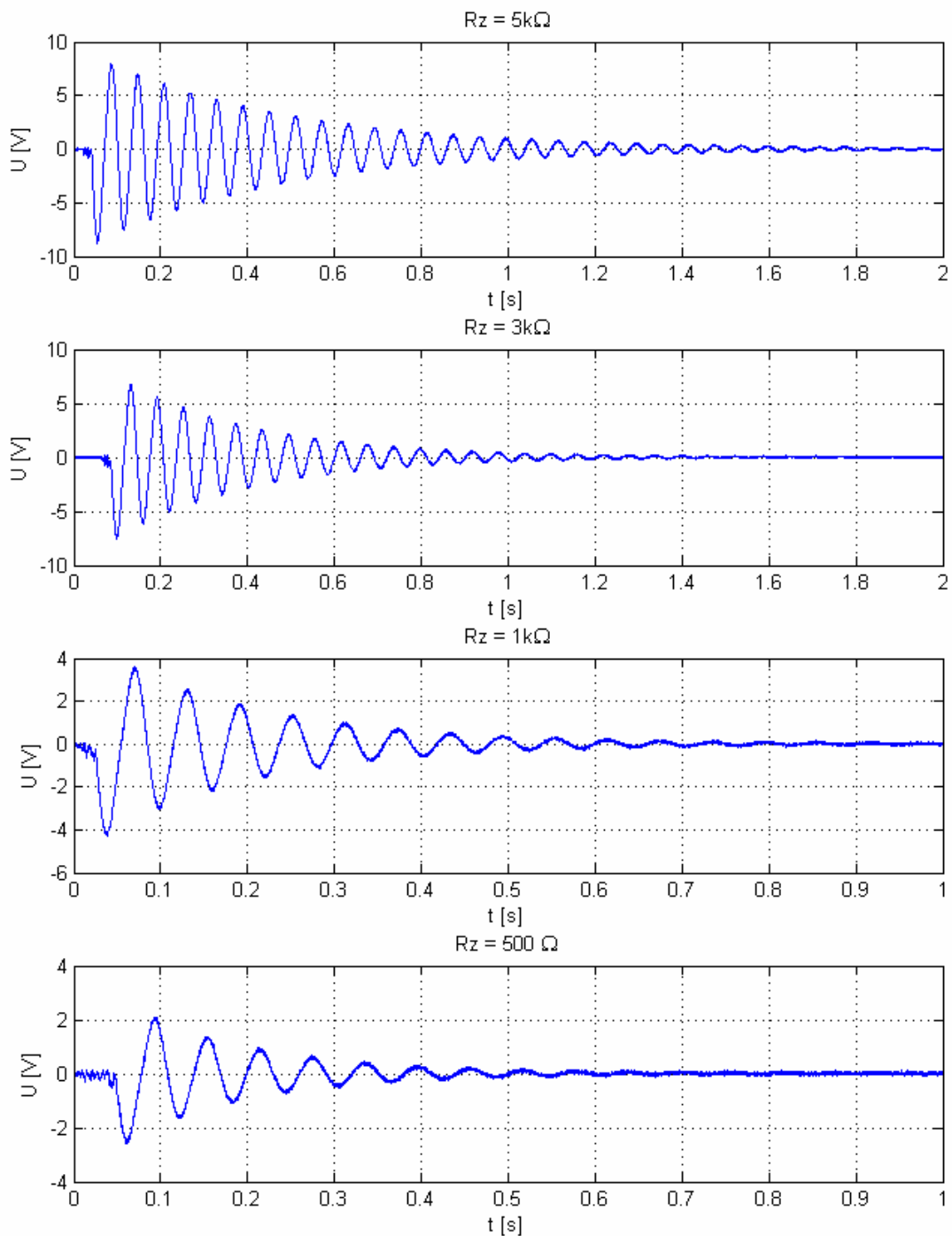
7.1. Odezva generátoru na počáteční výchylku

Toto měření proběhlo tak, že vibrační generátor byl připojen k odporové dekádě nahrazující zátěž a k osciloskopu, na kterém je sledován průběh napětí. U všech měření byla páka vychylována o 2 mm, což odpovídá počáteční úhlové výchylce $2,76^\circ$.

Z výsledků tohoto měření je možné určit parametry mechanického tlumení, resp. quality faktoru, a ověřit správnost numerických výsledků.



Obr. 24 Odezvy na počáteční výchylku 1



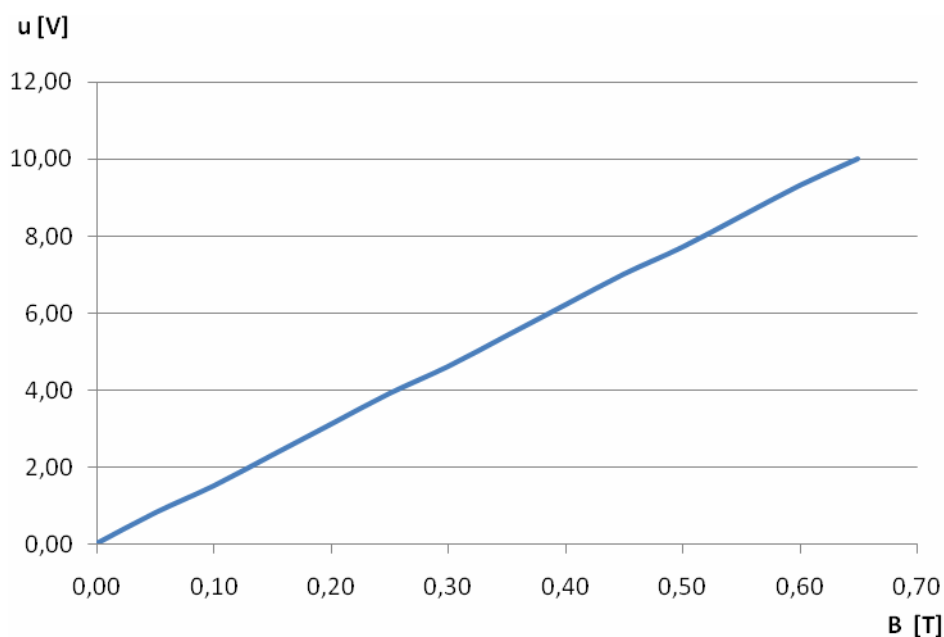
Obr. 25 Odezvy na počáteční výchylku 2

Z grafů je patrný velký vliv připojené zátěže na generátor. S menší zátěží je menší amplituda generovaného napětí a výrazně kratší doba kmitání páky. Velikost elektromagnetického tlumení je nepřímo úměrná velikosti připojené zátěže.

Porovnáním simulovaných a naměřených průběhů jsem při změně jednotlivých konstant generátoru mohl určit hodnotu quality faktoru v závislosti na připojené zátěži. Quality faktor v modelu spojuje vliv elektromagnetického i mechanického tlumení, proto je jeho hodnota u malých elektrických zátěží velmi malá. Magnetická indukce je v numerickém modelu považována za konstantní po ploše vzduchové mezery, ale u reálného generátoru tomu tak není. Navíc je vlivem gravitace rovnovážná poloha páky vychýlena od pomyslné roviny spojující osu rotace a střed cívky, kvůli čemuž dochází k různě velké amplitudě pohybu páky kolem závitů horní a dolní poloviny cívky. Pokud byla magnetická indukce brána za konstantní, pro různé zátěže neodpovídaly hodnoty indukovaného napětí. Z toho důvodu je pro různou amplitudu pohybu páky různá průměrná hodnota magnetické indukce v Tab.1. Na grafu na Obr. 26 je zobrazena závislost magnetické indukce na naměřené amplitudě indukovaného napětí. Amplitudu indukovaného napětí ovlivňuje také rychlost pohybu magnetického budícího obvodu a konstanta tvořená parametry cívky, tedy aktivní délkou závitu a počtem závitů.

Rz	Ω	500	1 000	3 000	5 000	10 000	1 000 000
B	T	0,17	0,3	0,5	0,6	0,68	0,75
Q	-	9	19	100	150	180	250

Tab. 1

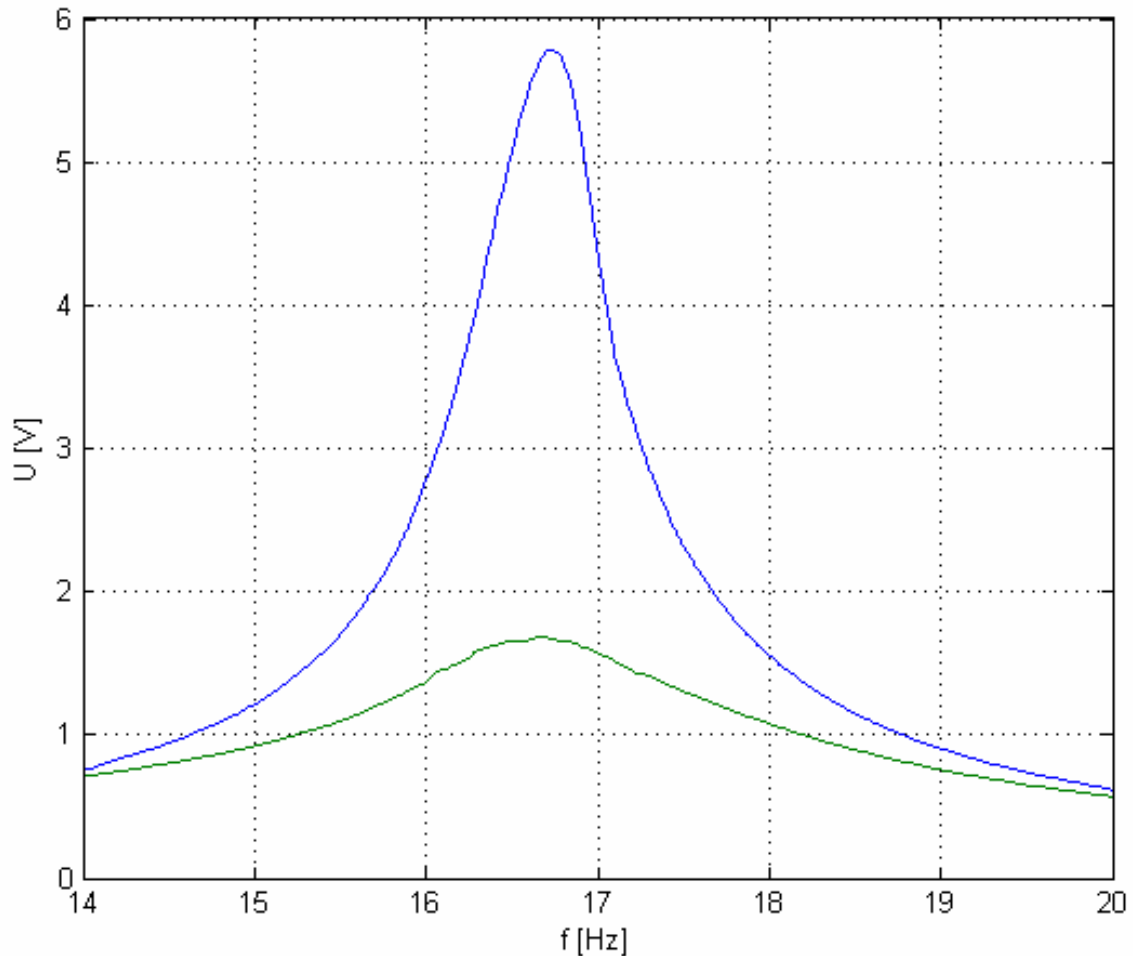


Obr. 26 Závislost indukovaného napětí na magnetické indukci

7.2. Měření na vibrační stolici

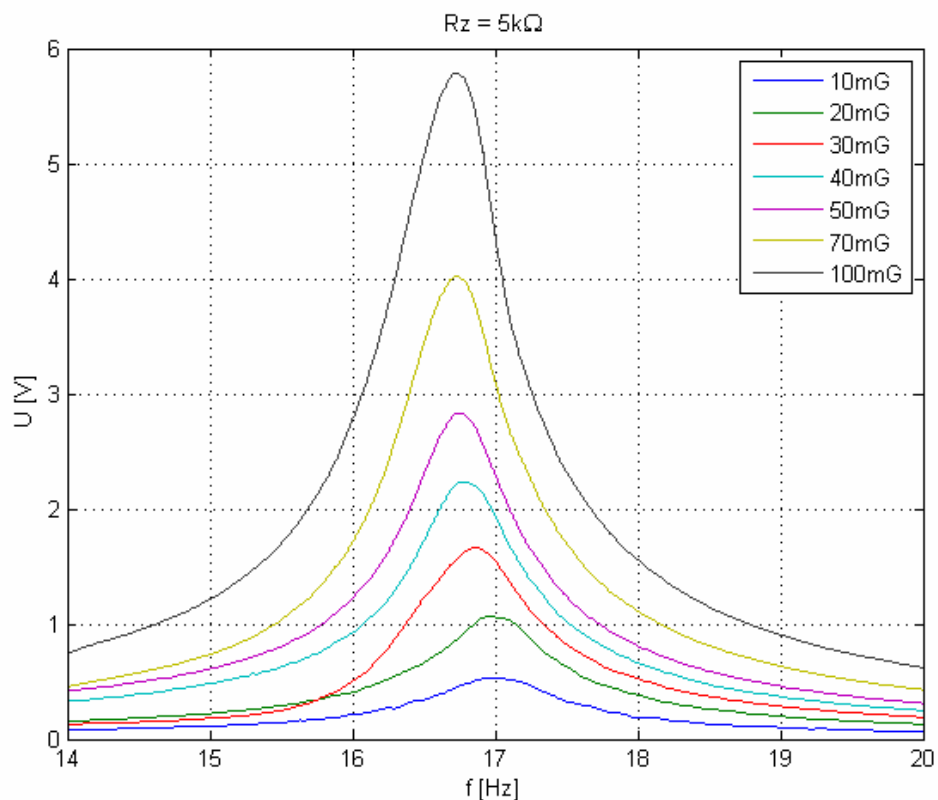
Generátor byl upevněn na vibrační stolici v laboratoři ÚMTMB a buzen ve frekvenčním pásmu 14-20Hz, přičemž byla přejížděna oblast rezonanční frekvence.

Při měření amplitudovo-frekvenční charakteristiky bez připojené zátěže vlivem nepřesné výroby a montáže páky generátoru sklouzávala do polohy s vysokým mechanickým třením, což vedlo k velkému ztlumení pohybu páky a nemožnosti získat použitelná data.



Obr. 27 Amplitudovo-frekvenční charakteristika - porovnání krajních poloh páky

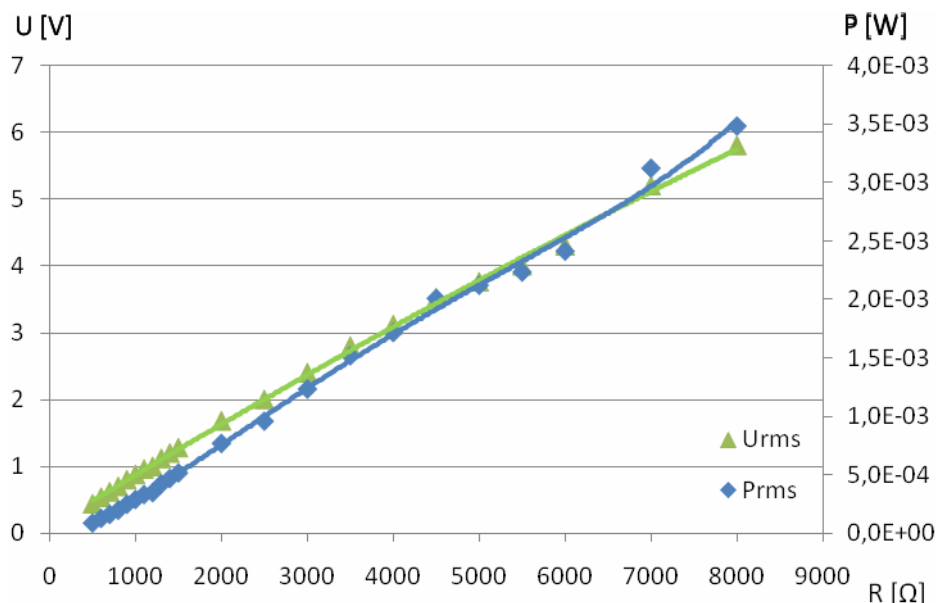
Při měření s připojenou zátěží $R_z = 5k\Omega$ bylo možné amplitudovo-frekvenční charakteristiku měřit až do vibrací s amplitudou $0,1G$. Při vyšších vibracích opět docházelo k častému sklouznutí páky do provozně nevhodné polohy. Z grafu na Obr. 27 je patrný velký rozdíl ve výstupním napětí, a tudíž i v rychlosti pohybu a amplitudě natočení páky, při vibracích o amplitudě $0,1G$.



Obr. 28 Amplitudovo-frekvenční charakteristika pro různé amplitudy buzení

Jak je vidět z grafu na Obr. 28, využitelné rezonanční pásmo generátoru se mění s intenzitou vibrací a rezonanční frekvence tohoto generátoru se pohybuje mezi 16,5 - 17 Hz. To je způsobeno nelinearitou v tuhosti odpuzujících-se permanentních magnetů.

Dále byla při konstantní amplitudě vibrací v rezonančním pásmu měřena výkonová charakteristika generátoru. Připojená zátěž byla měněna na odporové dekádě a v ustáleném stavu zapsána efektivní hodnota napětí, ze které byla později vypočtena hodnota výkonu. Ze závislosti efektivní hodnoty napětí a výkonu na připojené zátěži lze předpokládat, že maximální generovaný výkon je při vyšší zátěži, než k jaké bylo možno se dostat z důvodu funkčního omezení způsobeného sklouzáváním páky do provozně nevhodné polohy.



Obr. 29 Výkonová charakteristika

8. Závěr

Cílem této práce bylo v první řadě provést montáž vibračního elektromagnetického generátoru vyrobeného podle dříve vytvořeného návrhu. To se podařilo, ale vzhledem k rozdílným parametrům v krajních polohách páky v axiálním směru se objevily velké rozdílnosti při měření. V některých případech nebylo možné měření úspěšně provést z důvodu velkého tlumení způsobeného mechanickým třením v jedné z krajních poloh.

Parametry získané měřením na vibrační stoličce prokázaly, že toto konstrukční řešení vibračního generátoru je schopno při vibracích o amplitudě zrychlení 0,1G dodávat elektrické napětí s efektivní hodnotou až 5,5V a výkon 3,5mW. Pokud by páka generátoru nesklouzávala do provozně nevýhodné polohy, pravděpodobně by generovaný výkon byl výrazně vyšší.

U numerického modelu popisujícího chování generátoru se jako největší problém ukázala nelineárnost mechanického tlumení a magnetické indukce. Pro lepší model by bylo třeba provést komplexnější měření obou parametrů. Pokud se vstupní parametry měnily v závislosti na velikosti připojené zátěže, numerický model se s odezvou reálného generátoru shodoval.

Podle mého mínění byly cíle práce splněny, jednotlivé části práce dospěly k požadovaným výsledkům a i přes omezení způsobené nepřesnou montáží se podařilo generátor otestovat a změřit parametry pro menší amplitudu vibrací a menší připojenou zátěž.

9. Seznam použitých zdrojů

- [1] Hadaš, Z.: *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.
- [2] Priya S, Inman DJ: *Energy Harvesting Technologies*. Springer US, 2009.
- [3] Brepta a kol.: *Mechanické kmitání*, Sobotáles, Praha, 1994.
- [4] Měřička, J., Zoubek, Z.: *Obecná teorie elektrického stroje*, SNTL, Praha, 1973.
- [5] Kurfürst, J.: *Optimalizace vibračního mikrogenerátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [6] *Dynamika* [online]. 2006 [cit. 2011-05-14]. Mechanika těles - dynamika. Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/index.html>>.
- [7] Beeby S. P. et al.: *A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting* Journal of Micromechanics and Microengineering 17 1257–65. Dostupný z WWW: <http://eprints.ecs.soton.ac.uk/14798/1/jmm7_7_007_-_microgenerator.pdf>
- [8] Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Optimal Design of Vibration Power Generator for Low Frequency. *Solid State Phenomena*, 2009, roč. 2009, č. 147-149, s. 426-431. ISSN: 1012-0394.
- [9] Hadaš, Z., Ondrůšek, Č., Singule, V.: Power sensitivity of vibration energy harvester. *Microsystem Technologies*, 2010, roč. 16, č. 5, s. 691-702. ISSN: 0946- 7076.
- [10] Hadaš, Z., Zouhar, J., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Design of Energy Harvesting Generator Base on Rapid Prototyping Parts. In *2008 13th Power Electronics and Motion Control Conference*. 1. Poznan, Poland: 2008. s. 1688-1692. ISBN: 978-1-4244-1741-4.

10. Seznam příloh

Přílohy jsou umístěny na přiloženém CD. Jedná se o následující soubory:

- Elektronická verze této práce
- Numerický model vibračního generátoru v prostředí MATLAB Simulink vč. potřebných parametrů
- Naměřené a simulované odezvy generátoru
- Upravený model generátoru v SolidWorks