



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

NÁVRH KONSTRUKCE ELEKTROMAGNETICKÉ ČÁSTI VIBRAČNÍHO GENERÁTORU PRO NÍZKÉ FREKVENCE VIBRACÍ

DESIGN OF ELECTROMAGNETIC PART OF VIBRATION POWER GENERATOR FOR LOW
FREQUENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LIBOR KONRÁD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK HADAŠ, PH.D.

BRNO 2008

Anotace

Práce se zabývá současným stavem vibračních generátorů založených na elektromagnetickém principu a nejvhodnějším konstrukčním řešením elektromagnetické části generátoru.

Praktickou částí je nalezení vhodného řešení konstrukce elektromagnetické části vibračního generátoru s ohledem na požadovaný výkon. Řešení je provedeno pomocí simulačního modelování. Vibrační generátor pracuje ve frekvenční oblasti 17Hz. Výsledný návrh musí splňovat požadavky dodržení frekvenční oblasti, minimálního výkonu 5mW a jednoduché výroby.

Práce obsahuje jak simulační model tak i návrh konečné podoby upraveného generátoru.

Annotation

The project deals with contemporary position of vibratory generators based on electromagnetic principle and optimal constructional solving of electromagnetic part of generator.

Practical part is searching for suitable solving of construction of electromagnetic part of vibratory generator in the light of required power. Solving is brought to effect by the simulator simulation. Vibratory generator works in frequency range 17Hz.

Final suggestion has to answer requirements of observance of frequency ranges, minimal power and simple production. Project includes simulation model as well as proposal of final form of modified generator.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Analýza současného stavu	9
3	Varianty elektromagnetické části vibračního generátoru	13
3.1	Konstrukce elektromagnetické části generátoru	13
3.2	Vhodná varianta elektromagnetické části generátoru	15
4	Návrh parametrů elektromagnetické části generátoru	17
4.1	Mechatronický model vibračního generátoru	17
4.1.1	Model rezonační části generátoru	17
4.1.2	Model elektromagnetické části generátoru	18
4.1.3	Elektrická část generátoru.....	23
4.2	Simulační modelování	24
4.2.1	Simulace magnetického obvodu	24
4.2.2	Simulační modelování	25
4.2.3	Simulační návrh parametrů elektromagnetické části generátoru	29
5	Návrh konstrukce elektromagnetické části generátoru	35
5.1	Návrh konstrukce magnetického obvodu	35
5.1.1	Magnetický obvod	35
5.1.2	Model magnetického obvodu pomocí systému CAD.....	36
5.2	Návrh konstrukce cívky	36
5.2.1	Výroba cívky.....	36
5.2.2	Návrh modelu cívky.....	37
5.3	Návrh konstrukce ramene páky generátoru	38
5.4	Konstrukce vibračního generátoru	39
6	Závěr	41

1 Úvod

Oblasti použití bezdrátových technologií se v současné době čím dál více rozšiřuje. Jedná se většinou o senzorické systémy, které monitorují různé parametry zařízení. Mohou to být obráběcí stroje, letadla, dopravní stroje, atd. Většina senzorů je umístěna v místech se špatnou přístupností a vzniká problém z napájením daných zařízení. Zařízení mohou být napájeny přímo ze sítě, ovšem to je ovlivněno vzdáleností, dále je mohou napájet baterie nebo všude přítomná energie. Může se jednat o energii slunečního záření, tepelnou anebo energii z okolních vibrací. Ve světě je tento druh způsobů získávání energie označován jako Energy harvesting nebo Energy scavenging. Jedná se poměrně o novou technologii a ve spustě zemích se tímto problémem zabývají, zejména na západě.

U většiny strojů a zařízení se vyskytují vibrace a to buď v mikro nebo v makro měřítku. Zařízení, které dokážou přeměnit vibrace na elektrickou energii se nazývají generátory. Mohou pracovat na piezoelektrickém principu, dále na elektrostatickém nebo na elektromagnetickém.

Generátory, které dosahují nejvyšších výkonů (v řádech mW) jsou generátory elektromagnetické. Ostatní typy vibračních generátorů dosahují podstatně menších hodnot (nW a μ W).

Problémem všech generátorů je způsob přeměny z mechanické energie na energii elektrickou.

Tato práce je zaměřena návrh vhodné konstrukce elektromagnetické části vibračního generátoru s ohledem na požadovaný výkon a rezonační frekvenci. Návrh je proveden pomocí simulačního modelování v několika programech. Výsledkem je kompletní návrh elektromagnetické části vibračního generátoru.

2 Analýza současného stavu

V současné době existuje již několik institucí, které se zabývají jak vývojem tak i výrobou vibračních generátorů a poptávka po nich stále stoupá. Je to způsobeno, užíváním velkého počtu senzorických systémů, které jsou na velmi špatně dostupných místech. Tak vzniká problém s jejich napájením, protože bateriové články mají omezenou životnost. Vhodnou náhradou jsou proto generátory elektrické energie založené na vibracích, které se vyskytují ve všech zařízeních. Pokud nastává problém s napájením elektroniky a zařízení, kde se elektronika vyskytuje je zdrojem vibrací je vhodné použít tyto vibrační generátory jako náhradu baterií.

Největším zdrojem informací je v současné době internet, kde lze nalézt obrovské množství odkazů na tuto problematiku. Institucí, které vyrábějí generátory na elektromagnetickém principu, ale stále moc není. Jedná se zejména o firmy, které v této technologii vidí budoucnost nebo univerzitní instituce.

Velkou společností s vlastní výrobou je anglická společnost PGM Perpetuum, která převzala koncept na vibrační generátory z univerzity Southampton. Na Obr. 1 je uvedena tabulka parametrů jednoho z vyráběných vibračních generátorů. Generátory pracují do frekvence 100Hz a jsou schopny vygenerovat výkon při největších vibracích okolo 100mW.

OPERATING CONDITIONS

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Frequency Band Centre		17.2	Hz
Operating temperature range		10 to 30	°C
Vibration magnitude within frequency band		25 to 100	mg _{RMS}
Output DC Voltage		0 to 7.5	V
Capacitor energy storage operating range		4 to 5	V

Obr. 1 Charakteristika vibračního generátoru společnosti Perpetuum

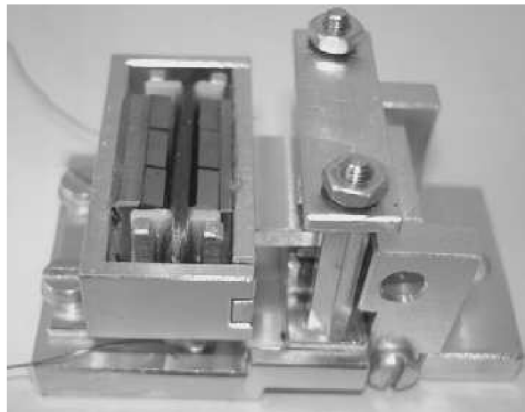
Další společností je Ferro Solutions, která vyrábí vibrační generátory pro bezdrátové sítě. Společnost nabízí okolo dvou až tří typů generátorů. Na Obr.2 je uveden jeden z nich včetně výstupních parametrů.



POWER OUTPUT @ 60 HZ (raw AC from generator)		
Acceleration	25 milli-g	0.8 mW
	50 milli-g	3.1 mW
	100 milli-g	10.8 mW

Obr. 2 Generátor společnosti Ferro Solutions

Na VUT v Brně Fakulty strojní jsou vyvíjeny vibrační generátory, které pracují ve dvou oblastech pracovní frekvence. Na Obr. 3 je zobrazen první vytvořený generátor, který pracuje na frekvenci 34 Hz a jeho výstupní výkon se pohybuje okolo 5 až 10 mW. Model tohoto generátoru byl dále upraven na nižší frekvenci. Na Obr. 4 je vibrační generátor, který pracuje na frekvenci 17 Hz a výstupní výkon je okolo 20 mW při vibracích 0,3G.

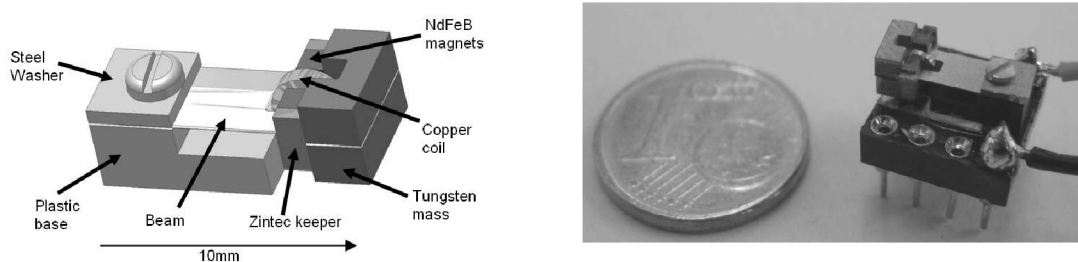


Obr. 3 Skutečný generátor VUT na 34 Hz

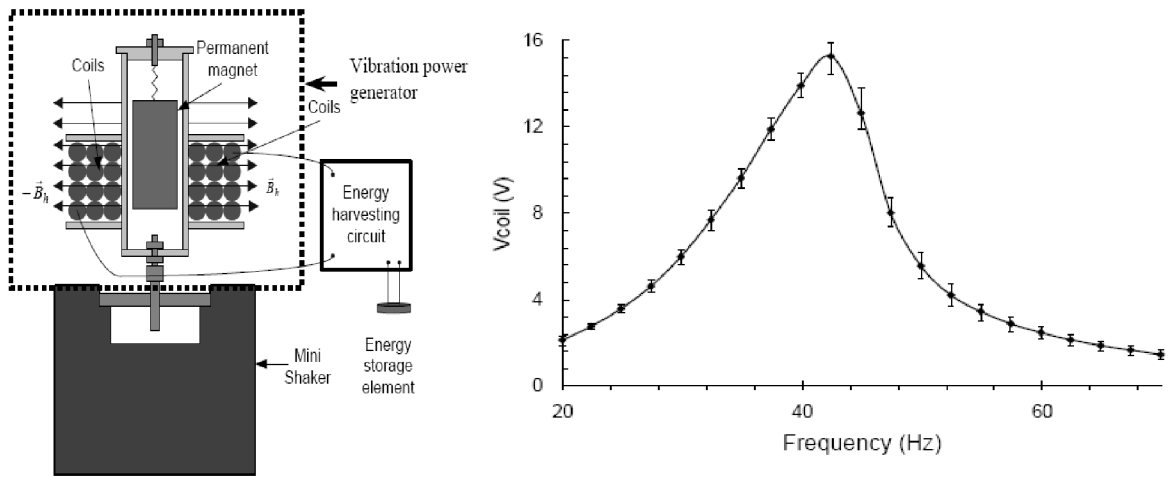


Obr. 4 Skutečný generátor VUT na 17 Hz

Na několika dalších internetových stránkách byly nalezeny odkazy na několik dalších konstrukcí vibračních generátorů. Nejedná se o žádné společnosti, ale jde jen o testování různých konstrukcí s poměrně slušným výkonem.



Obr. 5 a) Model vibračního generátoru b) Reálné provedení



Obr. 6 a) Model vibračního generátoru b) Amplitudo-frekvenční charakteristika

3 Varianty elektromagnetické části vibračního generátoru

Konstrukci elektromagnetické části vibračního generátoru ovlivňuje několik parametrů. Vstupními parametry jsou budící (rezonační frekvence) a amplituda budících vibrací. Výstupními parametry jsou výkon a napětí generátoru. Soustavu také ovlivňuje teplota prostředí, která má vliv odmagnetování generátoru. V neposlední řadě velikost a hmotnost generátoru.

Při návrhu je potřeba vědět zda v prostředí, kde má generátor pracovat jsou vibrace v jednom nebo ve více směrech. Pro jednoduchost se uvažuje, že vibrace působí právě jen jedním směrem, ale při návrhu konstrukce je potřeba překontrolovat zda vibrace v jiném směru neovlivní funkci generátoru.

3.1 Konstrukce elektromagnetické části generátoru

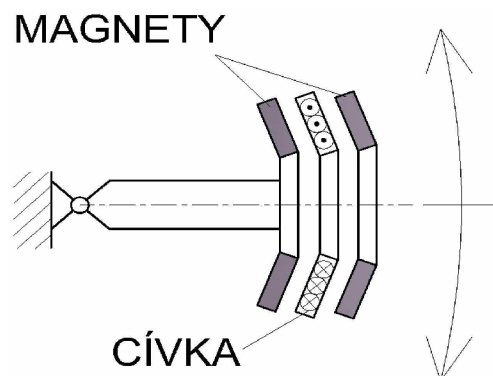
Konstrukce elektromagnetické části generátoru je složena z magnetického obvodu a cívky. Magnetický obvod slouží jako budící obvod a cívka k indukovaní elektromotorického napětí. Výstupní výkon generátoru závisí na připojené zátěži.

Konstrukce je takto složena ze dvou částí. Jedna se pohyblivá a jedna je vždy pevně uchycená k rámu. Parametr, který podstatně ovlivňuje konstrukci je amplituda budících vibrací. S rostoucí amplitudou roste i výchylka pohyblivé části generátoru. Konstrukce se takto stává rozměrnější a těžší. Pro malé výchylky okolo $\pm 3^\circ$ není potřeba se tímto problémem zabývat. Ovšem při výchylce okolo $\pm 10^\circ$ má tento parametr podstatný vliv na konstrukci. S rostoucí výchylkou roste i výkon generátoru.

Ve většině konstrukce se uvažuje, že pohyblivou část tvoří magnetický obvod a pevnou část cívka. V opačném případě musí být vývody cívky složitě vyvedeny z generátoru.

Pro nízké frekvence je možné použít několik variant konstrukcí. Schémata nejvíce používaných elektromagnetických částí generátoru jsou uvedeny dále v textu.

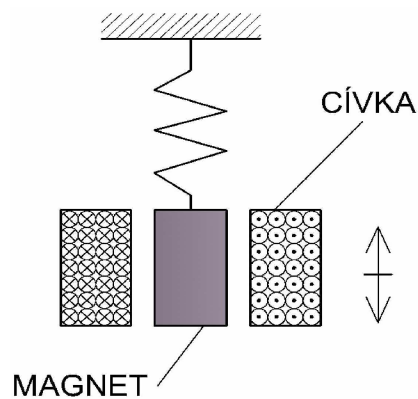
Na Obr. 7 je model elektromagnetické části, který je používán v generátorech vyráběných na VUT. Pevnou část tvoří cívka, která je navinuta jakoby na části oblouku, a kolem ní kmitá těleso s natočenými magnety.



Obr. 7 Elektromagnetická část vibračního generátoru používaná na VUT

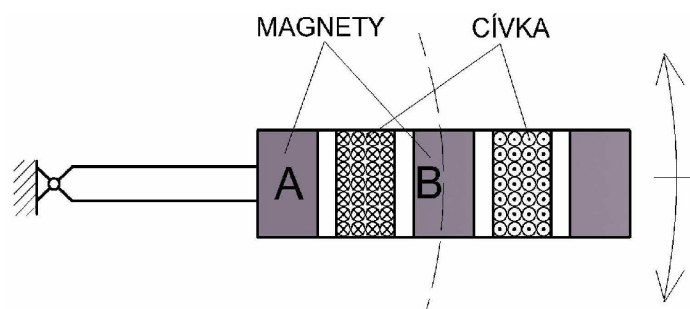
Výhodou je malý objem generátoru. Nevýhodou je měnící se vzduchová mezera a použití jen pro malé výchylky. Při větších výchylkách může dojít k dotyku tělesa s magnety s cívkou. Tento problém je možné odstranit zvětšením vzduchové mezery, ale tím poklesne magnetická indukce mezi magnety a tím k snížení výkonu. Jedinou možností je tedy zvětšení šířky magnetů. Další nevýhodou je složitost vyráběné cívky. Drát je vinut na obloukovou konstrukci a to znamená, že vodič je vinut jakoby zleva doprava pod úhlem což vede k velké komplikaci a k ručnímu vinutí. Odstranění tohoto problému je vinout cívkou na přímou konstrukci, po navinutí ji ohnout do požadovaného tvaru a pak ji zpevnit vhodným tužidlem. Může nastat, ale problém, že při ohýbaní začnou být některé vodiče cívky natahovány, což může způsobit jejich přetrhnutí.

Obr. 8 ukazuje zcela jiný princip. Cívka je navinutá jako dutý válec do kterého se vsunuje magnet umístěný na pružině. Konstrukce je velmi jednoduchá a vhodnou volbou velikosti magnetu a cívky lze dosáhnout velkého výkonu. Problémem je, že pružina nekmitá jen ve svislém směru ale může se rozkmitat do boku, což by způsobilo kontakt magnetu a cívky a snížení účinnosti. Pružný člen je dále ovlivněn jeho životností.



Obr. 8 Pohyblivý člen s kmitáním v ose cívky

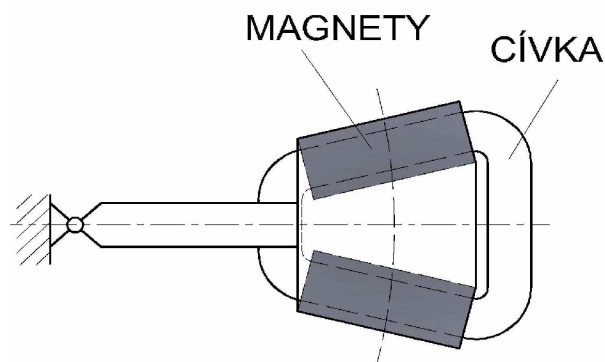
Na Obr. 9 je elektromagnetická část generátoru, která je podobná předchozí konstrukci, ovšem magnetický obvod nekmitá na pružině, nýbrž na rameni. Magnetický obvod je složen ze dvou magnetů. Magnet A má tvar mezikruží a magnet B je válec. Pokud oba magnety spojíme dostaneme magnetický obvod s velkým magnetickým tokem. Aby byl tok dostatečný je potřeba vytvořit malou vzduchovou mezery. Velikost mezery přímo ovlivňuje velikost natočení. Tento model je proto vhodný pro malé výchylky.



Obr. 9 Pohyblivý člen na rameni

Na Obr. 10 je podobá modelu na Obr. 7. Rozdíl je v tom, že magnetický obvod je pootočen o 90°. Magnetický obvod tvoří pohyblivou část, která koná částečný pohyb po kružnici. Lichoběžníkový tvar obvodu je z důvodu, aby při pohybu jeden magnetů nezasahoval do druhé poloviny cívky a také proto, že při této konstrukci je magnetický tok přes cívku největší během celého pohybu. Nevýhodou je, vektor rychlosti je kolmý na cívku jen v nulové poloze. Při natáčení se rychlost snižuje. Pokud je pohyb uvažován při malých výchylkách, lze tuto změnu zanedbat a považovat rychlost za neměnní se.

Konstrukce má výhodu, že cívka je snadno vyrobitelná, nemusí mít žádnou kostru, protože může být zalita ve formě destičky a jako tenký plátek vložen do vzduchové mezery. Což znamená, že i vzduchová mezera se může zmenšit.



Obr. 10 Nová koncepce elektromagnetické části

3.2 Vhodná varianta elektromagnetické části generátoru

Jako nejvhodnější konstrukce pro návrh elektromagnetické části se zdá varianta na Obr. 10. Tento model bude tedy dále podrobně rozebrán a pomocí simulačního modelování budou pro něj navrženy parametry, které budou zaručovat hodnotu výstupního výkonu vyšší než 5mW, navrhnutá konstrukce nesmí ovlivnit rezonační obvod a také musí být zachován moment setrvačnosti páky generátoru.

4 Návrh parametrů elektromagnetické části generátoru

Cílem práce je navrhnout budicí obvod tak, aby zachovával předem stanovené parametry generátoru. Parametr, který musí být zachován je moment setrvačnosti, který ovlivňuje pracovní rezonanční frekvenci, na kterou je generátor naladěn.

Návrh generátoru je ovlivněn několika vstupními parametry, kterými jsou amplituda a frekvence vibrací a dále teplota okolního prostředí, která má vliv na odmagnetování magnetického obvodu. Výstupní hodnotou generátoru musí být jeho požadovaný výkon a napětí.

Správný návrh budicího obvodu má vliv na celou soustavu generátoru. Proto je potřeba zvolit vhodný postup k dosažení nejpříjemnějších podmínek. Jako první musí být stanoven model problému, tj. pohybová rovnice, dále přibližný návrh konstrukce budicího obvodu, model magnetické části a všechny tyto získané poznatky otestovat pomocí vhodného simulačního softwaru.

Během návrhu a simulačního modelování musíme brát ohled na tyto vstupní parametry a požadavky:

- budicí (rezonanční) frekvence: 17 Hz
- amplituda budících vibrací: (0,1 až 1,0)G
- maximální výchylka páky: (-10 až +10) stupňů
- požadovaný výkon vibračního generátoru: min. 5mW

4.1 Mechatronický model vibračního generátoru

Elektromagnetický vibrační generátor je obecně tvořen následujícími částmi:

- *rezonační obvod*: slouží k nastavení generátoru do rezonační oblasti
- *budicí obvod*: obsahuje nejčastěji soustavu magnetů, k vytvoření magnetického pole
- *cívka*: pracuje jako zdroj elektrické energie
- *elektrická zátěž*: ovlivňuje výstupní výkon

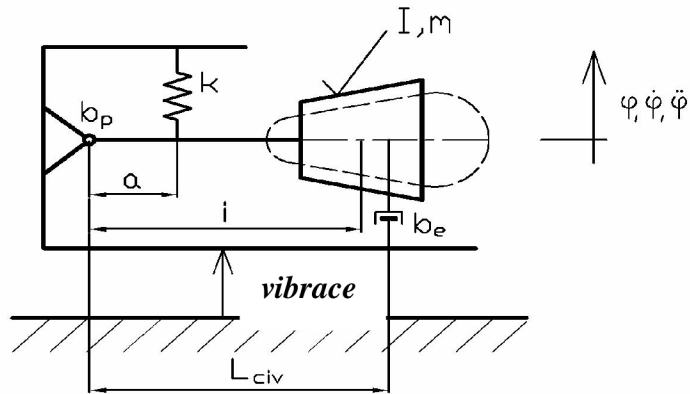
Cílem práce je návrh nového elektromagnetického část generátoru neboli také budicí obvod, který bude schopen vytvořit takové výstupní parametry jako předchozí verze generátoru. Aby bylo možné optimálně navrhnout tuto část generátoru je potřeba provést analýzu jeho činnosti.

4.1.1 Model rezonační části generátoru

Matematický popis budicího obvodu generátorů lze nalézt ve spoustě publikací a internetových odkazech. Výstupem tohoto modelu je pohybová rovnice, která dostatečně popisuje pohyb ramene páky generátoru. Z důvodu vytvoření vlastní návrhové koncepce elektromagnetické části generátoru bude provedeno odvození pohybové rovnice pro tento případ.

Schéma vlastního návrhu generátoru je na obr.10 kde těleso m je zavěšeno pomocí rotační vazby mezi magnetickým pružným členem o známé tuhosti. Jde o mechanický

oscilátor s jedním stupněm volnosti. Dále se jedná o soustavu s vynuceným kmitáním a vlastním tlumením. Tlumení se skládá z mechanického tlumení, které vzniká v ose otáčení a tlumení elektrické, které vzniká od magnetické síly cívky.



Obr. 10 CAD model navrhnutého magnetického obvodu

4.1.2 Model elektromagnetické části generátoru

Řešení bude uvažováno jen pro malé výchylky a ustálený stav v nulové poloze, čímž se nemusí uvažovat změna potenciální energie tělesa. Dále bude uvažována lineární tuhost, lineární mechanické tlumení a závislost elektrického tlumení na budících vibracích.

Pohybovou rovnici soustavy budeme řešena pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu (ODE2).

V řešení bude uvažováno, že se soustava nachází v rezonanci. K sestavení budeme přistupovat pomocí zobecněných souřadnic (2) a výsledná rovnice dle zobecněných souřadnic by měla být ve tvaru rovnice (1).

$$m^* \ddot{q} + b^* \dot{q} + k^* q = Q^* \quad (1)$$

kde:

m^* ...zobecněná hmotnost

b^* ...zobecněné tlumení

k^* ...zobecněná tuhost

Q^* ...kinematické buzení

Zobecněné souřadnice:

$$\begin{aligned} \varphi &= q \\ \dot{\varphi} &= \dot{q} \end{aligned} \quad (2)$$

Kinetická energie:

$$E_k = \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} m^* \dot{q}^2 = \frac{1}{2} I \dot{q}^2 \quad (3)$$

Potenciální energie:

$$E_p = \frac{1}{2} k (a\varphi^2) = \frac{1}{2} k^* q^2 = \frac{1}{2} k q^2 \quad (4)$$

Zatlumená energie elektrické části:

$$E_b = \frac{1}{2} b_e (L^2 \dot{\varphi}^2) = \frac{1}{2} b^* \dot{q}^2 = \frac{1}{2} b_e (L^2 \dot{q}^2) \quad (5)$$

Zatlumená energie mechanické části:

$$E_b = \frac{1}{2} b_m \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} b^* \dot{q}^2 = \frac{1}{2} b_m \dot{q}^2 \quad (6)$$

Pohybová rovnice ODE2 má tvar (8). Aby bylo možné do ní dosadit je potřeba vypočítat parciální derivace jednotlivých energií podle času, rychlosti a polohy (9).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_p}{\partial q} + \frac{\partial E_b}{\partial q} = \frac{\partial Q}{\partial q} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) = I \ddot{q}; \quad \frac{\partial E_k}{\partial q} = 0; \quad \frac{\partial E_p}{\partial q} = kaq; \quad \frac{\partial E_{be}}{\partial q} = b_e L^2 \dot{q}; \quad \frac{\partial E_{bm}}{\partial q} = b_m \dot{q} \quad (9)$$

Dosazením rovnic (9) do rovnice (8) vyjde tvar rovnice v nebuzeném tvaru (10) a po úpravě rovnice (11), kde $\Omega = \sqrt{\frac{k}{I}}$ je vlastní frekvence soustavy.

$$I \ddot{q} + b_m \dot{q} + b_e L^2 \dot{q} + kaq = 0 \quad (10)$$

$$\ddot{q} + \frac{b_m}{I} \dot{q} + \frac{b_e L^2}{I} \dot{q} + \Omega^2 q = 0 \quad (11)$$

Soustava je uvažována v rezonanci proto platí $\omega = \Omega$, což znamená, že budící frekvence je rovna frekvenci vlastní. V rovnici (11) b_m představuje mechanické tlumení v uložení páky generátoru a b_e tlumení elektrické. Pro jednoduchost je předpoklad, že b_m je lineární a lze je vypočítat z rovnice (12), kde b_k je kritické tlumení a b_p je poměrný útlum.

$$b_m = b_k \cdot b_p \quad (12)$$

b_p představuje tlumení v čepu (13) definované pomocí kvocientu tlumení Q . Hodnota Q je zjištěna experimentálně a pro optimální funkci je rovno 25.

$$b_p = \frac{1}{2Q} \quad (13)$$

Druhý člen v rovnici (12) b_p lze vypočítat pomocí rovnice (14) a je charakterizována tím, že vlastní frekvence tlumeného kmitání je nulová. Dosazením (13) a (14) do rovnice (12) a úpravou přejde rovnice do tvaru (15).

$$b_k = 2m^* \Omega = 2I\omega \quad (14)$$

$$b_m = \frac{\omega}{Q} I \quad (15)$$

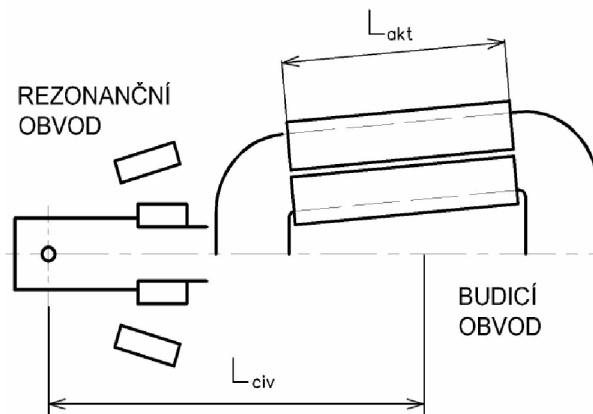
Zavedením kinematického buzení (16) do rovnice (11) na pravou stranu bude rovnice po úpravě ve tvaru (17). V (16) je Y_0 amplituda budících vibrací. Buzení je uvažováno jako harmonické.

$$\ddot{v} = Y_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (16)$$

$$\ddot{q} + \frac{b_m}{I} \dot{q} + \frac{b_e L^2}{I} q + \Omega^2 q = \frac{\ddot{v}}{i} \quad (17)$$

4.1.2.1 CAD model elektromagnetické části generátoru

Abychom byl problém řešitelný je potřeba vytvořit návrh budícího obvodu. Pro vlastní návrh modelu byl použit program AutoCAD. Bylo vytvořeno několik vhodných variant, kde bylo cílem nalézt vhodnou polohu cívky vůči magnetickému obvodu. Konečná verze budícího obvodu je na Obr. 11, kde L_{akt} je délka aktivní části cívky a L_{civ} je vzdálenost středu cívky od osy otáčení.



Obr. 11 CAD návrh budícího obvodu

Budící obvod tvoří nejdůležitější prvek celého generátoru, protože obstarává změnu magnetického toku skrz cívku a tím na ni indukuje napětí a výstupní výkon generátoru je odebírán na připojené zátěži. Jeho princip je založen na fyzikálních zákonech elektromagnetismu. Budící obvod neboli také elektromagnetický obvod se skládá ze zdroje magnetického pole a vodiče pohybujícím se v tomto poli. Magnetické pole je tvořeno soustavou magnetů mezi něž je vložena cívka.

V praxi existují dvě možná upořádaní tohoto obvodu. Jedná se buď o pohybující cívku a pevně uchycené magnety nebo naopak. Druhá varianta řešení je výhodnější,

protože odpadá složité vedení koncových svorek cívky. Z tohoto důvodu se také nejčastěji využívá a tato koncepce bude využita i v této práci.

4.1.2.2 Základní princip magnetického obvodu

Elektromagnetický obvod je složen z magnetického obvodu definovaném magnetickým polem a uzavřeným elektrickým obvodem, který se buď pohybuje v magnetickém poli nebo který je v proměnném magnetickém poli.

Magnetické pole

Magnetické pole je nejčastěji buzeno permanentními magnety nebo elektromagnety. Charakterizuje jej vektor magnetické indukce \vec{B} . Základní zákon vyjadřující jeho silové účinky, je vyjádřen vztahem (18).

$$\vec{F}_L = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (18)$$

Tento vztah udává tzv. Lorentzovu sílu, tj. sílu, kterou působí magnetické pole o magnetické indukci \vec{B} na elektricky nabitou částici o náboji Q , pohybující se rychlostí \vec{v} .

Elektrická část budícího obvodu

Zbylá část elektromagnetického obvodu je uzavřená smyčka pohybující se v magnetické poli. V praxi se smyčka skládá z N závitů vodiče a nazývá se cívka. Pro snadnější řešení je dále v textu uvažováno, že se cívka pohybuje vůči magnetickému poli.

Pohybuje-li se vodič (smyčka, cívka) uvnitř magnetického pole začnou se vlivem Lorentzovy síly pohybovat volné náboje uvnitř vodiče. Tento jev trvá po celou dobu pohybu. Díky němu vzniká ve vodiči proud, který se nazývá indukovaný.

Indukovaný proud I_i , který vzniká v uzavřených vodičích je dán obecným vztahem (19), kde \mathcal{E}_i je indukované elektromotorické napětí a R je celkový odpor obvodu.

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} \quad (19)$$

Definice indukovaného elektromotorického napětí \mathcal{E}_i je dána rovnicí (20), kde \vec{v} je rychlost cívky neboli také rychlost aktivní délky vodiče, \vec{B} je magnetická indukce daného prostředí,

$$\mathcal{E}_i = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \quad (20)$$

kde se cívka pohybuje a $d\vec{r}$ je elementární část vodiče. Pokud je cívka navinuta z N závitů přechází tvar rovnice (20) do obvyčejného tvaru (21), kde l_{akt} je aktivní délka vodiče, N je celkový počet závitů cívky, v je rychlost vůči magnetickému poli a B_x magnetická indukce.

$$u_i = B_x \cdot v \cdot l_{akt} \cdot N \quad (21)$$

Aktivní délka vodiče je ta část obvodu, která se nachází uvnitř magnetického pole a ve které se indukují proud. Hodnota, která určuje množství energie procházející přes cívku se nazývá magnetický indukční tok ϕ . Jeho hodnota se obecně určí ze vztahu (22), kde B je opět magnetická indukce a dS je element plochy cívky.

$$\phi = \oint_{\Omega} B dS \quad (22)$$

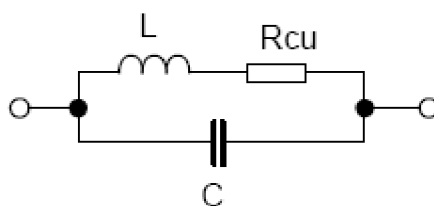
Protože se cívka a magnetický obvod vůči sobě pohybují, tak to má za následek i změny plochy S cívky. Z toho vyplývá, že ϕ je závislé na čase. Tato závislost je dána Faradayovým zákonem, který říká podle [A], že indukované napětí na vývodech nezátížené smyčky má velikost, která se rovná časové změně magnetického toku procházející plochou omezenou vodičem smyčky. Indukované motorické napětí má potom tvar (23).

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} \quad (23)$$

4.1.2.3 Základní princip cívky v elektromagnetické části generátoru

Cívka (také kotva) slouží jako člen, ve kterém se indukují napětí ε_i podle vztahu (20) a (23). Může být s jádrem nebo bez jádra. Z důvodu velké magnetické síly je navrhována cívka bez jádra.

Náhradní model cívky je na Obr. 12, kde L je vlastní indukčnost, C je kapacita mezi závity cívky a R_{cu} je vnitřní odpor cívky. Protože se cívka bude pohybovat v oblasti nízkých frekvencí je kapacita zanedbatelná tak jako indukčnost. Cívka je bez jádra, proto bude indukčnost velmi malá a napětí vzniklé indukčností zanedbatelné.



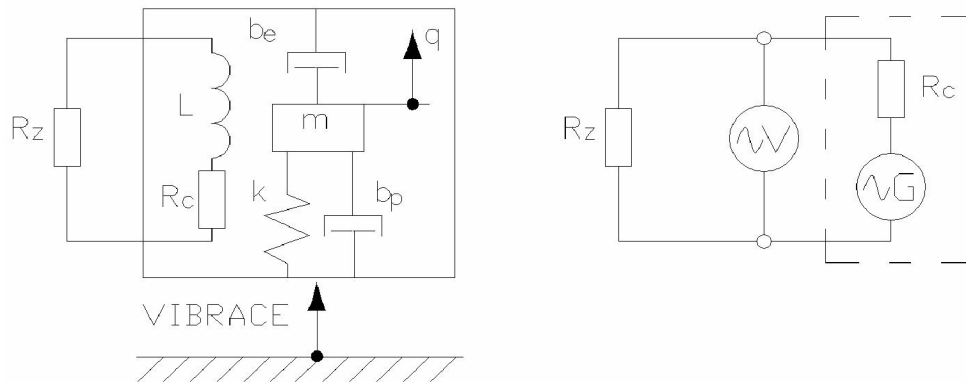
Obr. 12 Náhradní model cívky

Vnitřní odpor cívky R_{cu} způsobuje, že se na cívce ztrácí část výstupního napětí. Pokud není na výstup generátoru připojena zátěž a svorky jsou zkratované disipuje se všechen výkon na cívce. Pokud má odpor cívky a zátěž přibližně hodnotu $1k\Omega$ je napětí rozděleno rovnoměrně.

V dalším textu bude popsána elektrická část, kde cívka bude uvažována jen jako odpor v obvodu.

4.1.3 Elektrická část generátoru

Elektrická část tvoří generátor střídavého napětí, odpor cívky a odpor zátěže. V případě snímání napětí je připojen střídavý voltmetr, který s R_c tvoří odporový dělič.



Obr. 13 a) Elektromagnetická část b) Elektrické schéma generátoru

Pokud je připojena zátěž a generátor je uveden do pohybu začne R_z odebírat výkon. Tento výkon je roven odebranému výkonu na R_z a ztrátám na cívce R_c . Při odebrání výkonu teče obvodem proud, který způsobí vznik elektrického tlumení b_e , které zabraňuje relativnímu pohybu páky generátoru.

V případě, že nejsou uvažovány ztráty na indukčnosti je možné psát vztah pro výpočet elektrického výkonu (24). Jedná se o okamžitý výkon na výstupu generátoru.

$$p_{el} = \frac{u_i^2}{R} = \frac{u_i^2}{R_c + R_z} \quad (24)$$

Je-li odebírán elektrický výkon vniká v generátoru výkon mechanický, který závisí na relativním pohybu páky generátoru \dot{q} a na vzniklém elektrickém tlumení. Tento výkon je dán vztahem (25). Kde L_{civ} je vzdálenost od středu cívky od středu otáčení.

$$p_{mech} = b_e \cdot \dot{x} = b_e \cdot L_{civ} \cdot \dot{q} \quad (25)$$

Výkon elektrický (24) a mechanický (25) se musí rovnat. Porovnáním obou rovnic a dosazením za indukované napětí vztah (21) vznikne rovnice pro elektrické tlumení (26).

$$b_e = \frac{(B_x(q) \cdot L_{akt} \cdot N)^2}{R_c + R_z} \quad (26)$$

Kde $B_x(q)$ je závislost magnetické indukčnosti na poloze. Tato funkce bude získána pomocí simulačního modelování magnetického obvodu. Proměnnost je dána natáčením tělesa páky vůči cívce.

Z rovnice (26) vyplývá, že na základě tohoto vztahu lze stanovit parametry cívky. Je jasné, že pokud má být odebíraný výkon největší je potřeba, aby se hodnota elektrického a mechanického tlumení rovnalo. Tím bude zajištěn největší výkon generátoru. Pokud se tyto hodnoty nebudou rovnat je vhodné se jim co nevíce přiblížit.

4.2 Simulační modelování

Důležitým parametrem při řešení generátoru je magnetická indukce, proto je potřeba její průběh vyšetřit a určit jaká je její závislost na poloze v čase. Tato funkce bude nelineární ale při modelování celého obvodu se velice zpřesní výsledek oproti konstantní hodnotě.

4.2.1 Simulace magnetického obvodu

Aby byl problém řešitelný je nutné sestavit úplné zadání problému, které definuje geometrický a fyzikální model. Na základě tohoto postupu bude sestaven správný magnetický obvod. Tento postup vychází z [B].

Geometrický model popisuje problém z pohledu jeho konstrukčního uspořádání, geometrických vazeb či případné symetrie. Fyzikální model popisuje problém jako typ zdroje pole (náboj, proudová hustota), kvalitativními parametry (měnící se v čase) a parametry fyzikálními (permitivita, permeabilita, atd.).

Na základě těchto vlastností je teprve možné sestavit fyzikální model pro hledané veličiny. Aby byl řešený problém úplný je potřeba stanovit okrajové podmínky jako je např. hranice prostředí, atd. Fyzikální problém magnetického obvodu je řešen pomocí numerického modelu založeném na metodě konečných prvků.

4.2.1.1 Simulace magnetismu využitím MKP

Celý problém magnetického obvodu je řešen programem ANSYS, který má k řešení tohoto problému vhodné prostředky. Uspořádání a konstrukce magnetického obvodu vychází z předem navrhnutého modelu v programu AutoCAD. Protože se jedná o symetrickou úlohu konstrukce obvodu se podél jeho délky nemění je tato úloha řešena jako 2D. Úloha bude řešena pomocí řezu, který prochází středem délky magnetu a je kolmý na pohyb soustavy. Cílem řešení bude nalezení optimální magnetické indukce B a reálné geometrie magnetického obvodu. Podle výsledné geometrické modelu bude navržena konstrukce magnetického obvodu. Z toho plyne, že parametr který bude nepřímo ovlivňovat simulaci bude hmotnost, na které je závislý moment setrvačnosti I .

Model problému je řešen pomocí programovacího jazyka APDL, kterým disponuje ANSYS. Celý model je napsán pomocí makra. Makro obsahuje vstupní parametry, vlastnosti modelu, geometrii modelu a zpracování výstupních parametrů pomocí obrázků a grafů. Dále je možno některé výstupní hodnoty uložit do souboru a pak je dále použít. Důležitou částí makra jsou okrajové podmínky, které zaručují správnost řešení. Ukázka výsledného makra se nachází v příloze.

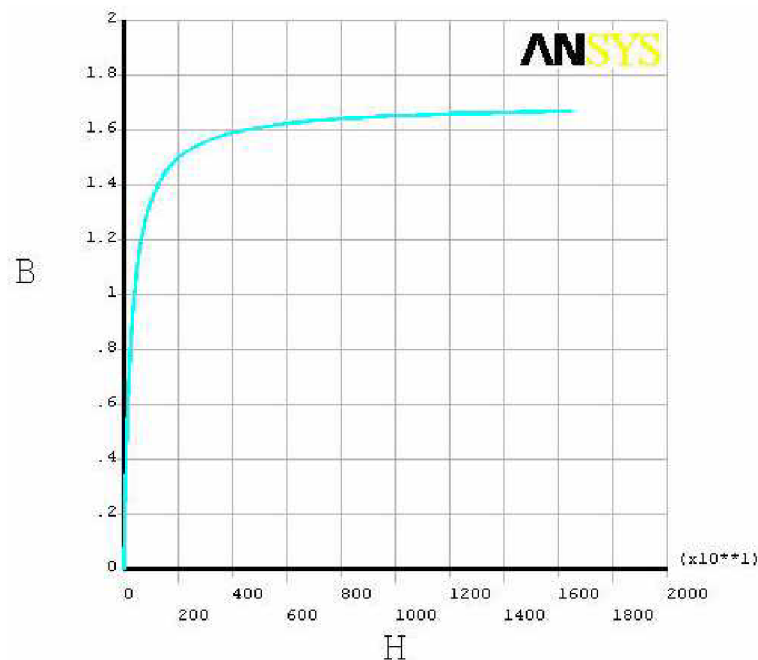
Model je řešen pomocí základních rovinných prvků. Základním elementem je PLANE53, který modeluje 2D (rovinné) magnetické pole. PLANE53 je založený na vektorové formulaci magnetického potenciálu a proto je vhodný pro následující

nízkofrekvenční magnetické aplikace: magnetostatika, vířivé proudy, magnetická pole a elektromagnetické obvody.

Geometrie modelu je složena z obdélníků, které tvoří soustavu magnetů, prvky uzavírající tento obvod (železo) a prostředí, ve kterém se soustava nachází (vzduch). Jednotlivé prvky jsou mezi sebou svázány pomocí materiálových a magnetických vlastností. Důležité je definovat okrajové podmínky.

4.2.2 Simulační modelování

Magnetický obvod se skládá ze soustavy magnetů a železa, které uzavírá magnetický indukční tok. Výsledná magnetická indukce je závislá na šířce vzduchové mezery a na průřezu železa. Ve výpočtu je uvažováno železo, které má BH křivka na Obr. 14. Křivka je převzata z příkladu uvedeném v Helpu ANSYSu.



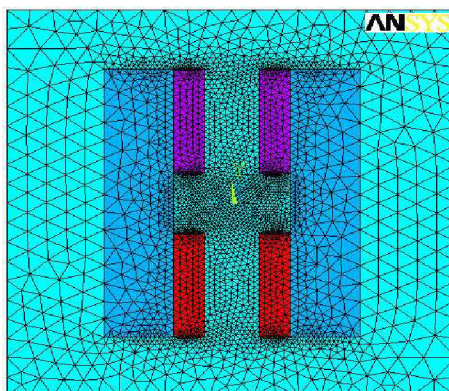
Obr 14. B-H křivka použitého materiálu

Magnety v soustavě jsou ze vzácných zemin a to magnety chemického složení NdFeB. Fyzikální vlastnosti použitých magnetů výsledného konstrukčního návrhu jsou na Obr. 15. Magnety v předchozích návrzích byly stejného složení ale s jinými vlastnostmi a nejsou zde uvedeny.

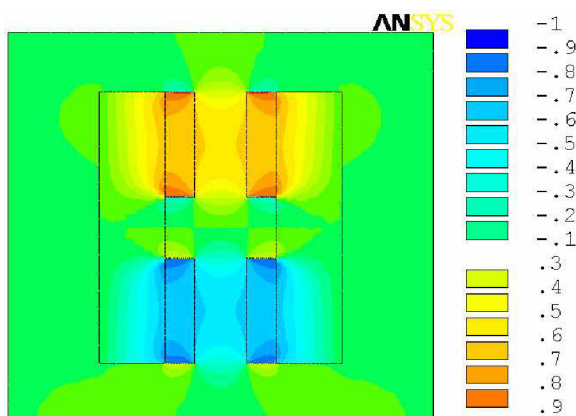
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška	2,3	mm
Šířka	4,0	mm
Délka	20,0	mm
Magnetická vlastnost	VMM 6 UH	
Směr magnetování	2,3	mm
Teplotní odolnost	180	°C
Remanence	1200 ÷ 1280	mT
Koerictivita	876 ÷ 915	kA/m

Obr. 15 Fyzikální vlastnosti použitých magnetů

Na Obr. 16 je zobrazen Mesh model. Jde o první funkční verzi magnetického obvodu. Ze simulace vyplynulo, že čím je širší magnet tím je u širší rozsah magnetické indukce nad magnety. Magnetická indukce v mezeře je na Obr. 17. Magnetická indukce uvnitř mezery má velikost kolem 0,6T při šířce mezery 3mm.



Obr. 16 Mesh model v ANSYSu

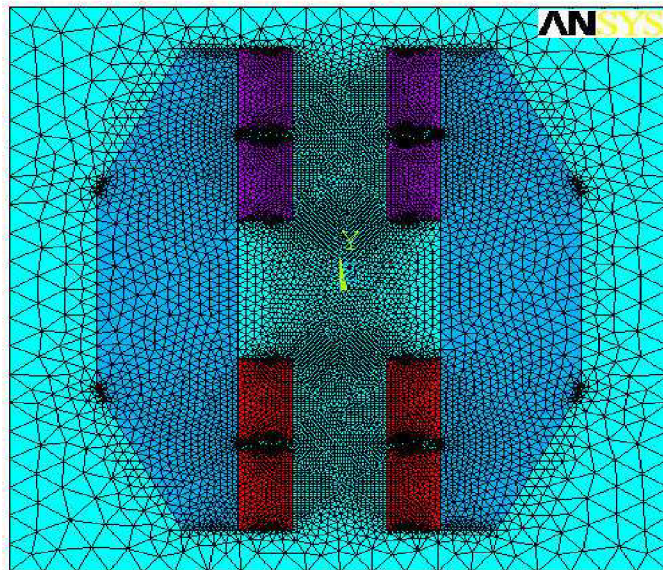


Obr. 17 Magnetická indukce uvnitř vzduchové mezery

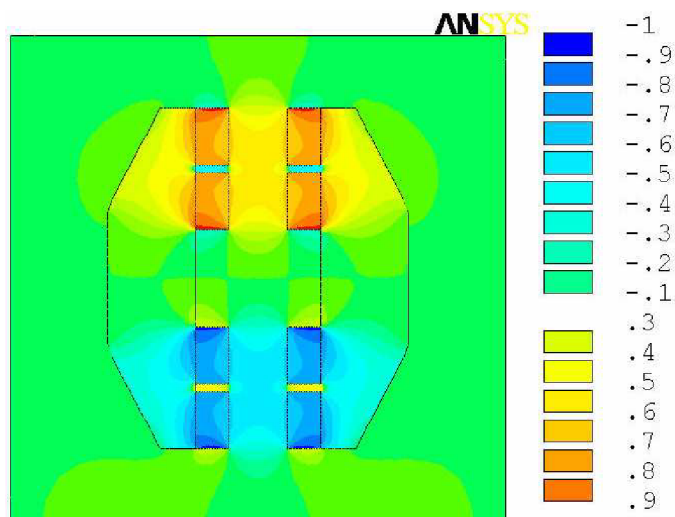
Ze zvětšující šířkou se sice zvětšuje interval hodnot ale nejvyšších hodnot B_x v průběhu moc nepřibývá. Proto byl každý magnet jakoby rozdělen a tím vznikl širší

interval maximálních hodnot B_x . Protože BH křivka ovlivňuje nasycení železa bylo potřeba tomuto stavu předejít zvětšením průřezu.

Konečná verze magnetického obvodu je na Obr. 18 a Obr. 19. Na Obr. 18 je mesh model a na Obr. 19 je konečný pohled na řez magnetického obvodu. Protože z důvodu rozšíření železa se zvětší i jeho hmotnost jsou na Obr. 18 vidět úkosy, které slouží k odlehčení materiálu a zároveň jsou umístěny tak, aby nebyl ovlivněn magnetický indukční tok nebo nasycení materiálu.



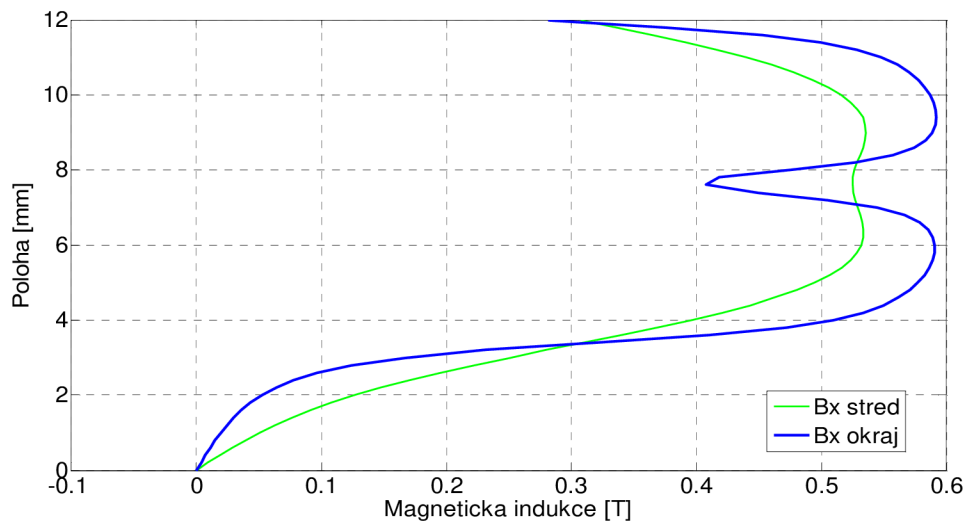
Obr. 18 Mesh model MKP konečné verze modelu



Obr. 19 Magnetická indukce uvnitř vzduchové mezery

Zachováním předem stanovených požadavků má výsledný návrh tyto důležité parametry: šířka mezery 4mm , šířka železa 6mm a rozměr magnetů $20 \times 4 \times 2,3\text{mm}$. Velikost magnetické indukce v mezeře je kolem $0,5\text{T}$. Průběh magnetické indukce uvnitř vzduchové mezery je zobrazen na Obr. 20. Je zde zobrazen průběh uprostřed vzduchové mezery na

kraji. Průběh je zobrazen jen v jedné polovině magnetického obvodu, protože v druhé polovině je symetrický, ale jen se zápornými hodnotami B_x . Krajní průběh magnetické indukce je samozřejmě větší protože je blíže povrchu magnetů. S hodnotami středního průběhu se počítá dále v textu.



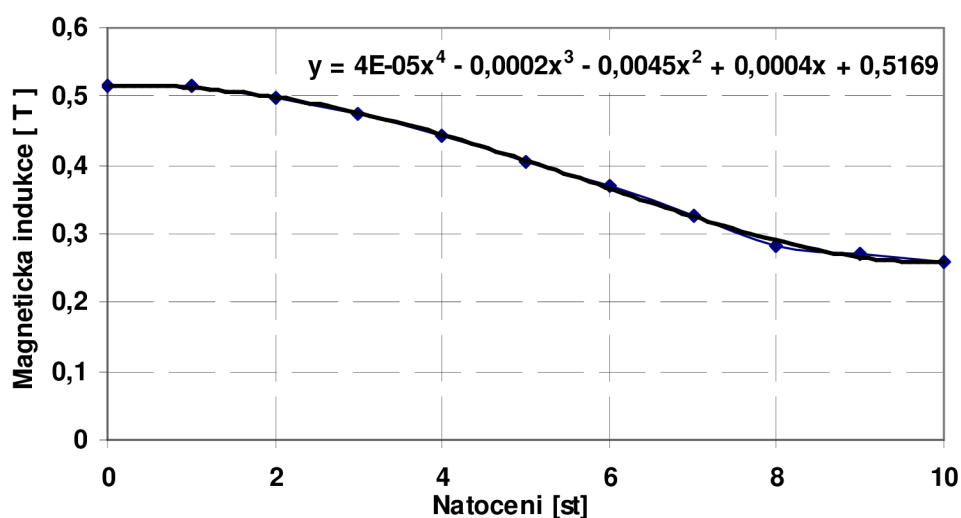
Obr. 20 Magnetická indukce uvnitř vzduchové mezery v jedné polovině mg. obvodu

4.2.2.1 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Předpokladem výkonného magnetického obvodu je jeho maximální dosažitelná magnetická indukce B ve vzduchové mezeře. Magnetická indukce je ovlivněna několika parametry. Jsou to magnetické vlastnosti použitých magnetů, šířka vzduchové mezery a také feromagnetické vlastnosti spojovacího prvku čili železa.

Magnetická indukce je tedy nejvíce ovlivněna tloušťkou magnetů a šířkou vzduchové mezery. Pokud se zvětšuje tloušťka magnetu a zároveň klesá šířka mezery, nastane v železe jev zvaný přesycení materiálu. Železo se takto začne jevit jako vzduchová mezera a tím dojde k velké ztrátě účinnosti magnetického obvodu. Tomuto jevu je potřeba se vyhnout a simulaci zaměřit sledování nasycení železa. Tento jev se kontroluje pomocí tzv. BH křivky, která představuje část hysterezi smyčky daného materiálu.

Aby bylo dosaženo nejpřesnějšího výpočtu při simulování elektromagnetické části je potřebné stanovit závislost magnetické indukce na poloze. Postup zjištění B_x je následující. Nejprve byla z programu ANSYS uložena data magnetické indukce a polohy do souboru. Tento soubor bylo potřeba upravit tak, aby obsahoval jen dva sloupce hodnot. V programu Matlab byl vytvořen program, který naimportuje data ze souboru magnetické indukce. Tyto hodnoty jsou zpracovány do vhodného tvaru a pak posouvány tak, jak probíhá natáčení páky generátoru. Výstupem jsou hodnoty B_{x_i} závislé na hodnotách natočení. Rozsah hodnot pro natočení byl zvolen $\langle 0^\circ; 10^\circ \rangle$ s krokem 1. Získané hodnoty byly přepsány do programu Excel, kde byl vytvořen graf. Na základě grafu byla stanovena regresivní přímka, která vhodně popisuje výslednou křivku. Typ průběhu byl nastaven jako polynome 4 stupně. Výsledný graf i s regresivní přímkou je na Obr. 21. Jedná se o závislost magnetické indukce na poloze.



Obr. 21 Závislost magnetické indukce na poloze

Požadovaná rovnice (26) je vložena programu v Matlabu, který provádí simulační návrh elektromagnetické části.

$$Bx(q) = (4e-5)q^4 - (2e-4)q^3 - (4,5e-3)q^2 + (4e-4)q + 0,5169 \quad (27)$$

4.2.3 Simulační návrh parametrů elektromagnetické části generátoru

Simulační modelování elektromagnetické části vibračního generátoru je provedeno pomocí programu Matlab. Pomocí něhož bylo vytvořeno několik program, které umějí řešit návrh parametrů elektromagnetické části. Programy jsou vytvořeny v několika m-file. Celý problém je řešen pomocí předem odvozené pohybové rovnice. Pohybová rovnice je pro simulaci převedena do maticového tvaru (28) pro nebuzenou soustavu a (29) pro soustavu s kinematickým buzením.

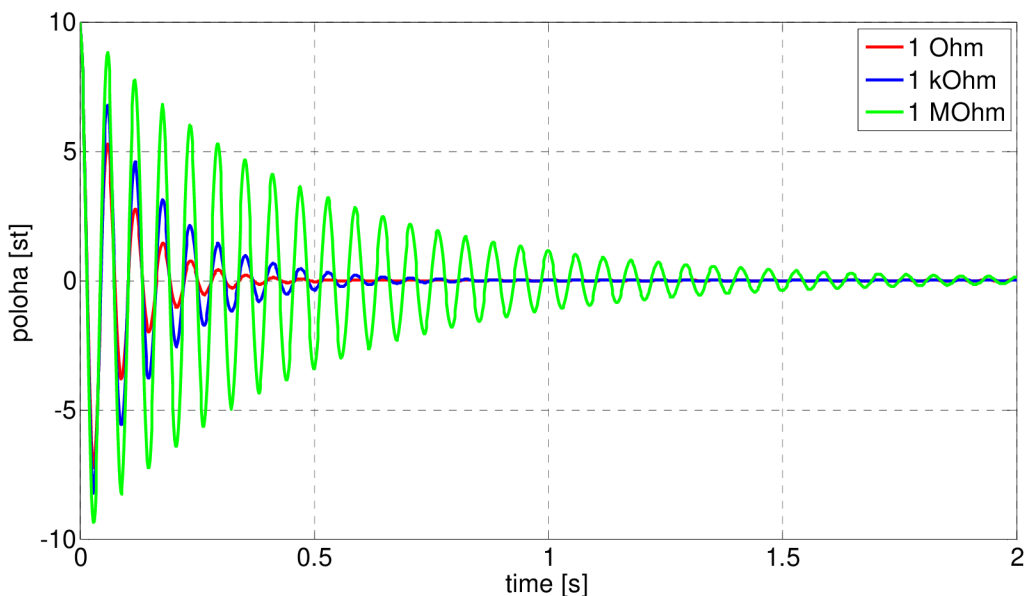
$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Omega^2 & -\left(b_m + \frac{b_e \cdot L_{civ}^2}{I}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Omega^2 & -\left(b_m + \frac{b_e \cdot L_{civ}^2}{I}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A \cdot \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (29)$$

Řešení je provedeno ve stavovém prostoru pomocí řešiče diferenciálních rovnic ODE45, který vyhovuje danému problému svou rychlostí řešení. V simulaci je hlavním výstupem poloha páky generátoru a jeho rychlost. Z rychlosti je vypočítáno výstupní

napětí a výkon. Hodnoty výchylky vstupují do funkce $Bx(q)$ a tím definují změnu elektrického tlumení v každé poloze.

Na Obr. 22 je graf utlumení soustavy při různých hodnotách zatížení. Lze vidět, že pokud se odpor zátěže blíží nule, což je zkrat tak se soustava ustálí v čase 0,35s. Pokud se odpor zátěže blíží hodnotě $1\text{M}\Omega$ soustav kmitá do doby až 2s. Z toho vyplývá, že nejvhodnější hodnota zátěže nesmí být velice malá a zároveň moc velká. Sensory, které jsou většinou napájeny těmito generátory mají vstupní odpor kolem $3\text{k}\Omega$. Tato hodnota se jeví jako nejvhodnější což lze vidět i z Obr. 22 a proto bude dalším cílem stanovit hodnotu optimálního odporu zátěže.

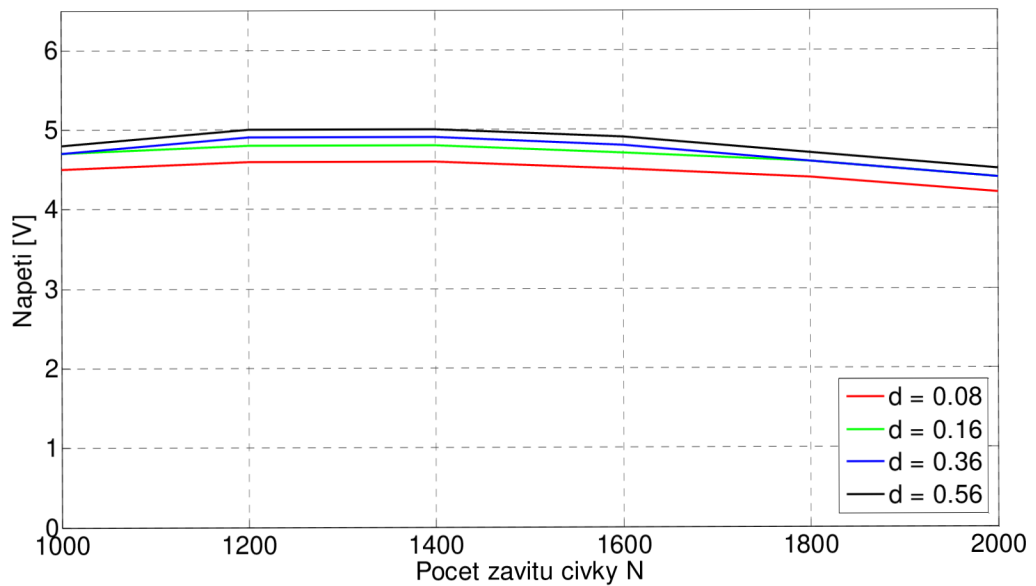


Obr. 22 Odezva soustavy na výchylku při různém zatížení

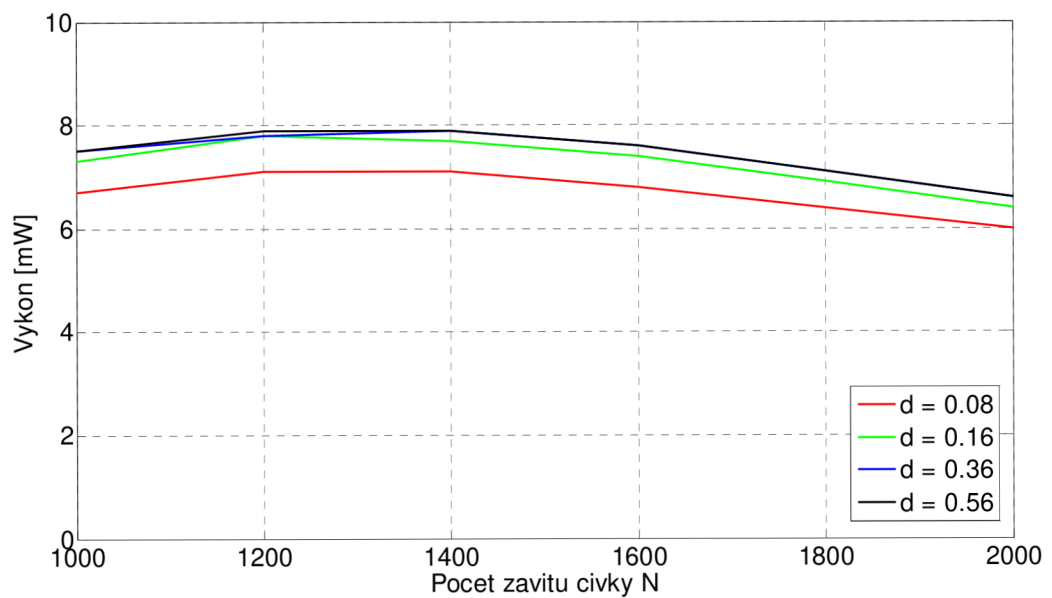
Důležitou simulací je návrh optimálních parametrů cívky. Parametry cívky jsou průměr drátu a počet závitů. Při modelování vyjdeme z parametrů předchozího modelu, což znamená, že se výpočet bude pohybovat v okolí těchto hodnot. Zkoumaným parametrem je výstupní výkon a napětí.

Na Obr. 23 a Obr. 24 jsou grafy optimálních parametrů cívky. Maximální hodnoty napětí a výkonu jsou při počtu závitů kolem 1200 až 1600. Lze ale vidět, že tyto hodnoty se mění velice pozvolna. Při hledání parametrů je potřeba hledat takové hodnoty, které ve výsledku povedou k tomu, že se mechanické a elektrické tlumení se bude rovnat.

Z navrhnutého magnetického obvodu a jeho parametrů plyne, že předem simulované parametry je možné zvýšit. Jako konečný parametr je zvolena hodnota optimálního průměru drátu což bude $0,08\text{mm}$. Z CAD modelu vyplývá rozměr průřezu jedné větve cívky na $3 \times 6,5\text{mm}$. Výpočtem lze zjistit, že do cívky se vleze kolem 3900z. Protože je při výrobě počítat s hodnotou kvocientu zaplnění, je vhodné tento počet snížit. Při ručním vinutí by byl kvocient velice malý. Pokud se cívka bude vyrábět na stroji je možné tuto hodnotu snížit na počet kolem 3200z. I kdyby se do cívky nevešlo požadovaný počet závitů je možní rozšířit cívku do stran, protože při uvažovaném průřezu cívky, vznikne dostatečně velká mezera.



Obr. 23 Závislost napětí na počtu závitů dle použitého průměru vodiče

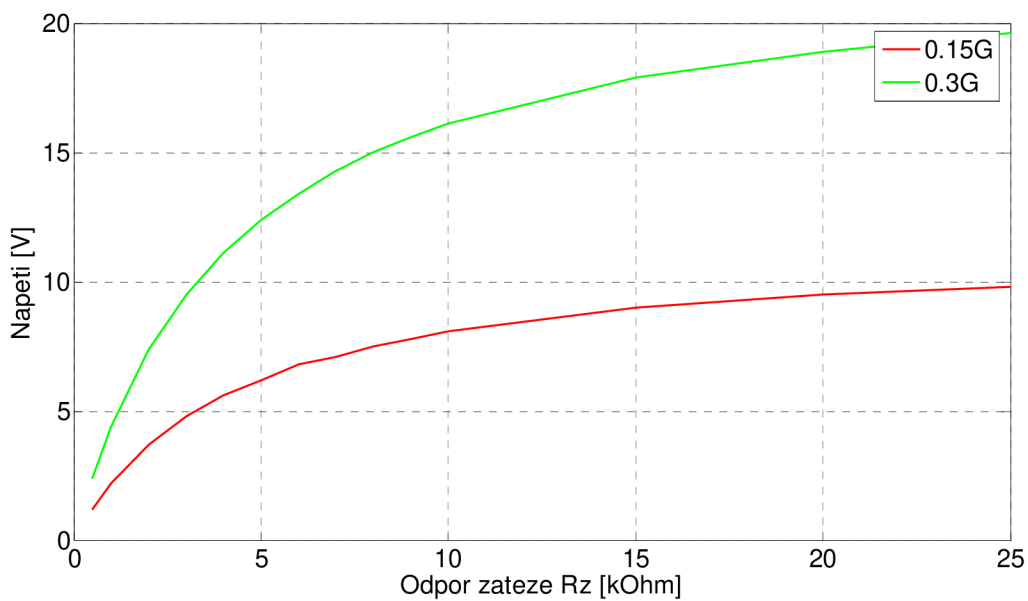


Obr. 24 Závislost výkonu na počtu závitů dle použitého průměru vodiče

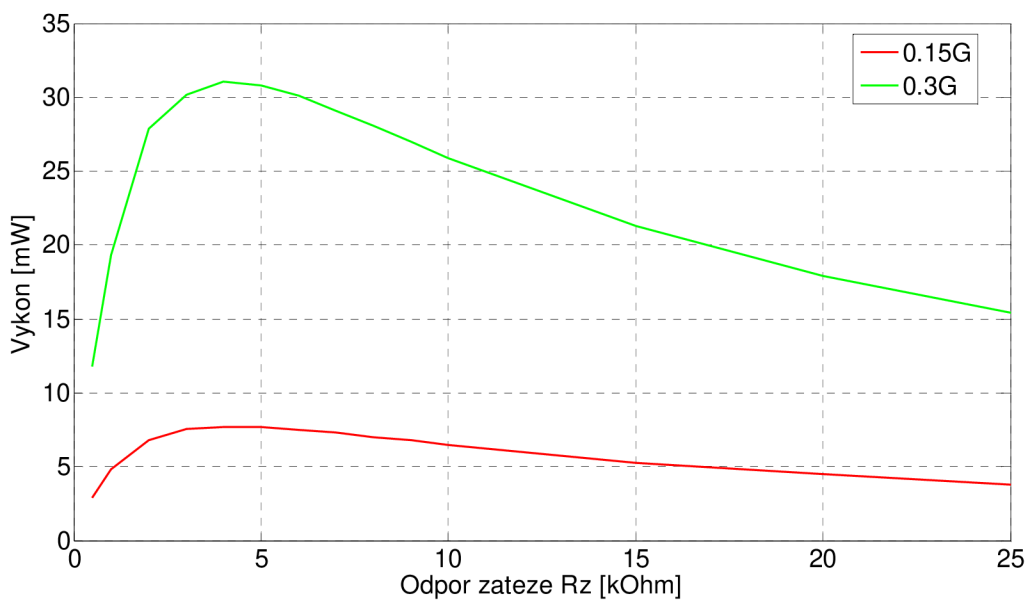
Dosažením této hodnoty do výpočtu vyjde, že se elektrické tlumení zvýšilo a kolem této hodnoty se moc nemění. Při takto zvolených parametrech cívky je elektrické tlumení o necelou polovinu menší než tlumení mechanické a toto volba se jeví jako neoptimalnější. Z tohoto důvodu bude cívka dále uvažována s parametry uvedenými na Obr. 25.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Délka	288	m
Počet závitů	3200	z
Průměr drátu	0,08	mm
Vnitřní odpor	1000	Ω

Obr. 25 Parametry použité cívky



Obr. 26 Závislost napětí na odporové zátěži

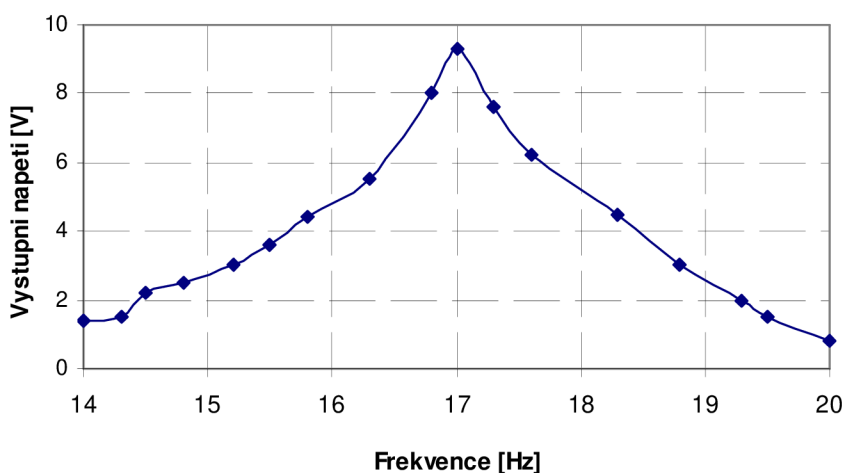


Obr. 27 Závislost výkonu na odporové zátěži

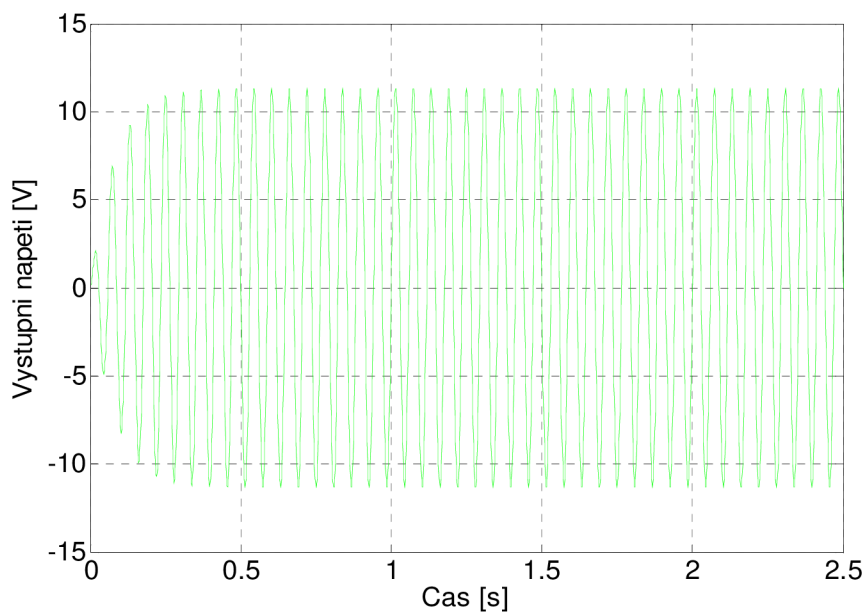
Použitím navrhnuté cívky dále ve výpočtu lze určit hodnotu optimální odporové zátěže. Obr. 26 a 27 ukazuje neoptimálnější oblast kde, by se měla odporová zátěž pohybovat. Nejvhodnější odporová zátěž tohoto generátoru je kolem $3\text{k}\Omega$ až $4\text{k}\Omega$. Rostoucí napětí potvrzuje to, že s rostoucím odporem zátěže klesá proud v obvodu a to způsobí zvýšení napětí a pokles výkonu.

Neoptimálnější odpor zátěže leží téměř v místě, kde se nachází i skutečný odpor zátěže tj. napájená elektronika.

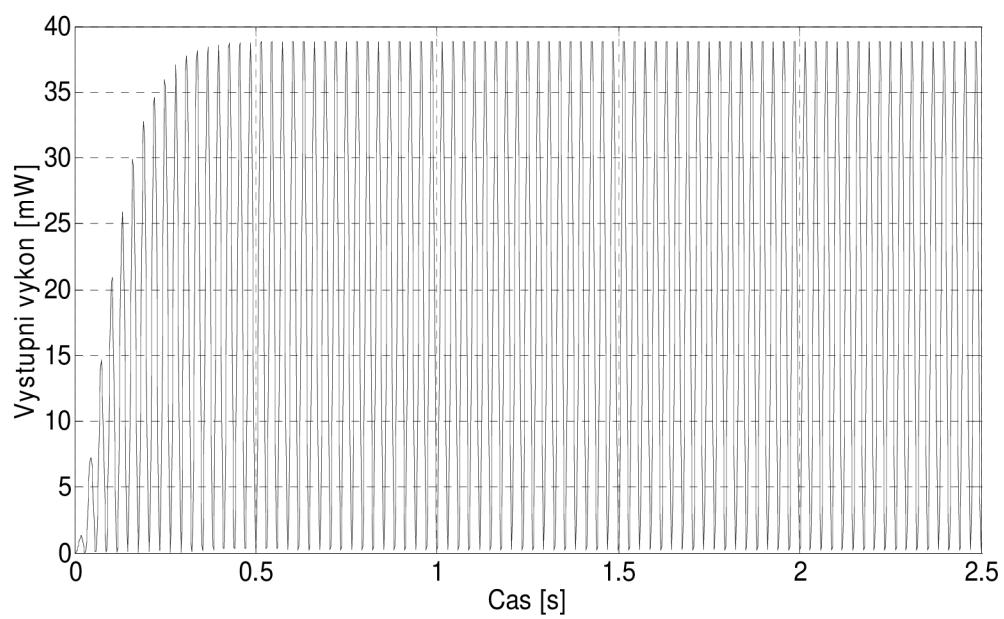
Na Obr. 28 je A-f charakteristika generátoru. Na Obr. 29 a Obr. 30 jsou zobrazeny výstupní průběhy napětí a výkonu při odporu zátěže $3,3\text{k}\Omega$ a amplitudě vibrací $0,5\text{G}$.



Obr. 28 Amplitudo-frekvenční charakteristika



Obr. 29 Výstupní napětí generátoru při amplitudě vibrací $0,5\text{G}$



Obr. 30 Výstupní výkon při amplitudě vibrací 0,5G

5 Návrh konstrukce elektromagnetické části generátoru

Cílem je navrhnout konstrukci budícího obvodu, tak aby byly zachovány vlastnosti rezonačního obvodu, což znamená, že generátor musí být dále schopen pracovat na rezonační frekvenci 17 Hz aniž by došlo k poklesu výstupního výkonu. Dále je potřeba splnit požadavky jednoduché a snadné výroby.

Konstrukce budícího obvodu může mít několik variant. U každá konstrukce musí být navržena tak, aby splňovala vstupní podmínky.

Vlastní konstrukce budícího obvodu byla navržena podle dosaženým parametrů simulačního modelování a její schématický model je zobrazen na Obr. 10. Celý návrh vychází z předem nasimulovaných parametrů.

5.1 Návrh konstrukce magnetického obvodu

5.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod se skládá ze soustavy permanentních magnetů tvořící zdroj magnetického pole a dále vodivými prvky, které slouží k uzavření magnetického obvodu a mají feromagnetické vlastnosti

. Z rovnice (21) a (24) vyplývá, že pokud má generátor generovat pokud možno co největší výkon, musí mít magnetický obvod velkou magnetickou indukci a vhodně stanovenou cívkou. Tato vlastnost bude splněna v případě použití magnetů z velkou vnitřní energií.

V současné době disponují tímto požadavkem na trhu jen dva druhy magnetů. Jedná se o magnety se vzácných zemin a to neodymové (NdFeB) a samarium-kobaltové (SmCo) magnety. Magnety NdFeB se vyznačují lepšími vlastnostmi než SCo a proto jsou použity v návrhu magnetického obvodu. Fyzikální vlastnosti použitých magnetů jsou na Obr. 15.

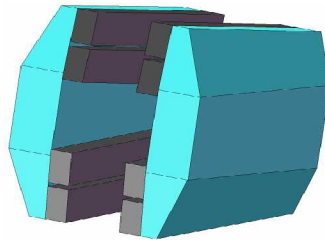
5.1.1.1 Magnety ze vzácných zemin

Jedná se o nejnovějším a nejsilnějším typ magnetu. Mají vynikající magnetické vlastnosti s nejvyšší vnitřní energií jako je remanence a energetická hustota. Magnety uvedeného typu jsou schopny unést více než tisícnásobek vlastní váhy, protože disponují velkou magnetickou silou, která se blíží hodnotě až 100 N.

Jejich nevýhodou je, že snadno korodují, proto je u nich potřeba provádět povrchovou úpravu nejčastěji niklováním, zinkováním nebo pryskyřicí. Další nevýhodou je malá tepelná odolnost oproti jiným typům magnetů. Při teplotě nad 80°C začínají některé typy magnetů ztrácet své magnetické vlastnosti. Naopak magnety NdFeB mají dobrou odolnost proti působení vnějšího demagnetizačního pole kvůli jejich vysoké koercitivitě, která dosahuje až k hodnotám 960 [kA/m]. Proto jsou tyto magnety obzvláště vhodné pro elektromagnetické aplikace.

5.1.2 Model magnetického obvodu pomocí systému CAD

Konečný návrh vychází z navrhnutých parametrů. Velikost a konstrukce obvodu je volena a navržena tak, aby byla co nejmenší jeho hmotnost. Je to z důvodu co nejmenšího ovlivnění předchozího momentu setrvačnosti.



Obr. 31 CAD model navrhnutého magnetického obvodu

Navržený model je na Obr. 27. Model předpokládá jednoduché opracování. Navrhnuté úkosy vycházejí z odlehčení soustavy.

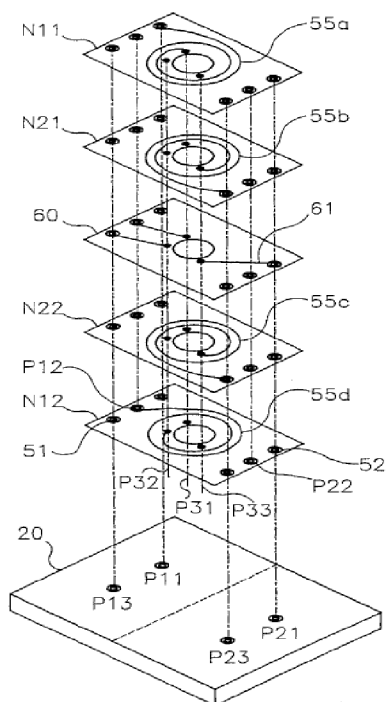
5.2 Návrh konstrukce cívky

Návrh cívky vychází z nasimulovaných parametrů generátoru. Popis funkčnosti cívky a její charakteristické rovnice byly uvedeny výše. Při návrhu je brán ohled na jednoduchou výrobu.

5.2.1 Výroba cívky

Při návrhu cívky je potřeba brát ohled na její výrobu. Cívku je možné vyrobit dvěma způsoby. První je, že cívka je vinutá ručně nebo strojově. Druhá možnost vychází z novější technologie, která umožňuje cívky vyrobit tzv. tisknutím. Tato technologie je zobrazena na Obr. 28 a výroba spočívá v nanášení vrstev použitého materiálu na tenké plošné spoje, které jsou na sebe lepeny. Každá vrstva má své vstupy a výstupy pomocí, kterých je spojována dohromady.

Ruční výroba je velice nepřesná a zdlouhavá a proto se nedoporučuje. Je to z důvodu malého kvocientu zaplnění. Strojní vinutí se jeví jako nejlepší způsob. Tisknuté cívky jsou nejpřesnější. Protože se vyrábí pomocí tenkých vrstev je tato technologie vhodná pro tenké cívky.



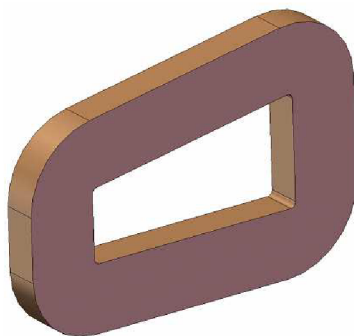
Obr. 32 Výroby cívky pomocí tisknutých spojů

5.2.2 Návrh modelu cívky

Navrhnutá cívka je rovinná a její tloušťka se jednak odvíjí od navrhnutých parametrů a také podle umístění ve vzduchové mezeře. Tato cívka nebude mít kostru, ale bude zalisována do vhodného materiálu, aby cívka tvořila kompaktní destičku, která bude vložena do kostry generátoru. Na Obr. 29 je navrhnutá cívky pomocí CAD modelování.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Délka	288	m
Počet závitů	3200	z
Průměr drátu	0,08	mm
Vnitřní odpor	1000	Ω

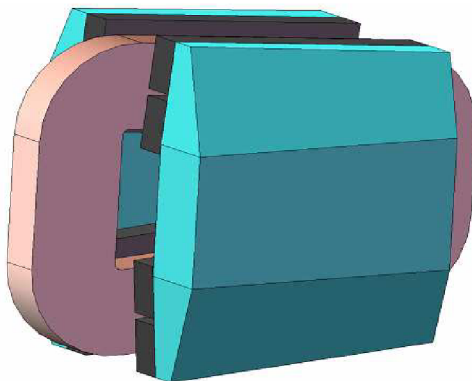
Obr.33 Parametry navrhnuté cívky



Obr. 34 CAD model cívky

Při daných parametrech cívky je uvažováno, že cívka bude vinutá na stroji s co největším koeficientem zaplnění, tak aby cívka měla co největší účinnost.

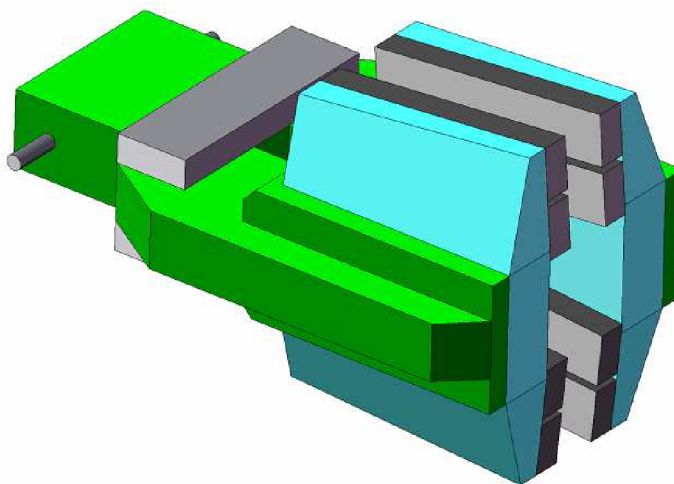
Na Obr. 35 je výsledný model elektromagnetické části vibračního generátoru.



Obr. 35 CAD model cívky a magnetického obvodu

5.3 Návrh konstrukce ramene páky generátoru

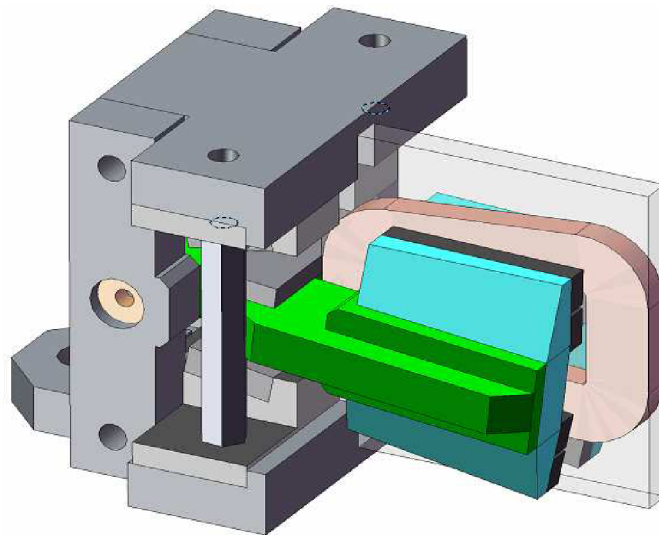
Rozměry páky vycházejí z dodržení požadovaného momentu setrvačnosti. Po vytvoření modelu bylo zjištěno, že se výsledný moment setrvačnosti o malinko zmenšil. Tento problém je potřeba vyřešit pomocí přidání malého závaží na těleso páky. Hmotnost přidaného závaží bude okolo 2g. Závaží bude vhodné rozdělit tak, aby těleso páky bylo stále vyvážené a nebránilo relativnímu pohybu páky. Konečný návrh tělesa páky je uveden na Obr. 31.



Obr. 36 CAD model páky a magnetického obvodu

5.4 Konstrukce vibračního generátoru

Model upravené konstrukce je na Obr. 37. Jedná se jen o předběžný a částečný návrh. Cílem ukázky je zobrazit jak bude vypadat uchycení cívky v generátoru. V konečné verzi se cívka bude zasouvat do rámu a tím bude zaručena její dostatečná tuhost



Obr. 37 CAD model upraveného generátoru

Parametry navrženého generátoru jsou na Obr. 38. Jsou zde uvedeny parametry použité cívky, a výstupních parametrů při dané amplitudě vibrací.

Parametr		Hodnota	Jednotka
Váha		130	g
Objem		80	cm ³
Cívka	Odpor	1000	Ω
	Závity	3200	z
Pracovní frekvence		17	Hz
Výstupní napětí (sinusový průběh, 17Hz)	0,1G	3	V
	0,3G	7	V
	0,5G	11	V
Výstupní výkon (sinusový průběh, 17Hz)	0,1G	2	mW
	0,3G	15	mW
	0,5G	43	mW

Obr. 38 Parametry navrženého vibračního generátoru

6 Závěr

Z řešení zadaného problému vyplynulo, že návrh elektromagnetické části je velice problematický a při návrhu je potřeba brát ohled na spoustu parametrů, které ovlivňují celý problém.

Před vlastním řešením si je potřeba ujasnit postup jak bude probíhat návrh a které části návrhu je potřeba pořádně promyslet s ohledem na výrobu. Nejlepší je stanovit si jistou koncepci a podle ní se řídit. Nejdůležitější částí návrhu elektromagnetické části generátoru je zvolit vhodnou koncepci jak bude výsledný návrh vypadat, aby bylo předejito zdoluhavým hledáním vhodné varianty. Nejvhodnější je si vypracovat rozbor vyráběných generátorů, najít vhodnou konstrukci a tou se dále zabývat a zdokonalovat.

Největším problémem při návrhu je dosažení požadovaného výkonu, tak aby byly zachovány požadované parametry a zároveň byla dodržena podmínka jednoduché výroby.

Pomocí programu AutoCAD byla nalezena nejvhodnější varianta elektromagnetické části a s tou se uvažovalo v celém řešení. Důležité bylo stanovit jak bude umístěn magnetický obvod vůči cívce tak aby při pohybu byla cívka do krajní polohy co nejvíce v oblasti magnetické indukčnosti. Protože se magnety od cívky odklání a tím dochází ke snížení magnetického indukčního toku přes cívku byla zvolena varianta, že se magnety budou dva vedle sebe a tím se rozšíří interval magnetické indukčnosti přes cívku. Cívka zároveň byla zúžena a byla zvětšena její tloušťka. Problémem magnetického obvodu bylo navrhnout jak budou vypadat železa, protože docházelo k jejich přesycení. Tento problém bylo možné odstranit zvětšením tloušťky železa nebo zvětšením vzduchové mezery. Nakonec byly provedeny obě změny a to z důvodu snížení hmotnosti magnetického obvodu.

Pomocí stanovení závislosti magnetické indukce v mezeře na poloze, byla simulace elektromagnetické části generátoru zpřesněna a bylo možné dojít k přesnějším výsledkům.

Simulačním návrhem při stanovení vhodných parametrů byly dodrženy všechny vstupní požadavky a proto není nutné měnit parametry rezonačního obvodu. A pro doladění do pracovní oblasti je potřeba umístit na páku generátoru závaží, aby byl zachován moment setrvačnosti z původního generátoru.

Testováním reálné konstrukce generátoru by bylo možné zpřesnit namodelované výsledky. Na základě naměřených hodnot byl byla konstrukce upravena do funkční a spolehlivé podoby.

Seznam použité literatury

- [1] Cigánek, L., Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje, SNTL, Praha, 1955.
- [2] Měřička, J., Zoubek.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.
- [3] Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.
- [4] Liška, M., Šantavý.: Elektřina a magnetismus, Skripta, FSI, VUT v Brně, 2005.
- [5] Fiala, P., Kadlecová, E.: Modelování elektromagnetických polí, Počítačová cvičení, FEKT, VUT v Brně 2005.
- [6] Dědková, J.: Modelování elektromagnetických polí, Skripta, FEKT, VUT v Brně 2005.
- [7] Kratochvíl, C., Malenovský, E.: Sběrka úloh z dynamiky, Skripta, FSI, VUT v Brně.
- [8] Doleček, J.: Moderní učebnice elektroniky 1., BEN, Praha, 2005.
- [9] Uhlíř, I. a kolektiv: Elektrické stroje a pohony, Skripta, FSI, ČVUT v Praze 2004.
- [10] Roundy, S. J.: Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, Ph.D Thesis, University of Kalifornia at Berkley CA, 2003.

Přílohy:

P1: Model generátoru v Matlabu

P2: Model magnetického obvodu v ANSYSu