

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 416

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Zdeněk Hadaš

**Mikrogenerátor
jako mikromechanická soustava**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Zdeněk Hadaš

**MIKROGENERÁTOR JAKO MIKROMECHANICKÁ
SOUSTAVA**

MICROGENERATOR – MICROMECHANICAL SYSTEM

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
Školitel spec.: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Oponenti: prof. Ing. Otakar Kurka, CSc.
doc. Ing. Vladimír Čech, CSc.
Datum obhajoby: 26. 4. 2007

Klíčová slova:

Vibrace, Energy Harvesting, Energy Scavenging, Vibrační mikrogenerátor, Vibrační generátor, Nízko-výkonový generátor, Resonance, Elektromagnetická indukce.

Key Words:

Vibration, Energy Harvesting, Energy Scavenging, Vibration Power Generator, Vibration micro-generator, Low-Power Generator, Resonance, Electromagnetic Induction.

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ.....	6
2.1 Zdroje elektrické energie.....	6
2.2 Energy Harvesting.....	7
2.3 Energy harvesting z mechanické energie vibrací.....	7
2.4 Elektromagnetický vibrační generátor.....	8
2.5 Zhodnocení principů vibračních generátorů.....	9
2.6 Cíle řešení problému.....	10
3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	10
4 ELEKTROMAGNETICKÝ VIBRAČNÍ GENERÁTOR.....	12
5 VÝVOJ A NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU.....	13
6 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU.....	17
6.1 Měření v laboratoři ÚMTMB FSI VUT v Brně.....	17
6.2 Měření v laboratoři CRC – EADS Mnichov.....	19
7 ZHODNOCENÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU.....	21
8 ZÁVĚR.....	22
LITERATURA.....	24
SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ.....	27
ŽIVOTOPIS.....	29
SUMMARY.....	30

1 ÚVOD

V posledních letech se výrazně zvyšuje zájem o vývoj bezdrátových senzorů a bezdrátových zařízení obecně. Bezdrátové senzory nacházejí uplatnění pro široké spektrum aplikací, především při monitorování rozsáhlých technických soustav. Problémem většiny bezdrátových senzorů je však jejich napájení. Baterie se ne vždy jeví jako vhodný zdroj elektrické energie co se týká jejich životnosti, provozních podmínek a obsluhy. Životnost baterií je většinou limitujícím faktorem bezdrátových senzorů, zatímco ideální bezdrátový senzor funguje bez nutnosti servisní kontroly a výměny baterií po celou dobu životnosti monitorované technické soustavy. Důležitým a ve světě intenzivně zkoumaným problémem je najít pro bezdrátové senzory (a další bezdrátová zařízení) vhodný autonomní zdroj elektrické energie. Řešením problému napájení bezdrátových senzorů může být zvýšení energetické hustoty akumulčních prvků, vývoj nových technologií schopných netradičního bezdrátového přenosu energie od zdroje energie k senzoru a/nebo využití některého druhu všudypřítomné okolní energie.

Takový způsob výroby elektrické energie z okolní formy energie se ve světě obecně označuje jako *Energy Harvesting (Evropa a Asie)* nebo *Energy Scavenging (USA)*. Tento princip získávání energie lze využít nejen pro napájení bezdrátových senzorů, ale i pro řadu dalších aplikací bezdrátových autonomních zařízení ve strojírenském průmyslu, v leteckém průmyslu i u vesmírného programu, pro napájení senzorů umístěných uvnitř stavebních konstrukcí, ale můžeme jej využít i v lidském těle pro napájení lékařských pomůcek a přístrojů atd. Využití formy všudypřítomné energie z okolí může sloužit jako vhodný zdroj pro napájení mnoha bezdrátových a autonomních aplikací, které tak budou na vnějších zdrojích elektrické energie nezávislé.

Důležitým faktorem pro volbu tohoto způsobu napájení bezdrátového zařízení je nalezení vhodného a dostatečně výkonného zdroje okolní energie. Dále je důležitá volba vhodného a účinného fyzikálního principu pro přeměnu této okolní energie na elektrickou energii a následně vývoj konstrukce tohoto *Energy Harvesting* zařízení. Určujícím faktorem pro takový způsob napájení je požadavek dané aplikace na množství dodávané energie a maximální velikost či hmotnost takového generátoru. V případě nepřiměřeného požadavku na množství generované elektrické energie, maximální velikost nebo hmotnost může být nalezení takového elektrického zdroje neřešitelné.

Návrh tohoto zdroje elektrické energie tedy závisí na konkrétních vlastnostech a množství okolní energie a fyzikálním principu přeměny energie. Generátor musí být navržen optimálně vzhledem k charakteru okolní energie a požadavkům napájené autonomní soustavy (velikost, hmotnost, množství energie, životnost, atd.). Ke každému případu a návrhu *Energy Harvesting* generátoru se musí přistupovat individuálně. Především tehdy, vstupuje-li do energetické přeměny okolní mechanická energie, musí být generátor elektrické energie navržen přímo na charakter této vstupní energie. Nelze obecně vytvořit generátor vyrábějící potřebnou

elektrickou energii v celém spektru parametrů dané okolní energie vstupující do přeměny.

Tato práce se zabývá možností využití okolní energie mechanických vibrací k napájení bezdrátových senzorů s výkonem okolo 5 mW. Okolní mechanické vibrace jsou vhodným zdrojem energie a vyskytují se téměř ve všech strojních soustavách. Konkrétním výstupem této práce je vibrační generátor, vzhledem k požadovanému výkonu a předpokládané velikosti dále jen vibrační generátor, který generuje z daných vibrací elektrickou energii a je schopen napájet bezdrátové senzory a i jiné bezdrátové zařízení, umístěné v okolí zatíženém vibracemi, na které je generátor naladěn.

2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

Při použití bezdrátových senzorů je velmi důležité zvolit vhodný zdroj elektrické energie. Zřetel se bere na výkon, životnost, cenu, rozměry, rozsah pracovních teplot a další vlastnosti použitého zdroje. Podle všech těchto aspektů se vybere nejvhodnější zdroj elektrické energie pro daný bezdrátový senzor. Využití *Energy Harvesting* metod není vždy nejvhodnější, ale pro některé aplikace bezdrátových senzorů to představuje jedinou možnost, jak získat zdroj elektrické energie. Jedná se především o bezdrátové senzory použité ve stavbách a/nebo uvnitř konstrukčních částí strojních soustav a/nebo bezdrátové senzory pracující při velmi nízké teplotě.

V této kapitole jsou stručně shrnuty možnosti napájení bezdrátových senzorů [17] s příkonem v řádu od mW až po napájení MEMS zařízení, která pracují jen s několika μ W. Dále jsou zde shrnuty a porovnány možnosti výroby elektrické energie získané z určité formy okolní energie (*Energy Harvesting*). Podrobněji jsou uvedeny možnosti výroby elektrické energie z okolní mechanické energie a je zde nastíněno i uplatnění *Energy Harvesting* metod, které využívají energie lidského těla nejen jako zdroje energie pro napájení některých zařízení každodenní potřeby (hodinky, GPS přijímač, mobilní telefon atd.), ale i případně pro napájení lékařských zařízení (kardiostimulátor, naslouchadlo, atd.). Hlavním cílem této práce je vývoj vibračního generátoru, schopného vyrábět elektrickou energii z okolní mechanické energie, přesněji z vibrací konkrétní strojní soustavy.

2.1 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Vývoj v elektronice, především její miniaturizace, v dnešní době předběhl vývoj zdrojů energie pro tato zařízení. Zdroje energie jsou tedy obvykle limitujícími faktory v otázkách rozměrů, ceny a životnosti elektronických obvodů. Problematika již byla publikována v mnoha člancích, např. [6, 19], a S. Roundy shrnul informace o této problematice ve své knize [32]. V této podkapitole jsou ve stručnosti shrnuty možné varianty zdrojů elektrické energie pro nízkovýkonová bezdrátová zařízení a MEMS zařízení [45].

Zdroje elektrické energie pro bezdrátové zařízení můžeme klasifikovat jako:

➤ **Prvky akumulující elektrickou energii:**

- elektrochemické zdroje (baterie [41]),
- mikro-baterie,
- mikro-palivové články,
- ultra-kondenzátory,
- mikro-spalovací motory,
- radioaktivní zdroje [16].

➤ **Metody bezdrátového přenosu energie:**

- vysokofrekvenční (RF) záření, přenos na vzdálenost do 5 m s frekvencí okolo 2 GHz,
- využití akustické emise,
- směrový přenos energie, – laser nebo soustředěný světelný zdroj.

➤ **Metody získávání energie z okolního prostředí (*Energy Harvesting*):**

- Sluneční energie - solární články.
- Teplotní gradient – termočlánky.
- Změny tlaku prostředí.
- Proudění tekutiny [2, 7].
- Mechanická energie.
 - Lidská činnost [15, 25, 26, 34].
 - Vibrace – většina strojních soustav při svém chodu generuje vibrace.

2.2 ENERGY HARVESTING

Termínem Energy Harvesting se obecně rozumí získávání elektrické energie z okolních dostupných zdrojů energie (např. sluneční záření, chemické a teplotní gradienty, proudění tekutin, okolní vibrace, elektromagnetické záření, lidská činnost, barometrické výkyvy, biologická energie, atd.). Tato technologie může výrazně ovlivnit nebo eliminovat použití chemických zdrojů hlavně u nízko-energetických bezdrátových zařízení. Tato zařízení nebo nedostupně umístěné senzory (např. uvnitř nerozebíratelných strojních celků, v nádržích, v budovách, mostech, atd.) tak získávají časově neomezený zdroj energie a mohou tedy pracovat téměř bez časového omezení, protože životnost zařízení je omezena pouze životností jednotlivých komponent, nikoli vyčerpáním energie, jako je tomu při napájení z chemických zdrojů. Takové zařízení může být umístěno i v nebezpečném nebo citlivém prostředí, kde je umístění chemických zdrojů nepřijatelné.

2.3 ENERGY HARVESTING Z MECHANICKÉ ENERGIE VIBRACÍ

Většina bezdrátových zařízení je umístěna v prostředí, které je obklopeno různou formou mechanické energie a tuto energii okolí je možno přeměnit na elektrickou

energii. Získáváme tak zdroj elektrické energie, nezávislý na dodávce elektrické energie z jiných zdrojů. Mechanická energie může mít formu lidské chůze nebo pohybů ruky, vibrace strojních soustav či staveb, atd.

Energie okolních vibrací je zdrojem energie pro několik typů vibračních generátorů. Pokud hovoříme o výrobě energie z vibrací, jedná se zde víceméně o mikrogenerátory, a to jak velikostí, tak i výkonem.

Konstrukce vibračního generátoru je vždy tvořena rezonančním mechanismem a převodníkem kinetické energie na elektrickou energii. Resonanční mechanismus vytváří díky svému naladění na frekvenci vibrací relativní pohyb v převodníku elektrické energie. Část mechanismu, která vykonává tento relativní pohyb vůči okolí, může být pevně spojena s převodníkem energie, který převádí kinetickou energii rezonančního mechanismu na elektrickou energii, nebo tomu může být naopak. Vibrační generátor pracuje účinně pouze v blízkosti rezonanční frekvence, a to jen v případě, že amplituda vibrací je dostatečná a vybudí v mechanismu dostatečný relativní pohyb.

Pro převod kinetické energie na energii elektrickou je využíváno následujících fyzikálních principů:

- piezoelektrického jevu – piezoelektrický generátor,
- elektrostatické přeměny – elektrostatický generátor,
- elektromagnetické indukce – elektromagnetický generátor.

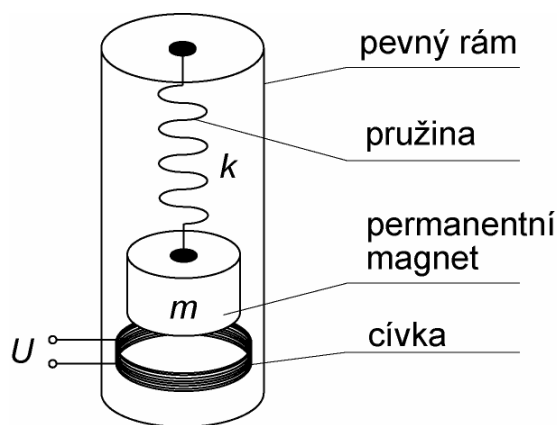
Další potenciální možností převodu kinetické energie na elektrickou je využití magnetostrikčních materiálů. Tento princip však není v žádné mně známé publikované studii o možnostech získávání energie z okolí zmiňován.

2.4 ELEKTROMAGNETICKÝ VIBRAČNÍ GENERÁTOR

Pro výrobu elektrické energie vibračním generátorem byl zvolen elektromagnetický princip, zobrazený na Obr. 3, využívající Faradayova zákonu elektromagnetické indukce. Tento princip je pro daný výkon a frekvenci vibrací nejvhodnější.

U tohoto principu generátoru je přeměna kinetické energie na elektrickou energii založena na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce. Pokud je vodič umístěn v magnetickém poli pohybujícího se permanentního magnetu, indukuje se v něm napětí U . Konstrukce generátoru může být i opačná, kdy se vodič pohybuje vůči magnetickému poli permanentního magnetu. První zmíněná konstrukce generátoru má tu výhodu, že cívka je pevně spojena s rámem generátoru a odpadají problémy s připojením pohybujícího se vodiče k elektrickému obvodu.

Pro konstrukci generátoru je důležitá co největší hodnota změny magnetického toku procházejícího cívkou při pohybu v generátoru. Proto je důležitá správná volba permanentního magnetu a vhodně zvolené uspořádání magnetu či magnetů v budícím obvodu tak, aby co největší magnetický tok procházel dostatečně velkou plochou průřezu cívky, čili co největším počtem závitů cívky. To znamená, že větší generátor s delším vinutím cívky vyrobí více energie než menší generátor.



Obr. 1 Schématické zobrazení vibračního elektromagnetického generátoru

2.5 ZHODNOCENÍ PRINCIPŮ VIBRAČNÍCH GENERÁTORŮ

Zhodnocení principů konstrukce vibračního generátoru v Tab. 1:

Princip	Charakteristika
Elektrostatický	<ul style="list-style-type: none"> + Velký potenciál pro integraci do MEMS struktur (frekvence vibrací několik kHz). - Vyžaduje samostatný zdroj napětí pro inicializaci přeměny energie. - Nízký výkon. - Použití mechanického dorazu.
Piezoelektrický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný jako zdroj energie pro frekvence vibrací větší než 100 Hz až několik kHz. + Vysoké generované napětí. - Vysoký vnitřní odpor, malý proud.
Elektromagnetický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný zdroj energie pro frekvence do 50 až 100 Hz. + Dostatečné generované napětí a výkon při rozměrově neomezeném generátoru. - Obecně nízké napětí.

Tab. 1 Porovnání principů vibračního generátoru

Elektrostatický generátor je velmi vhodný svým principem a výrobou pro použití v MEMS zařízeních. Piezoelektrický generátor se jeví jako vhodnější pro použití při malém objemu generátoru, generuje podstatně větší napětí, avšak menší měrný výkon. Je jej možno použít i pro generování elektrické energie z velmi nízké hladiny vibrací. Elektromagnetický generátor se jeví jako vhodnější pro použití bez podstatného omezení rozměrů. Použití tohoto generátoru je výhodné při větších amplitudách vibrací a nižší frekvencí vibrací, kdy lze očekávat podstatně větší měrný výkon. Pro větší generované výkony se proto tato konstrukce jeví jako nejvhodnější.

2.6 CÍLE ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Cílem této práce je vývoj vibračního mikrogenerátoru, který bude generovat elektrickou energii z mechanické energie okolních vibrací tak, aby byl schopen napájet bezdrátové senzory a tím eliminovat použití elektrochemických zdrojů. Prodlouží se tak životnost bezdrátového senzoru a tento může být bez problémů umístěn do nepřístupného místa nebo může být při montáži umístěn přímo do konstrukce strojní soustavy.

Cílem práce je navrhnout vibrační mikrogenerátor naladěný na okolní vibrace s frekvencí okolo 34 Hz, který je schopný generovat elektrickou energii o výkonu okolo 5 mW a generovat stejnosměrné napětí větší než 2,5 V. Vzhledem k předpokládané velikosti a požadovanému výkonu budeme dále používat jen název vibrační generátor. Generátor je buzený vibracemi s amplitudou vibrací 50 až 150 μm , což odpovídá intenzitě vibrací 0,2 až 0,7 G s průměrnou hodnotou intenzity vibrací 0,45 G. Velikost generátoru není omezena, ale snahou je navrhnout co nejmenší velikost v závislosti na možnostech výroby funkčního vzorku vibračního generátoru.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V současné době (spolu s rozvojem bezdrátových technologií) vyvstala poptávka po pokud možno nevyčerpatelných zdrojích energie pro toto bezdrátové zařízení. Jednou z možností, jak získat takový zdroj elektrické energie, jsou *Energy Harvesting* zařízení, která dokáží získávat její potřebné množství z okolních zdrojů energie. Zde je uveden dostupný přehled výzkumu generátorů pro výrobu elektrické energie z okolních vibrací.

Ve světě se touto problematikou zajímají hlavně pracovníci University of California, Berkeley [43], Australské Národní University [42, 44], MIT, Souphamton, Sheffield, Hongkong, Barcelona [47], Curych. Kromě nich řeší tuto problematiku i několik firem, které se zabývají bezdrátovými technologiemi a MEMS zařízeními, která potřebují dostatečné zdroje energie pro napájení, např. TIMA [18, 50], Perpetuum Ltd. [46], DAPRA [49]. Možnost bezdrátového napájení senzorů je atraktivní i pro letecké společnosti. Nejznámější firmou využívající zdroj mechanické energie k napájení je společnost SEIKO [48], která využívá pohybu zápěstí k napájení hodinek SEIKO Kinetic.

Současný stav vývoje v oboru můžeme rozdělit do několika kategorií:

- zdroje energie získávající energii z pasivního lidského chování,
- zdroje energie pro MEMS zařízení,
- zdroje energie pro autonomní bezdrátové zařízení a senzory.

Každá tato kategorie má svá specifika a využívá různé hladiny okolních vibrací. Vibrace vytvářené pasivním lidským chováním mají poměrně velkou amplitudu kmitání, avšak frekvence je velmi nízká, 0,5 – 5 Hz. Další kategorií jsou MEMS zařízení, která využívají extrémně nízké hladiny vibrací okolního prostředí (vibrace

budov, atd.) s amplitudou vibrací v řádu nm a s velmi vysokou frekvencí několik kHz až několik desítek kHz. Tato zařízení jsou vyrobena přímo na křemíkovém čipu a jejich výkon je maximálně několik μW . Jedná se zde hlavně o elektrostatické mikrogenerátory [18, 20, 33, 37], ale byly již navrženy a publikovány konstrukce elektromagnetického mikrogenerátoru [4] vyrobeného na křemíkovém čipu. Další návrh elektromagnetického mikrogenerátoru pro MEMS zařízení byl publikován v článku [3] a dále byly publikovány i některé návrhy piezoelektrických mikrogenerátorů [1, 35, 36] pro MEMS zařízení [45].

Generátory sloužící k napájení senzorů a jiných bezdrátových zařízení využívají okolní vibrace běžných strojních soustav (rámy strojů, letecké konstrukce, atd.). Amplituda vibrací je zde v řádu několika μm a frekvence se pohybuje od 20 Hz do 300 Hz. Tyto generátory mají výkon okolo 1 mW, záleží zde na velikosti generátoru. Mnoho publikovaných a navržených generátorů je založena na piezoelektrickém principu [9, 28, 29, 30, 31]. Výhodou tohoto principu oproti elektromagnetickému generátoru je generování dostatečně vysokého střídavého napětí vhodného k usměrnění pro získání stejnosměrné elektrické energie. Tento handicap elektromagnetického generátoru je nevýznamný, nejsou-li významně omezeny rozměry generátoru a napětí je indukováno na dostatečně dlouhém vodiči. Elektrostatické generátory na rozdíl od piezoelektrických a elektromagnetických nejsou vhodné pro tyto aplikace díky nutnosti nezávislého zdroje napětí pro inicializaci generování elektrické energie.

Pro ilustraci současného stavu vývoje elektromagnetických generátorů lze uvést příklad výsledků výzkumu University Souphampton. Zde byl vyvinut elektromagnetický generátor [8, 10, 12] s výkonem až 5 mW, který je možno naladit na frekvenci od 50 do 300 Hz a ve spolupráci s firmou Perpetuum je tento generátor nabízen na trhu. Další návrh konstrukce elektromagnetického generátoru byl publikován v článku [11]. Tento generátor má velikost pouze 1 cm^3 a jeho výkon je okolo 1 mW.

Problematikou bezdrátových senzorů pro letecký průmysl a jejich napájením se zabývá i mezinárodní projekt WISE [51], ve kterém je i VUT v Brně jedním s řešitelů dílčí problematiky získávání elektrické energie z vibrací [27, 38]. Vývoj vibračního generátoru, který je předmětem této práce, je jedním z výstupů projektu MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických soustav".

Oblast vývoje *Energy Harvesting* zdrojů elektrické energie se v současné době velmi dynamicky rozvíjí a jednotlivá vývojová centra zabývající se bezdrátovými technologiemi se snaží vyvíjet autonomní zdroje pro konkrétní bezdrátové zařízení. Tyto *Energy Harvesting* zdroje jsou ušity na míru pro použití v konkrétní aplikaci.

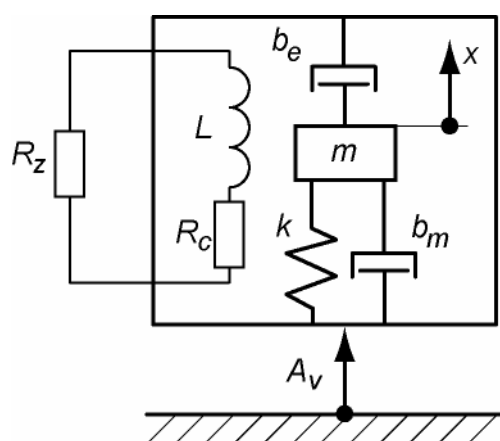
Většina vibračních generátorů není obecně použitelná pro různé okolní podmínky, jednotlivé konstrukce vibračních generátorů musí být navrženy přesně podle okolních podmínek a požadavků na tento zdroj energie. Parametry vibračního generátoru jsou vhodně naladěny na charakter okolních vibrací a celá konstrukce je tomu přizpůsobena.

4 ELEKTROMAGNETICKÝ VIBRAČNÍ GENERÁTOR

Obecně se elektromagnetický vibrační generátor skládá z následujících částí:

- rezonanční mechanismus, který svým naladěním na frekvenci budících vibrací zajišťuje relativní pohyb budícího obvodu,
- budicí obvod (permanentní magnet FeNdB [40]), který je součástí rezonančního mechanismu a tvoří ve většině konstrukcí generátoru podstatnou část hmotnosti rezonančního mechanismu,
- cívka (kotva), která je většinou pevně spojená s rámem generátoru. Tím odpadají problémy s přenosem elektrické energie pohyblivými vodiči.

Schématicky znázorněný generátor na Obr. 2 je tvořen kmitajícím tělesem o hmotnosti m zavěšeným na pružině o tuhosti k . Naladění generátoru na vlastní frekvenci Ω je dáno poměrem tuhosti pružného členu k a hmotnosti kmitající hmoty m . Dále je generátor tvořen cívkou s indukčností L a vnitřním odporem R_c , která je pevně spojená s rámem generátoru a na kterou je připojena elektrická zátěž s odporem R_z .

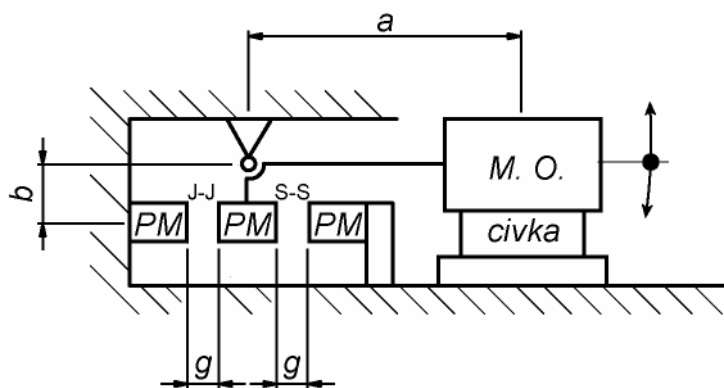


Obr. 2 Schéma vibračního elektromagnetického generátoru

Pokud je generátor zatížen okolními vibracemi se zrychlením A_v , které mají frekvenci stejnou jako je naladěná rezonanční frekvence generátoru, buzení mechanismu vibracemi způsobí relativní kmitavý pohyb x hmoty m vzhledem k rámu generátoru s cívkou [5]. Tento pohyb budící soustavy, jež je součástí kmitající hmoty, vyvolá změnu magnetického toku procházejícího závity cívky L . Na jednotlivých závitěch cívky se tak podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce indukuje střídavé napětí [21], které je závislé na rychlosti vybuzeného kmitavého pohybu budícího obvodu, na velikosti magnetického toku procházejícího cívkou a na geometrii cívky.

Velikost vybuzené výchylky x hmoty m , a tím i velikost indukovaného napětí, závisí na celkovém tlumení v generátoru. Celkové tlumení se skládá z mechanického tlumení b_m , které je způsobeno mechanickým vedením, materiálovým tlumením pružného členu, třením, atd., a elektromagnetického tlumení b_e způsobené odběrem elektrické energie.

Pro návrh prototypu vibračního generátoru byl zvolen princip mechanismu generátoru, založený na tuhosti navzájem se odpuzujících se magnetů [V6]. Konstrukce generátoru, která je schématicky znázorněna na Obr. 3, má permanentní magnet fixován na rameni páky. Magnet na rameni páky se pohybuje mezi dvěma opačně orientovanými pevnými permanentními magnety a vytváří tak tuhost mechanismu, která je závislá na vzdálenosti mezi odpuzujícími se magnety. Páka se natáčí v kluzném ložisku a rameno páky nese budicí obvod (permanentní magnet), který se při vybuzení vibracemi pohybuje relativně vůči cívce pevně spojené s rámem mechanismu. Tento relativní pohyb způsobí indukování napětí v cívce kotvy a po připojení odporové zátěže je odebírán elektrický výkon, který výrazně zpětně ovlivňuje relativní pohyb v mechanismu generátoru. Natáčení páky v kluzném ložisku zaručuje přesné vedení budicího obvodu vůči cívce a vzduchová mezera mezi cívkou a pohyblivým magnetickým obvodem může být co nejmenší.



Obr. 3 Schéma generátoru

Výhoda této konstrukce je v možnosti přeladění vlastní frekvence mechanismu generátoru v rozmezí asi 10 Hz, změnou vzdálenosti mezi pevnými permanentními magnety. Není proto potřeba doladování vlastní frekvence rezonančního mechanismu přídatnými závažími. Při návrhu vibračního generátoru je vhodné ponechat mezeru mezi odpuzujícími se magnety co nejmenší a při zachování rezonanční frekvence zvýšit hmotnost zavěšeného tělesa. Tím se zvětší mohutnost konstrukce budicího obvodu a zvýší se hodnota magnetická indukce v cívce kotvy.

5 VÝVOJ A NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

S využitím publikované analýzy výkonu *Energy Harvesting* generátorů [1, 22, 23, 25, 29, 39], vlastních poznatků o disipovaném výkonu [V9, V11], výsledků měření na testovacím vzorku [V7, V10] a s využitím simulačního modelování vibračního generátoru [V10] jsem během svého studijního pobytu ve vývojovém centru CRC firmy EADS Mnichov navrhl skutečný funkční vzorek vibračního generátoru. Při jeho návrhu bylo snahou maximálně vylepšit citlivost vibračního generátoru na budící vibrace a zvýšit výkon použitím větší hmotnosti magnetického obvodu při zachování stejné velikosti generátoru, jako u testovacího vzorku v publikaci [V7]. Při návrhu funkčního vzorku vibračního generátoru jsem vycházel z předešlé

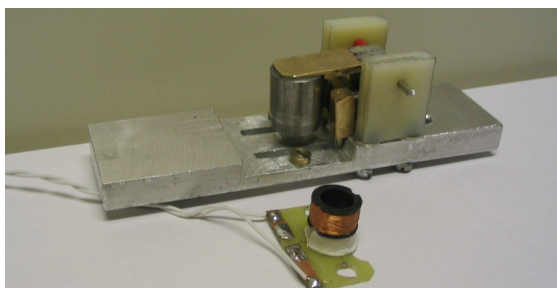
konstrukce, přičemž byly změněny některé parametry generátoru a bylo upraveno konstrukční provedení jednotlivých částí generátoru. Takto vytvořený model vibračního generátoru je možno použít i pro simulace a optimalizační analýzy navrženého funkčního vzorku.

Celý návrh konstrukce vibračního generátoru tedy probíhá současně a návrhy jednotlivých částí generátoru se prolínají, přičemž parametry konstrukce jednotlivých částí generátoru se navzájem ovlivňují. Jde tedy o typickou úlohu mechatronického návrhu s podporou modelování a simulace.

Konstrukce navrženého funkčního vzorku vychází z předchozí testovací verze vibračního generátoru. V této konstrukci vibračního generátoru je zmenšeno mechanické tlumení třením a tím je i vylepšena citlivost vibračního generátoru na budící vibrace. Konstrukce budícího obvodu má větší hmotnost a v kombinaci s lepší kvalitou rezonančního mechanismu znamená větší generovaný výkon. Velikost cívky je navržena optimálně vzhledem ke konstrukci magnetického obvodu a pro připojenou optimální odporovou zátěž bude generovat dostatečné napětí pro napájení bezdrátového senzoru.

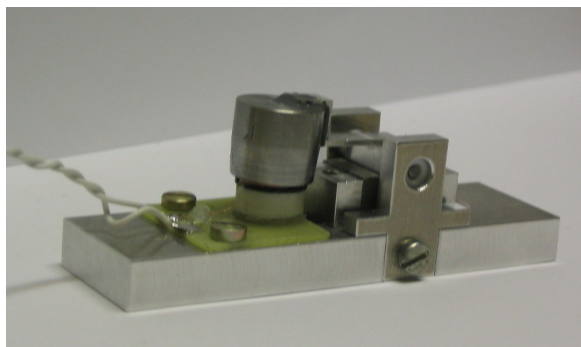
Během vývoje vibračního generátoru bylo vyrobeno několik zkušebních verzí a testovacích vzorků vibračního generátoru a jeho jednotlivých částí.

Jako první byla vytvořena nultá verze vibračního generátoru, na Obr. 4, která využívá podobnou konstrukci jako model generátoru v publikaci [V3]. Tato verze sloužila pouze pro testování možnosti výroby elektrické energie z vibrací a provedené experimenty potvrdily možnost využití tohoto způsobu výroby elektrické energie z vibrací. Vzorek však přijatelně fungoval až při vysoké amplitudě budících vibrací, jmenovitě okolo 0,5 mm. Konstrukce budícího obvodu a umístění cívky nebyly nejvhodnější a rezonanční mechanismus měl velmi malou citlivost na budící vibrace. Přesto se tento princip vibračního generátoru ukázal jako velmi slibný.



Obr. 4 Nultá zkušební verze generátoru

Další verze vibračního generátoru podle Obr. 5 vycházela z nulté verze generátoru a byly odstraněny základní nedostatky. Konstrukce tohoto testovacího vzorku vibračního generátoru, simulační modelování a výsledky měření jsou uvedeny v publikacích [V4, V5, V6, V7]. Použitím teflonových kluzných ložisek bylo sníženo mechanické tlumení v ose natáčení páky a tím byla vylepšena citlivost vibračního generátoru na budící vibrace.



Obr. 5 Vibrační generátor - verze 1.1

Takto vylepšená konstrukce rezonančního mechanismu s tuhostí založenou na odpuzujících se permanentních magnetech a uložení v kluzných teflonových ložiscích se ukázala jako velmi vhodná a citlivost na budící vibrace se ukázala jako přijatelná.

Konstrukce magnetického obvodu měla tvar bubnu s permanentním magnetem uvnitř. Cívka byla fixována s rámem generátoru a byla umístěna uvnitř bubnu. Relativním vybuzeným pohybem bubnu, tvořícího magnetický budící obvod, se indukovalo napětí. Průměr použité cívky byl poměrně malý vzhledem k celkovým rozměrům generátoru a tato konstrukce se nejevila z hlediska generovaného výkonu jako vhodná.

Ve stejné konstrukci rezonančního mechanismu byla ověřena i další konstrukční verze elektromagnetického obvodu, zobrazená na Obr. 6. Cívka je navinuta uvnitř pohyblivého bubnu a permanentní magnet s pólovými nástavci je pevně fixován k rámu generátoru.

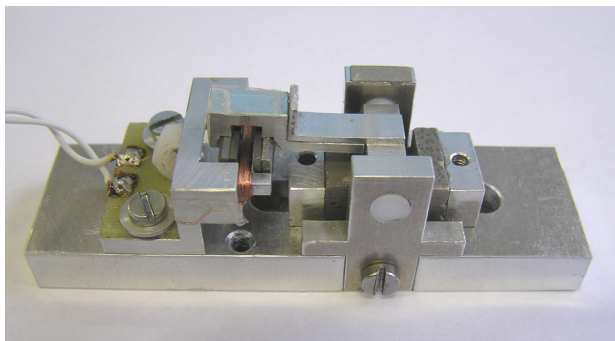


Obr. 6 Magnetický obvod vibračního generátoru - verze 1.2

Takto vytvořený generátor se neukázal vhodný již kvůli pohyblivé cívce a dále kvůli horší citlivosti vibračního generátoru na budící vibrace. Přitažlivé síly permanentního magnetu k bubnu cívky jsou totiž zachyceny v kluzném ložisku a tyto síly způsobí větší třecí síly v kluzném ložisku a výrazně se zvětší mechanické tlumení.

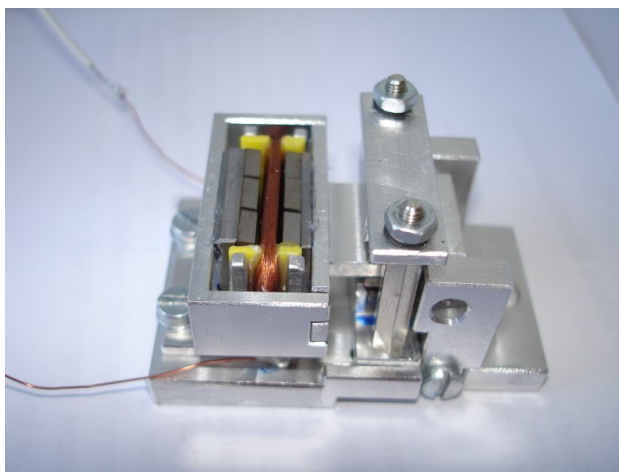
Na fotografii Obr. 7 je zachycena další verze vibračního generátoru s novou konstrukcí magnetického obvodu a cívky, která je popsána v publikacích [V8, V10].

Tato konstrukční koncepce se jeví jako přijatelná pro výrobu elektrické energie z vibrací.



Obr. 7 Vibrační generátor - verze 1.3

Na základě měření a poznatků získaných během testování tohoto vzorku vibračního generátoru byl vytvořen nový vibrační generátor, zobrazený na Obr. 8, jehož konstrukční uzly jsou však optimalizovány vzhledem k celkové konstrukci a generovanému výkonu.



Obr. 8 Funkční vzorek vibračního generátoru – verze 2

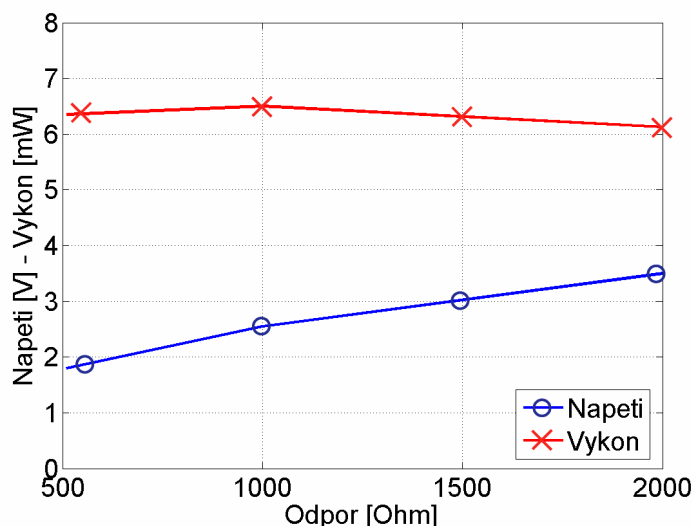
Parametry funkčního vzorku vibračního generátoru:

Celkové rozměry:	50x32x28 mm
Parametry Cívky:	1200 závitů / 550 Ω
Celková hmotnost:	okolo 50 g
Váha páky:	18,5 g
Moment setrvačnosti páky:	$6,5 \cdot 10^{-6}$ kg \cdot m ²
Max. napětí na prázdko:	$U_{\max} = 7$ V
Max. usměrněné napětí při optimální zátěži:	$U_{DC} = 5$ V
Max. výkon bez usměrňovače:	$P_{\max} = 13$ mW
Max. výkon s usměrňovačem:	$P_{\max} = 8$ mW

6 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

6.1 MĚŘENÍ V LABORATOŘI ÚMTMB FSI VUT V BRNĚ

V laboratořích ÚMTMB FSI VUT v Brně byl testován vibrační generátor ve vertikální poloze na vibrační stoličce. Vibrační generátor byl buzen v odpovídajícím frekvenčním pásmu 30 – 40 Hz a byla přitom přejížděna rezonanční frekvence generátoru. Vibrační generátor byl testován v zapojení bez zátěže a se zátěží. V obou případech byl zapojen bez usměrňovače a generoval střídavé napětí.



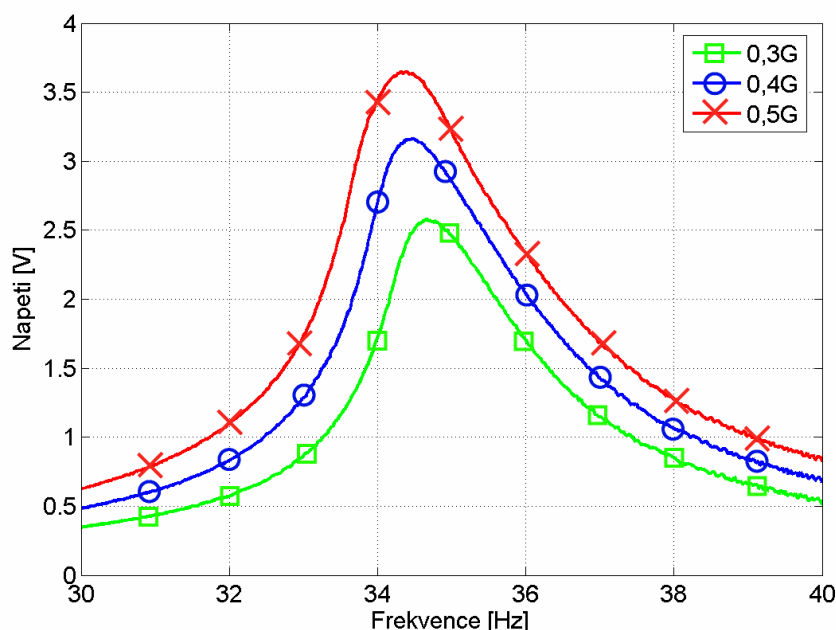
Obr. 9 Efektivní hodnota napětí a výstupní výkon vs. zátěžný odpor

Vibrační generátor byl buzen konstantní frekvencí vibrace s amplitudou zrychlení 0,5 G. Takto buzený vibrační generátor dával na svorkách výstupní napětí, jehož efektivní hodnota byla závislá na odporu připojené zátěže. Výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 9, kde jsou vyneseny i hodnoty generovaného výkonu. Vibrační generátor bez usměrňovače generuje maximální výkon při hodnotě odporu zátěže 1 k Ω . U vibračního generátoru není generována maximální hodnota výkonu při odporu zátěže shodná s vnitřním odporem cívky. To je způsobeno elektromagnetickým tlumením, které je ovlivněno připojenou zátěží. Maximální výkon je generován, jak už bylo několikrát zmíněno, pokud hodnota elektromagnetického tlumení je shodná s hodnotou mechanického tlumení, která závisí na kvalitě konstrukce rezonančního mechanismu.

Disipovaný výkon na připojené zátěži vytváří elektromagnetické tlumení a podstatně ovlivňuje vybuzený relativní pohyb v generátoru, jehož působením se indukují v cívce napětí. Maximální hodnota zrychlení budící vibrace při zapojení bez zátěže je 0,4 G. Při vyšší hodnotě amplitudy zrychlení vibrací dochází v generátoru k nárazu budícího obvodu do rámu. Pokud připojíme na svorky generátoru odporovou zátěž a odebírá se energie ze systému, vybuzený relativní pohyb budícího obvodu je ovlivněn elektromagnetickým tlumením. Maximální amplituda zrychlení budících vibrací při připojené optimální zátěži 1 k Ω je okolo

0,8 G a v porovnání se zapojením bez zátěže je hodnota zrychlení budící vibrace dvojnásobná. Zde je vidět podstatné ovlivnění relativního pohybu elektromagnetickým tlumením.

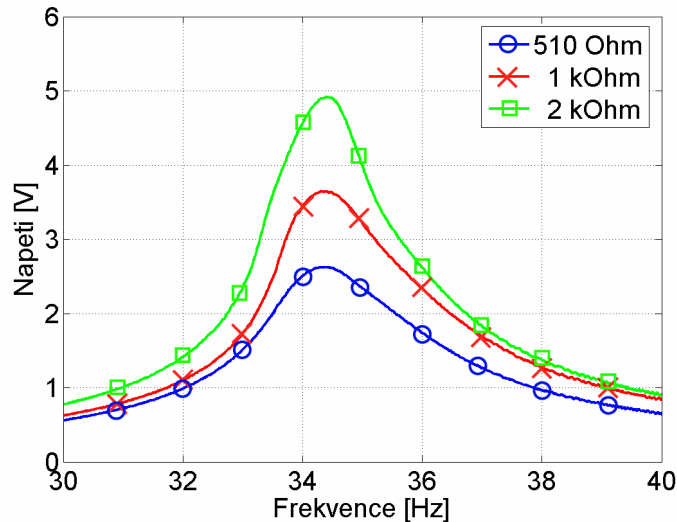
Experiment tedy potvrdil, že hodnotu elektromagnetického tlumení ovlivňuje velikost připojené zátěže. Měřením byla také zjištěna velikost připojené odporové zátěže, při které konkrétní vibrační generátor generuje maximální výstupní výkon. Tato hodnota připojeného odporu závisí na parametrech cívky a na mechanickém tlumení, způsobeném třením v teflonových ložiscích rezonančního mechanismu.



Obr. 10 Amplituda střídavého napětí vs. frekvence; zátěžný odpor 1 k Ω

Na Obr. 10 je zobrazena amplituda generovaného napětí v závislosti na frekvenci vibrací pro několik hodnot zrychlení vibrací. V grafu naměřených hodnot je zobrazena amplitudo - frekvenční charakteristika vibračního generátoru, která znázorňuje frekvenční rozsah použití vibračního generátoru. Resonanční frekvence vibračního generátoru není konstantní a závisí na nelinearitách v mechanismu generátoru. Díky nelinearitě tuhosti mezi odpuzujícími se permanentními magnety je resonanční frekvence závislá i na intenzitě budících vibrací. Resonanční frekvence se tak pohybuje v rozmezí 34 – 34,5 Hz.

Na Obr. 11 je znázorněna závislost amplitudy výstupního napětí na odporové zátěži při konstantním buzení vibrací s amplitudou 0,5 G. S velikostí připojeného odporu se výstupní napětí na tomto odporu zvyšuje. Hodnota elektromagnetického tlumení je pro větší odpor menší a tím relativní výchylka magnetického budícího obvodu je větší. Pro generování elektrické energie je vhodnější využívat větší relativní výchylku, která má větší relativní rychlost a lépe překonává tření v ložiscích. Tím se zvýší i citlivost vibračního generátoru na budící vibrace. Optimální odporová zátěž připojená k vibračnímu generátoru je zvolena z hlediska posouzení generovaného výkonu, napětí a citlivosti na budící vibrace.

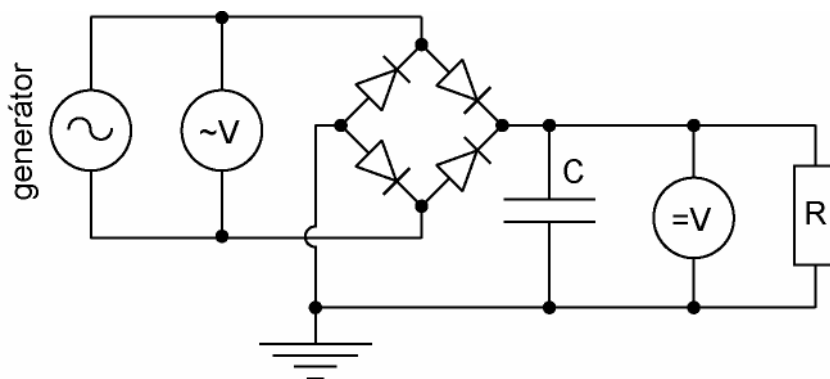


Obr. 11 Závislost amplitudy výstupního napětí na zátěžném odporu

6.2 MĚŘENÍ V LABORATOŘI CRC – EADS MNICHOV

Vibrační generátor byl testován i v laboratoři společnosti CRC EADS Mnichov, u které v rámci mé stáže probíhala část vývojových prací. Zde byl vibrační generátor testován měřící aparaturou na testování senzorů vibrací.

Při testování byl k vibračnímu generátoru připojen i usměrňovač tvořený z Schottkyho diod s velmi nízkým prahovým napětím a byl připojen i kondensátor 220 μF , viz schéma na Obr. 12. Generátor byl buzen vibracemi a byla měřena hodnota střídavého napětí před usměrňovačem a i stejnosměrné výstupní napětí na odporové zátěži.



Obr. 12 Schéma zapojení generátoru

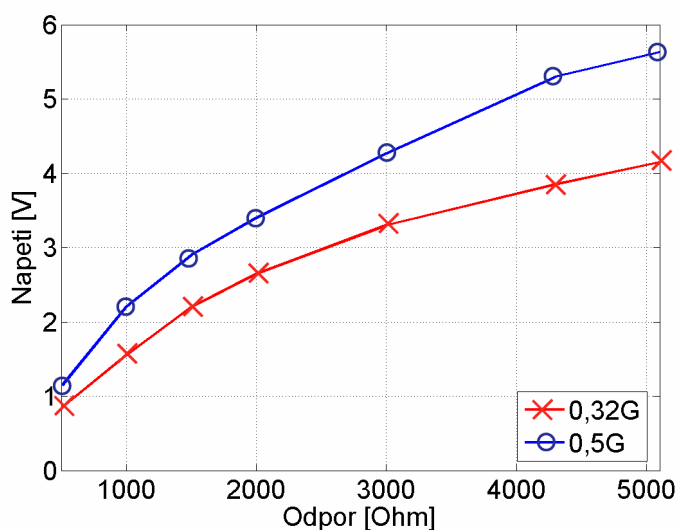
Generované výstupní napětí závisí na intenzitě vibrací a připojené odporové zátěži. Jak už bylo zmíněno výše, vnitřní odpor cívky je 550 Ω a výstupní napětí závisí na poměru tohoto odporu a odporu připojené zátěže. Výstupní napětí roste s hodnotou odporu připojené zátěže, ale maximální výkon závisí na hodnotě elektromagnetického tlumení a je maximální, pokud hodnota tohoto tlumení je shodná s hodnotou mechanického tlumení generátoru.

Proto maximální výkon nemusí být generován při připojení stejné odporové zátěže, jako je hodnota vnitřního odporu cívky. V tom je tento vibrační generátor rozdílný od obvyklých generátorů, kde se vliv reakce kotvy na parametry mechanického pohybu neuvažuje. Optimální připojená zátěž tak závisí na kombinaci kvality rezonančního mechanismu vibračního generátoru, budícím obvodu a konstrukci cívky.

Při připojení usměrňovače k vibračnímu generátoru se vibrační generátor chová odlišně, v závislosti na okamžité velikosti indukovaného napětí. Pokud velikost indukovaného napětí nedosáhne prahového napětí Schottkyho diody, usměrňovač se chová jako nepřipojená zátěž, čili hodnota elektrického tlumení je nulová. Teprve po překonání propustného napětí Schottkyho diod se začne usměrňovat generované napětí a proud prochází připojenou odporovou zátěží. V tomto časovém úseku je vibrační generátor ovlivňován i elektromagnetickým tlumením, které je závislé na připojené zátěži.

Takto připojený usměrňovač zvyšuje citlivost vibračního generátoru na budící vibrace. Při počáteční výchylce budícího obvodu je tento relativní pohyb tlumen jen třecími silami v kluzném ložisku. Až po překonání určité rychlosti, která vyvolá větší indukované napětí, než je propustné napětí Schottkyho diody, začne být vibrační generátor ovlivňován i elektromagnetickým tlumením, které není vůbec zanedbatelné. Úbytek generovaného napětí na diodách usměrňovače sice sníží výstupní výkon vibračního generátoru, ale to je nahrazeno zvýšením jeho citlivosti při velmi malých budících vibracích.

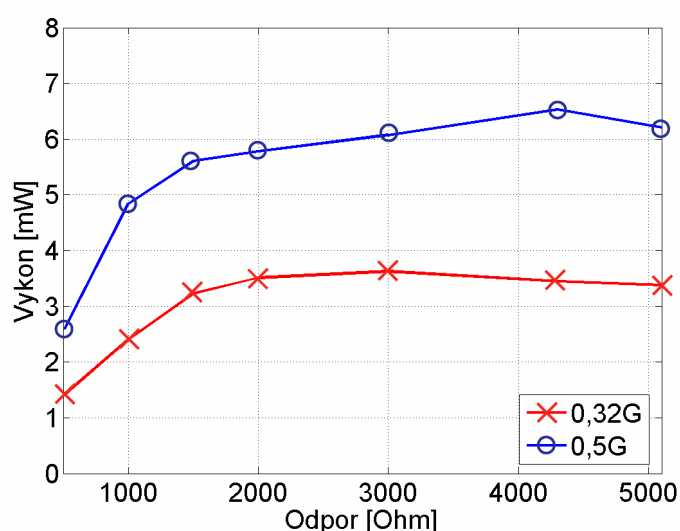
Při testování a měření byl vibrační generátor buzen vibrací se zrychlením 0,32 G a 0,5 G. K vibračnímu generátoru byly připojeny rozdílné odpory a byla analyzována optimální odporová zátěž tohoto vibračního generátoru. Maximální hodnota generovaného výkonu při obou hodnotách budících vibrací je dosažena s rozdílnou odporovou zátěží, což je způsobeno nelineárním chováním mechanismu reálného vibračního generátoru.



Obr. 13 Závislost stejnosměrného výstupního napětí na připojené zátěži

Na Obr. 13 je znázorněna hodnota generovaného usměrněného napětí, v závislosti na připojené odporové zátěži. Na Obr. 14 je vynesena generovaný výkon pro hodnoty zrychlení budící vibrace 0,32 G a 0,5 G.

Hodnota zrychlení budící vibrace 0,32 G vybudí v generátoru menší relativní výchylku. Vzhledem k nelinearitám se tlumení mění, a proto křivka výkonu je plochá. Pro hodnotu vibrací 0,5 G je relativní výchylka větší a mechanické tlumení se při připojení různých hodnot odporové zátěže výrazně nemění. Maximální hodnota výkonu odpovídá připojené zátěži s odporem 4,3 k Ω . Maximální generovaný výkon nemusí být optimální díky generované hodnotě napětí. Jak je vidět na Obr. 14, v určitém pásmu hodnot odporu připojené zátěže se hodnota generovaného výkonu výrazně nemění, ale výrazně roste hodnota výstupního napětí. Při hledání optimální připojené zátěže bereme ohled i na tuto skutečnost.

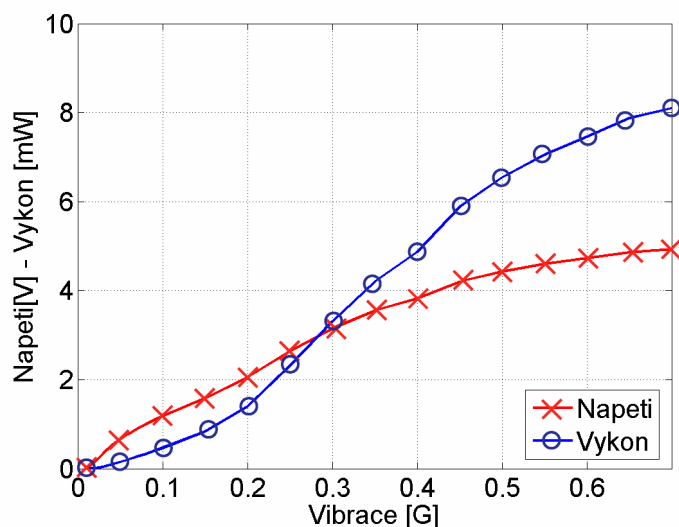


Obr. 14 Závislost výstupního výkonu na připojené zátěži

7 ZHODNOCENÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

Z výsledků měření a testování vyplývá vhodnost použití tohoto vibračního generátoru jako zdroje elektrické energie v místě zatíženého mechanickými vibracemi s málo proměnnou frekvencí vibrací. Tento vibrační generátor je vhodné použít pro napájení bezdrátových senzorů v leteckém průmyslu, konkrétně pro použití v helikoptéře, která má konstantní otáčky nosného rotoru. Frekvence vibrací je pak násobkem počtu párů listů a frekvence otáčení rotoru. Amplituda těchto vibrací velmi podstatně kolísá během letu, a proto je důležité, aby vibrační generátor byl schopen generovat elektrickou energii již při velmi nízké intenzitě vibrací, ale aby se přitom v konstrukci generátoru eliminovaly nárazy páky do rámu generátoru při špičkovém přetížení velmi vysokými vibracemi a rázy. Tento pracovní rozsah vibračního generátoru je získán z měření citlivosti generovaného výkonu a napětí na intenzitu budících vibrací.

Velmi důležitá vlastnost vibračního generátoru je jeho citlivost na budící vibrace. Udává nám pracovní pásmo intenzity budících vibrací, kdy generátor již začíná generovat dostatečnou hodnotu výkonu a výstupního napětí pro danou aplikaci až po intenzitu vibrací, kdy přestává pracovat správně. V případě tohoto vibračního generátoru je to hodnota vibrace, která vybudí maximální relativní výchylku, při které nedochází k rázům páky do rámu.



Obr. 15 Generovaného napětí a výkonu vs. efektivní hodnota budících vibrací

Na Obr. 15 je zobrazena citlivost vibračního generátoru na hodnotě zrychlení budících vibrací. K testovanému vibračnímu generátoru byla připojena odporová zátěž $4,3 \text{ k}\Omega$ a byl postupně zatěžován vibracemi s rostoucí hodnotou zrychlení. Vidíme, že vibrační generátor začíná generovat použitelné výstupní napětí pro elektronické obvody (okolo $2,5 \text{ V}$) při efektivní hodnotě zrychlení vibrací $0,25 \text{ G}$ a generovaný výkon je okolo 2 mW . Maximální hodnota vibrací, kdy páka s magnetickým obvodem nenarazí do rámu generátoru, je $0,7 \text{ G}$. Při těchto budících vibracích vibrační generátor generoval výkon okolo 8 mW při usměrněném výstupním napětí 5 V .

8 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá vývojem vhodného a pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro napájení bezdrátových senzorů. V práci jsou stručně popsány současné možnosti napájení bezdrátových senzorů a je zde vyzdvihnut význam Energy Harvesting generátorů, které využívají k získávání elektrické energie určitou formu okolní energie. Implementováním takového generátoru do bezdrátového senzoru se získá autonomní monitorovací člen, který je nezávislý na zdroji okolní energie. Celá práce je soustředěna na vývoj vibračního generátoru, který vyrábí elektrickou energii z vibrací.

Vhodným fyzikálním principem pro výrobu elektrické energie z daných budících vibrací o frekvenci okolo 34 Hz a generovaný výkon větší než 1 mW je využití Faradayova zákona elektromagnetické indukce. S využitím principu elektromechanické přeměny je navržena konstrukce vibračního generátoru, který se skládá s cívky, budícího obvodu s permanentními magnety a rezonančního mechanismu. Resonanční mechanismus svým naladěním na budící vibrace poskytuje relativní pohyb budícího obvodu vůči cívce a tím se indukují na závitech cívky elektromotorické napětí.

V rámci práce byl vytvořen lineární model obecného vibračního generátoru a na základě tohoto modelu byla provedena analýza generovaného výkonu a byly analyzovány podmínky pro generování maximálního výkonu. Dále byly porovnány jednotlivé fyzikální principy výroby elektrické energie z vibrací a na základě těchto poznatků byla vybrána konstrukce vibračního generátoru.

Na základě analýzy výkonu a simulačních výpočtů byl navržen model vibračního generátoru. S pomocí výsledků simulačního modelování byly vytvořeny testovací vzorky vibračního generátoru. Během celého vývoje vibračního generátoru byly jednotlivé vzorky vibračního generátoru testovány a bylo také testováno i několik zkušebních verzí jednotlivých částí vibračního generátoru.

Během vývoje vibračního generátoru bylo v simulačním modelu identifikováno mechanické tlumení reálného vzorku generátoru, způsobené třecími silami, a na základě měření byla provedena verifikace modelu s testovacím vzorkem vibračního generátoru.

Všechny dosažené poznatky a simulační výpočty byly použity při návrhu optimální konstrukce funkčního vzorku vibračního generátoru. Požadovaný generovaný výkon tohoto navrženého vibračního generátoru je okolo 5 mW a hodnota usměrněného generovaného napětí musí být větší než 2,5 V, aby bylo možno generátor použít jako zdroj elektrické energie pro běžnou elektroniku.

Vyvinutý funkční vzorek vibračního generátoru je schopen při maximálních vibracích generovat elektrickou energii s výkonem až 8 mW a stejnosměrné napětí 5 V. Při buzení průměrnou amplitudou vibrací, tj. hodnotou analyzované vibrace pod nosným rotorem helikoptéry, generuje vibrační generátor výstupní výkon okolo 4 mW a stejnosměrné napětí 3 V. Při zařazení vhodného výkonového elektronického obvodu pro usměrnění, stabilizaci výstupního napětí a akumulaci elektrické energie je tento vibrační generátor možno použít jako nevyčerpatelný zdroj elektrické energie.

Řešený vibrační generátor jako zařízení vyrábějící elektrickou energii z okolních vibrací představuje velký potenciál jako nevyčerpatelný zdroj elektrické energie pro nejrůznější aplikace. Touto prací byla ověřena možnost vyrábět takovýmto způsobem elektrickou energii pro bezdrátové senzory využitelné nejen v letectví, ale i pro běžné průmyslové využití (turbíny, obráběcí stroje, stavební stroje, automobily atd.).

LITERATURA

- [1] Agah, M., Baek, K., Potkay, J. A.: Design and Analysis of a Piezoelectric Vibration Powered MicroGenerator System, ME 553 Winter, 2002.
- [2] Allen, J. J., Smits, A. J.: Energy Harvesting Eel, Journal of Fluids and Structures, Volume 15, Number 3, 2001, pp. 629-640(12).
- [3] Amirtharajah, R., A. P. Chandrakasan: Self-Powered Signal Processing Using Vibration Based Power Generation, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1998, pp. 687-695.
- [4] Beeby, S. P., Tudor, M. J., Koukharenko, E., White, N. M., O'Donnell, T., Saha, C., Kulkarni, S. and Roy, S.: Micromachined silicon Generator for Harvesting Power from Vibrations. In Proceedings of The 4th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2004), pp. 104-107, Kyoto, Japan.
- [5] Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.
- [6] Casciati, F., Civera, P.: Power Harvesting for Wireless Smart Sensore, An International Workshop on Advanced Sensors, Structural Health Monitoring, and Smart Structures, Keio University, Japan, 2003.
- [7] Danielsson, O., Thorburn, K., Eriksson, M., Leijon, M.: Permanent magnet fixation concepts for linear generator, Fifth European wave energy conference, Cork, Ireland, 2003.
- [8] El-hami, M., Glynne-Jones, P., James, E., Beeby, S. P., White, N. M., Brown, A. D. and Hill, M.: Design and fabrication of a new vibration based electromechanical generator. Sensors and Actuators A 92, 2001, pp. 335-342.
- [9] Glynne-Jones, P., Beeby, S. P., White, N. M.: Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator. IEE Science Measurement and Technology 148(2), 2001, pp. 68-72.
- [10] 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, Volume 110, 2004, pp. 344-349.
- [11] Ching, N. N. H., Wong, H. Y., Li, W. J., Leong, P. H. W., Wen, Z.: A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 97-98, 2002, pp. 685-690.
- [12] James, E. P., Tudor, M. J., Beeby, S. P., Harris, N. R., Glynne-Jones, P., Ross, J. N., White, N. M.: An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 110, 2004, pp. 171-176.
- [13] Janiček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelování, FS VUT v Brně a PC-DIR Real, Brno, 1998.

- [14] Krikke, J.: Sunrise for Energy Harvesting Products, IEEE Pervasive Computing, Vol. 04, No. 1, 2005, pp. 4-8.
- [15] Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., Gershenfeld, N.: Parasitic Power Harvesting in Shoes, ISWC, vol. 00, no. Second, 1998, pp. 132.
- [16] Lal, A., Duggirala, R., Li, H.: Pervasive Power: A Radioisotope-Powered Piezoelectric Generator, IEEE Pervasive Computing, Vol. 04, No.1, 2005, pp. 53-61.
- [17] Lewis, F. L.: Wireless Sensor Networks, Chapter 4 In Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications edited by D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York, 2004.
- [18] Ma, W., Wong, M., Rufer, L.: Dynamic simulation of an implemented electrostatic power micro-generator, Workshop on DESIGN FOR MICRO & NANO MANUFACTURE, Montreux, Switzerland, 2005.
- [19] Mateu, L., Moll, F.: Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics, Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium, 2005.
- [20] Meninger, S., Mur-Miranda, J.-O., Amirtharajah, R., Chandrakasan, A., Lang, J.: Vibration-to-Electric Energy Conversion, IEEE Transactions on VLSI Systems, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 64-76.
- [21] Měříčka, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.
- [22] Mitcheson, P.D., Green, T.C., Yeatman, E.M., Holme, A.S.: Analysis of optimized micro-generator architectures for self-powered ubiquitous computers. In Proceedings UBIComp 2002, Goteborg, Sweden, pp. 5-6.
- [23] Mitcheson, P.D., Green, T.C., Yeatman, E.M., Holmes, A.S.: Architectures for vibration-driven micropower generators, IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Volume 13(no.3), 2004, pp. 429-440.
- [24] Mizuno, M., Chetwynd, D.G.: Investigation of a resonance microgenerator, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, Number 2, 2003, pp. 209-216.
- [25] Paradiso, J.A., Starner, T.: Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, IEEE Pervasive Computing, Vol. 4, No. 1, 2005, pp. 18-27.
- [26] Paradiso, J.A., Starner, T.: Human Generated Power for Mobile Electronics, in Piguet, C. (ed), Low-Power Electronics, CRC Press, Chapter 45, 2004, pp. 35-45.
- [27] Pončík, Z., Špérlová, A., Fiala, P.: Numerical analysis of vibrational generator, In Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on AEE 2005. 4th WSEAS International Conference on Applications of electrical engineering (AEE '05). Praha: WSEAS, 2005, str. 186-189.

- [28] Roundy, S. , Otis, B. P., Chee, Y.-H., Rabaey, J. M., Wright, P.: A 1.9GHz RF Transmit Beacon using Environmentally Scavenged Energy, ISPLED, Soul, Korea, 2003.
- [29] 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.
- [30] Roundy, S., Leland, E. S., Baker, J., Carleton, E., Reilly, E., Lai, E., Otis, B., Rabaey, J. M., Sundararajan, V., Wright, P. K.: Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers, IEEE Pervasive Computing, Vol. 04, No. 1, 2005, pp. 28-36.
- [31] Roundy, S., Leland, E., Baker, J., Carleton, E., Reilly, E., Lai, E., Otis, B., Rabaey, J., Sundararajan, V., Wright, P.K.: Vibration-Based Energy Scavenging for Pervasive Computing: New Designs that Increase Power Output, Accepted For Publication in IEEE Pervasive Computing, 2005.
- [32] Roundy, S., Rabaey, J. M., Wright, P. K.: Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: With Special Focus on Vibrations, Kluwer Academic Publishers, Boston MA, 2003.
- [33] Roundy, S., Wright, P. K., Pister, K. S. J.: Micro-Electrostatic Vibration-to-Electricity Converters, 2002 ASME IMECE, New Orleans, Luisiana, 2002.
- [34] Saez, M. L. M.: Energy Harvesting from Passive Human Power, PhD Thesis Project, Electronic Engineering, Polytechnic University of Catalonia, 2004.
- [35] Sharaf, R. , Badaly, W., Mause, W.: Piezoelectrical Micro-generator for Implantable Bio-devices, Third Canadian Workshop on MEMS, Ottawa, Canada, 2003.
- [36] Sood, R., Jeon, Y. B., Neony, J. H., Kim, S. G.: Piezoelectric Micro Power Generator for Energy harvesting, Proc. of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, 2004.
- [37] Sterken T, Baert K, Puers R, Borghs S: Power extraction from ambient vibration. In Proceedings of SeSens (Workshop on Semiconductor Sensors), Veldhoven, the Netherlands, 2002, pp. 680-683.
- [38] Strnad, J.: Návrh řešení elektromechanického mikrogenerátoru, Diplomová práce, VUT v Brně, FSI, 2003.
- [39] Williams, C. B., Yates, R. B: Analysis of a micro-electric generator for microsystems, Sensors and Actuators, A: Physical, A52(1), 1996, pp. 8-11.
- [40] ABC Magnet , <http://www.abcmagnet.cz>, ABC Magnet , 2006.
- [41] Bateria Slaný CZ, <http://www.bateria.cz>, Bateria Slaný CZ, 2006.
- [42] Berkeley Manufacturing Institute, BMI, <http://kingkong.me.berkeley.edu>, BMI,2006.

- [43] Department of Engineering, Australian National University, Dr. Shad Roundy, <http://engnet.anu.edu.au/DEpeople/Shad.Roundy>, Dr. Shad Roundy, 2006.
- [44] Energy Scavenging Discussion Group, <http://energyscavenging.anu.edu.au>, Energy Scavenging Discussion Group, 2006.
- [45] MEMS and Nanotechnology Clearinghouse, <http://www.memsnet.org>, MEMS and Nanotechnology Clearinghouse, 2006.
- [46] Perpetuum Ltd., <http://www.perpetuum.co.uk/products.htm>, Perpetuum Ltd., 2006.
- [47] Polytechnic University of Catalonia, High Performance IC Design Group (HiPIC), Electronic Engineering Department, <http://pmos.upc.es/blues/research/energyharvestingsystems/ees.htm>, HiPIC, 2006.
- [48] SEIKO Watch Corporation, <http://www.seikowatches.com>, SEIKO, 2006.
- [49] The Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Energy Harvesting, <http://www.darpa.mil/>, DARPA, 2006.
- [50] TIMA laboratory, The Micro and Nano Systéme, <http://tima.imag.fr/mns>, TIMA laboratory, 2006.
- [51] WISE Project, Integrated WIREless SENSing, <http://www.wise-project.org>, WISE, 2006.

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

- [V1] Hadaš, Z., Singule, V.: Studie realizovatelnosti vibračního mikrogenerátoru, Proceedings of the 7th International Symposium Mechatronika 2004, 2004, pp 26-31.
- [V2] Hadaš, Z., Singule, V.: Design of a Vibration Microgenerator, 2nd International PhD Conference on Mechanical Engineering - PhD 2004, Srní, 2004, pp. 31-32.
- [V3] Hadaš, Z., Singule, V.: The Design of a Vibration Microgenerator, Low Voltage Electrical Machines 2004, Brno, 2004, pp. 33-38.
- [V4] Z. Hadaš, V. Singule, Č. Ondrůšek: The comparison and assessment of different conception of vibration microgenerator construction, Inženýrská mechanika 2005, Svratka, 2005, pp. 101-102.
- [V5] Z. Hadaš, V. Singule, Č. Ondrůšek: The Comparison of the Simulation Results of the Vibration Microgenerator Model with the Measuring of the Vibration Microgenerator Prototype, Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005, Jarnołtówek, 2005, pp. 419-422.

- [V6] Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Mechanism of Vibration Microgenerator Based on Non-linear Stiffness, Inženýrská mechanika - Engineering Mechanics, Engineering Academy of the Czech Republic, Brno, 2005, pp. 19-24.
- [V7] Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Design and Simulating Modelling of Vibration Generátor, Simulation Modeling of Mechatronic Systems I, Brno, 2005, pp. 143-154.
- [V8] Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Tuning up Parameters of Vibration Generator, Engineering Mechanics 2006, Svratka, 2006, pp. 84-85.
- [V9] Singule, V., Hadaš, Z., Ondrůšek, Č.: Analysis of Vibration power generator, Engineering Mechanics 2006, Svratka, 2006, pp. 328-329.
- [V10] Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č.: Overall Tuning up of Vibration Generator and Choice of Energy Transducer Construction, 5th International Conference on Advanced Engineering Design 2006, Praha, 2006.
- [V11] Singule, V., Hadaš, Z., Ondrůšek, Č.: Analysis of Generic Energy Harvesting Vibration Generator, Engineering Mechanics 2006, 5th International Conference on Advanced Engineering Design 2006, Praha, 2006.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Zdeněk Hadaš
Datum a místo narození: 23. 5. 1980, Vsetín
Adresa: Kladeruby 121, 756 43 Kelč
E-mail: hadas@fme.vutbr.cz

Vzdělání:

SPŠ strojnická Vsetín **obor:** Strojírenství zaměření ekonomika
Zakončení – maturita
1994 – 1998

Magisterské studium

VUT v Brně **obor:** Aplikovaná mechanika - Mechatronika
Fakulta strojního inženýrství Zakončení – Státní závěrečná zkouška
1998 – 2003

Doktorské studium

VUT v Brně **obor:** Inženýrská mechanika
Fakulta strojního inženýrství Zakončení – obhajoba disertační práce
2003 – 2007

Pracovní stáž

EADS Mnichov – Německo European Aeronautic Defense and Space Company
Corporate Research Center München
7/2005 až 8/2006 – práce na vývoji *energy harvesting* zařízení vyrábějící el. energii z vibrací

Aktivity

- Spolupráce na výzkumném záměru MSM 0021630518: Simulační modelování mechatronických soustav.
- Spolupráce na vývoji vibračního generátoru v rámci projektu WISE www.wise-project.org, který se zabývá použitím bezdrátových technologií pro monitorovací zařízení a senzory leteckém průmyslu.

Pedagogická praxe

2003 – 2007 vedení cvičení předmětu **statika**

Znalosti a dovednosti:

Práce na PC: MS Office, ANSYS, MATLAB, Pro/Engineer, Pro/Mechanica, Inventor, SolidWorks, AutoCAD, LaTeX, Adobe SW

Jazykové znalosti: Anglický jazyk – středně pokročilý

SUMMARY

This Ph.D. thesis deals with an alternative of feeding wireless sensors. This alternative is using of the vibration generator which generates electrical energy from an ambient mechanical vibration. This vibration generator will feed wireless sensors without using of primary batteries. The generator extends time life of the wireless sensor and this sensor can be mounted without any problems inside engineering's constructions or can be placed inside embedded structures. The appropriately vibration generator can produce the required power.

The designed vibration generator will be used as source of energy for wireless sensors developed on base of WISE project. The WISE project researches using wireless sensors in aeronautics applications.

The vibration generator is tuned up to stable resonance frequency of the ambient vibration 34 Hz. The generator is excited by vibration with the amplitude range 50 – 150 μm , it means level of vibration 0.2 – 0.7 G. The size of generator is not limited, but the aim is design very small device. The size depends on possibility of the fabrication.

The vibration generator is excited by the mechanical vibration and its construction products relative movement of the magnetic circuit. This movement induces voltage on the coil due to Faraday's law. The vibration generator design is tuned up to the vibration frequency and the generator harvests maximal power during exciting by resonance frequency of the vibration. The design of magnetic circuit and coil is tailored to the resonance mechanism of the vibration generator. The output power depends on the level of vibration and the weight of oscillating mass. The harvesting power depends on quality of the resonance mechanism and the weight of moving mass.

Developed function product of vibration generator is capable generate useful electric power. The vibration generator generates maximal output power around 8 mW with DC voltage 5 V. The output power and voltage depend on the connected electrical load. The generator harvests output power around 4 mW and output voltage 3 V during excitation of an average vibration in an aeronautics application.

The vibration generator has the great potential as the inexhaustible source of electrical energy. This generator can provide sufficient electrical energy for wireless sensors in aeronautics application. The limitation of using vibration generator is usually the operating temperature range, size and weight.