



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

STUDIE ZÍSKÁVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE V LETECKÝCH APLIKACÍCH

STUDY OF ENERGY HARVESTING IN AERONAUTICS APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN BŘEZINA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK HADAŠ, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Březina

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

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studie získávání elektrické energie v leteckých aplikacích

v anglickém jazyce:

Study of Energy Harvesting in Aeronautic Applications

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech rozvoj bezdrátových technologií přinesl možnosti bezdrátového snímání a monitorování strojních soustav. S tímto rozvojem vzešel požadavek na vývoj pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro nejrůznější bezdrátové aplikace. Jednou z možností napájení, hlavně u leteckých aplikací, je využití okolních vibrací ke generování elektrické energie a autonomnímu napájení bezdrátových systémů.

Cíle bakalářské práce:

1. Vyhledejte v dostupných zdrojích informace o získávání elektrické energie z okolí pro vybranou aplikaci a vypracujte analýzu současného stavu.
2. Porovnejte jednotlivé konstrukční a fyzikální principy.
3. Vyberte vhodnou koncepci konstrukčního řešení generátoru a s využitím simulačního modelování navrhnete parametry této soustavy.

Abstrakt:

Motivací práce bylo objasnění možných řešení snížení počtu bezpečnostních kontrol obecného vzdušného dopravního prostředku s udržení požadované bezpečnosti letového provozu.

Mezi vhodným přístupy k řešení daného problému se jeví využití energy harvesting zařízení pro napájení bezdrátového monitorovacího systému konstrukce letadel při jejich provozu.

Práce pojednává o jednotlivých alternativách využití okolní energie dostupné při letovém provozu obecného vzdušného dopravního prostředku a způsobech jejich zpracování.

Práce rovněž obsahuje výběr konkrétního vhodného způsobu zpracování dostupné okolní energie a určení parametrů vybraného energy harvesting generátoru za pomoci simulačního modelování, tak aby splňoval výkonové požadavky na napájení senzorů monitorovacího systému.

Klíčová slova:

Energy harvesting, Energy scavenging, Aircraft health monitoring system, bezdrátové senzory, okolní energie, vibrace, elektromagnetický generátor

Key words:

Energy harvesting, Energy scavenging, Aircraft health monitoring system, wireless sensors, ambient energy, vibrations, electromagnetic generator

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod dohledem vedoucího bakalářské práce a na základě vědomostí z použité literatury a vědomostí získaných během studia.

V Brně dne 20. 5. 2011

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Zdeňku Hadašovi za odbornou pomoc, připomínky a návrh k přístupu řešení dané problematiky.

Dále bych chtěl poděkovat spolužákům a kamarádům za návrhy způsobů získávání dostupné literatury.

Úvod:	8
1 Energy harvesting.....	9
1.1 Rozdělení Energy Harvesting systémů:	9
1.2 MEMS zařízení.....	10
1.3 Okolní energie	10
2 Energy Harvesting pro letecké aplikace	12
3 Možné zdroje okolní energie v letovém provozu.....	13
3.1 Akustický hluk.....	13
3.2 Sluneční energie	13
3.3 Tepelná energie.....	13
3.4 Mechanická energie	14
3.4.1 Proudění okolního vzduchu.....	14
3.4.2 Vibrace.....	14
4 Fyzikální principy vhodných generátorů	16
4.1 Termoelektrické generátory.....	16
4.2 Vibrační generátory.....	17
4.2.1 Piezoelektrický generátor.....	17
4.2.2 Elektrostatický generátor	17
4.2.3 Elektromagnetický generátor.....	18
4.3 Porovnání generátorů pro danou aplikaci	18
4.4 Srovnání vibračních generátorů na základě principů přeměny energie	19
5 Technické požadavky pro napájení senzorů v leteckých aplikacích.....	20
6 Vhodné konstrukční principy Energy harvest generátorů	21
6.1 Termoelektrické generátory.....	21
6.2 Elektromagnetické generátory.....	21
7 Analýza elektromagnetického generátoru	25
7.1 Matematický model oscilátoru	25
7.2 Fyzikální model generátoru.....	26
7.3 Koncepce elektromagnetického generátoru.....	28
7.4 Simulační model generátoru	31
7.5 Výstup simulačního modelu generátoru.....	32
8 Závěr	35
9 Reference	36
10 Seznam příloh.....	39

Úvod:

Letecká doprava a k ní příslušející letecký průmysl drží v dnešní světové dopravě jednu z dominantních pozic. Technologický rozvoj a zvyšující se požadavky dnešní společnosti očekávají od leteckého průmyslu dvě protichůdné tendence. Snižující se finanční požadavky a zvyšující se míra bezpečnosti.

Kvůli udržení své pozice na trhu se letecký průmysl snaží neustále nacházet levnější řešení ať už vznikajících nebo běžných problémů při provozu letadel a jejich údržby. Kontroly a prověřování jednotlivých základních částí letadel se z bezpečnostních důvodů provádějí pravidelně po určitém počtu letových hodin. Tyto kontroly ovšem bývají velice zdoluhavé a náročné, což se projevuje i na jejich finančních a časových nákladech.

Dalším problémem je zvýšení faktoru zabezpečení. Vznik mikrotrhlin a jiných typů poškození konstrukce letadel nebo materiálů má zásadní vliv na udržení provozuschopnosti letadel a bezpečnost pasažérů či nákladu. Časná detekce vzniku těchto poruch může být při provozu letadla stěžejní a může hrát klíčovou roli pro záchranu lidských životů, času a peněz.

Jedno z možných řešení dnes nabízí systém umístění různých snímačů a senzorů příslušných poruch v kritických místech v konstrukci letadel. Požadavkem na tyto zařízení je jejich neustálý chod a funkčnost při provozu letadla. Sensory nebo snímače by měli být malé samostatné jednotky schopné sledovat možnosti vzniku poruch a mikrotrhlin, což přináší požadavek na řešení nově vzniklých otázek a problému s jejich napájením. Tyto samostatné jednotky mohou být umístěné na těžko dostupných místech nebo v místech s nevhodnými podmínkami pro umístění baterií založených na chemických bázích.

Energy harvesting je relativně nově vznikající obor v oblasti získávání elektrické energie z alternativních zdrojů okolní energie. Nabízí řešení problému s napájením samostatných jednotek senzorů a zároveň zachovává jejich bezdrátový charakter pro snadnou integraci zařízení do konstrukce letadel.

Tato práce se zabývá bližším seznámením s oborem Energy harvesting a jeho aplikací v leteckém bezpečnostním průmyslu, s čímž souvisí vhodná volba alternativních zdrojů elektrické energie resp. Energy harvest generátorů. Dále je zájmem této práce seznámení se základními a i užitými konstrukčními principy těchto generátorů. Závěrečným výstupem této práce by mělo být navržení základních parametrů soustavy vybraného vhodného generátoru pro letecké aplikace za pomoci simulačního modelování.

1 Energy harvesting:

Energy harvesting je moderní způsob získávání elektrické energie potřebné pro napájení většinou malých elektrických a elektronických zařízení přeměnou energie z okolí. Metody Energy harvesting vznikly jako odpověď na stále se zvyšující potřebu napájení snímačů a senzorů, které bývají umístěné na těžko dostupných místech, jako jsou například stavební konstrukce (budovy, mosty), nerozebíratelné části strojů, zařízení nedostupná kvůli jejich neustálému provozu nebo pro jejich napájení v prostředí nevhodném pro použití galvanických článků založených na chemickém principu. Hlavní výhodou energy harvesting generátorů je snaha eliminovat potřebu baterií pro podobné užití a tímto poskytnout neomezený autonomní zdroj elektrické energie, jehož trvanlivost je dána pouze mezním stavem únavy jednotlivých částí zařízení.

Časté využití Energy harvesting systémů je také jako sekundární zdroj napájení a elektrická energie jimi vyrobená je akumulována v akumulátorových bateriích nebo kondenzátorech [1].

1.1 Rozdělení Energy Harvesting systémů:

Mezi základní rozdělení Energy harvesting systémů patří rozdělení podle druhu strategie hospodaření s napájením.

Baterii podporující harvesting systém:

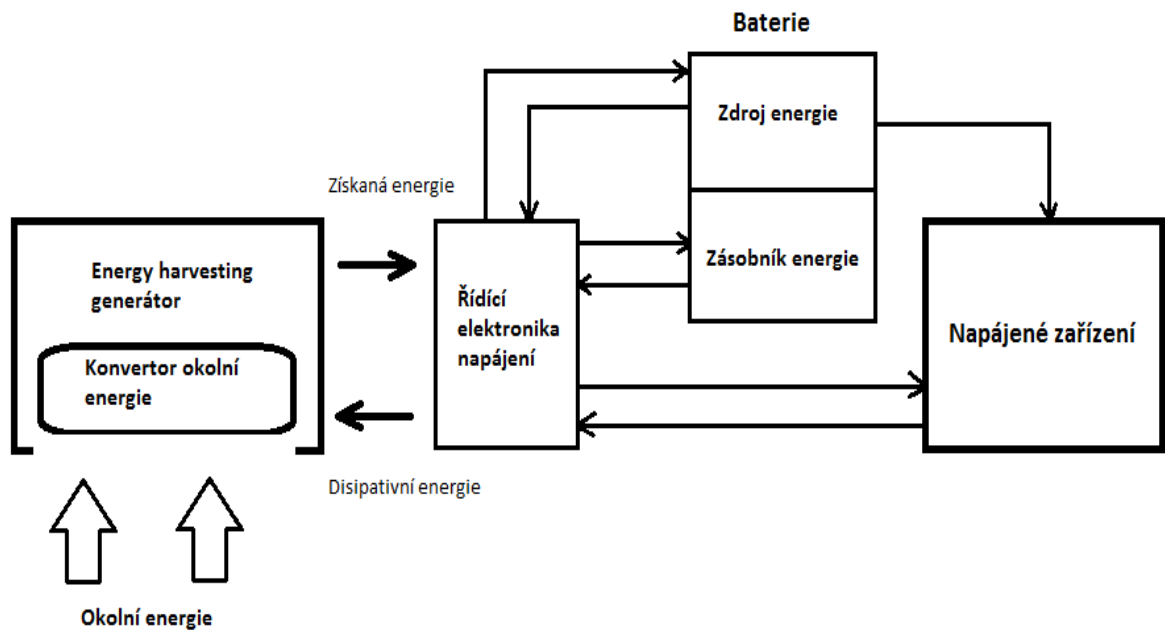
Baterie tvoří v systému hlavní zdroj napájení systému. Harvesting zařízení slouží jako sekundární zdroj, který ovšem zastává důležitou roli. Snižuje frekvenci nabíjení nebo výměny baterie systému a prodlužuje tak výdrž chodu celého systému [5].

Autonomní harvesting systém:

Systém postrádající přítomnost baterie. Je schopen provozu pouze, když je přítomen využitelný zdroj energie, ale na druhou stranu není omezen výdrží baterie, pouze svojí životností [5].

Autonomní hybridní harvesting systém:

Nejpoužívanější a obecně nejrozšířenější druh energy harvesting napájení. Baterie zde hraje roli zásobníku elektrické energie a harvesting zařízení se stará o chod systému a dobíjení baterie. Takto se velmi razantně zvýší doba chodu systému se skoro nulovými přerušeními [5].



Obr. 1 Schéma obecného energy harvesting systému

1.2 MEMS zařízení:

Za zmínku také stojí MEMS (Micro-electric-mechanical systems) zařízení, která jsou typickým představitelem energy harvesting systémů využívající energii prostředí. *MEMS zařízení jsou vyrobeny pomocí speciální MEMS technologie, což je metoda sofistikovaného umístění mikro-mechanických prvků do společné křemikové báze. Jedná se především o mikročivky, mikropohony, mikročerpadla a mikrosenzory [7].*

Tyto zařízení mohou neomezeně plnit svoji funkci, protože obsahují v jednom celku jednak elektronický subsystém na zpracování elektrické veličiny neboli postprocessing (saturace, zesílení aj.), tak i mechanický subsystém umožňující přeměnu fyzikální podstaty okolní energie na energii elektrickou. *Jejich výkon se pohybuje v rámci jednotek mikro wattů, rozměrově jsou velmi malé a pracují při frekvenci vyšší než 1 kHz s využíváním energie nízké hladiny okolních vibrací [1].*

1.3 Okolní energie:

Okolní prostředí může být zdrojem mnoha typů energie. Mezi hlavní typy patří mechanická, tepelná energie a energie elektromagnetického záření. Mezi hlavní zdroje energie patří v dnešní době sluneční záření, vibrace a teplotní gradient. Tyto zdroje nebo typy energie patří mezi nejrozšířenější, protože můžou poskytnout v dnešní době vhodným energy harvest generátorům dostatek zpracovatelné energie pro napájení nejrůznějších senzorů nebo jiných zařízení.

Typů okolní energie existuje ovšem celá řada, ale většina z nich je technologicky momentálně velice špatně zpracovatelná tak, aby mohla napájet potřebná elektronická zařízení. Proto se jejich rozvoji nevěnuje tolik pozornosti.

Mezi další možné zpracovatelné zdroje okolní energie patří například aktivní a pasivní lidská energie, rázy, tečení kapalin, proudění vzduchu, akustický hluk nebo kontroverzní RF (radio frequency) signál, jehož využití je v některých oblastech omezeno zákonem.

Porovnání výkonů u některých zdrojů okolní energie a jejich účinnosti přeměny najdeme v Tabulce 1.

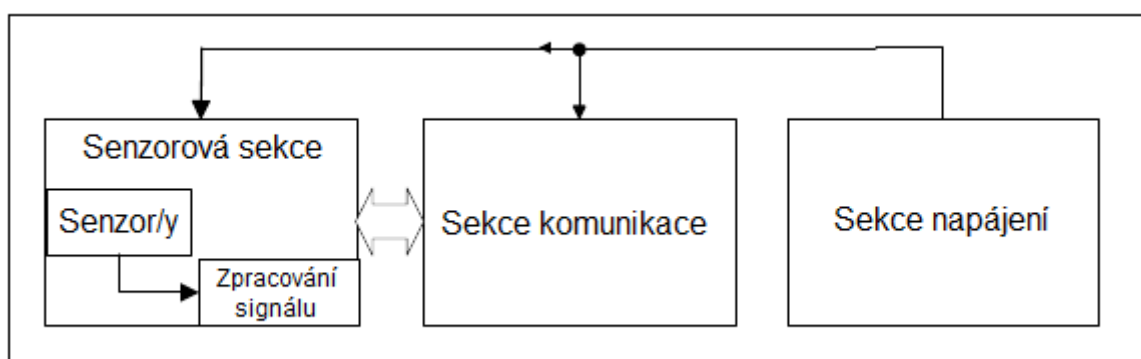
<i>Zdroj</i>	<i>Poskytovaný výkon</i>	<i>Účinnost</i>	<i>Produkovaný výkon</i>
Okolní světlo vnitřní vnější	0.1 mW/cm ² 100 mW/cm ²	5-30%	10 μW/cm ² 10 mW/cm ²
Vibrace/pohyb lidský průmyslový	0.5m@1Hz 1m/s ² @50Hz 1 m@5Hz 10m/s ² @1Hz	1-10%	4 μW/cm ² 100 μW/cm ²
Tepelná energie lidské průmyslové	20 mW/cm ² 100 mW/cm ²	± 0.1% ± 3%	30 μW/cm ² 1-10 mW/cm ²
RF mobilní telefon	0.3 μW/cm ²	± 50%	0.1 μW/cm ²

Tab. 1 Porovnání výkonů u některých zdrojů okolní energie a jejich účinnosti [3]

2 Energy Harvesting pro letecké aplikace:

Vznik cyklických poruch, mikrotrhlin, koroze nebo jiných poruch při letecké dopravě je stále zásadní problém bezpečnosti leteckého průmyslu. Kontrola zatěžovaných součástí a materiálů je proto nezbytnou samozřejmostí. Letecký průmysl se stále snaží nacházet inovace pro zlepšení sledování výskytu problémů, které by mohli ohrozit bezpečnost posádky a letadel. Kontrola nedostupných strojních částí je ale zdoluhavá, technicky namáhavá a finančně náročná. Proto vznikl neustále se rozvíjející technický obor, který speciálně pro letecké aplikace zkoumá a vyvíjí systémy nesoucí obecně název Aircraft Health Monitoring Systems [9]. Předmětem zájmu jsou soustavy monitorovacích zařízení poskytující informace o současném stavu letadla. Snahou je neustále nacházet nové sledovací principy pro vzniky poruch. Například, akustická emise je vhodnou metodou pro sledování vzniku trhlin v kovových strukturách.

Výkon potřebný pro napájení nejrůznějších snímačů a senzorů se pohybuje v řádech stovek mikro wattů [2]. Tato hodnota se týká energeticky nízko náročných (low-powered) zařízení, ovšem většina běžných senzorů potřebuje pro své napájení výkon alespoň v rozmezí 1- 5 mW. Umístit snímače jako bezdrátové samostatné jednotky je z hlediska jejich údržby a celkového energetického hospodářství letadla ta nejlepší možnost. Napájení snímačů se řeší buďto stále pomocí baterií, které ovšem, jak je již zmíněno výše, potřebují být po dosažení své výdrže vyměněny, nebo vhodněji pomocí energy harvest systémů.



Obr. 2 Funkční schéma jednotky bezdrátového snímače [10]

3 Možné zdroje okolní energie v letovém provozu:

Zdrojů okolní energie pro letecké aplikace je hned několik (vibrace, teplotní gradient, sluneční světlo dopadající na vrchní část letadla a akustický hluk).

3.1 Akustický hluk:

Akustický hluk může pomoci při detekování trhlin v materiálu, a také se může uplatnit i jako zdroj okolní energie. Princip získávání energie ze zvuku, je založen na šíření zvukové vlny, prezentovaná změnou tlaku vzduchu, a její tlakové působení na vhodný konvertor energie.

Zařízení využívající energii akustického hluku pracuje přibližně při 160dB a při konstantní zvukové frekvenci je schopno poskytovat výstupní výkon až 30mW. Hlavní složkou zařízení je Helmholtzův rezonátor s piezoelektrickým konvertorem energie [11]. Poskytnout tomuto generátoru vhodné podmínky stabilního provozu je ovšem velice obtížné. Navíc nedochází v dnešní době k dynamickému rozvoji konstrukčních principů nebo využití tohoto typu generátorů.

3.2 Sluneční energie:

Solární články jsou zařízení, které konvertují sluneční energii přímo na elektrickou energii za pomoci fotovoltaiického jevu [4]. Díky své vysoké účinnosti mají široké využití pro různá bezdrátová zařízení. Jednotlivé články mohou být zdrojem napětí například pro kapesní kalkulačky nebo mobilní telefony, solární panely zase mohou částečně nahradit celou elektrickou síť pro napájení menšího území.

Využití Solární energie není zcela definováno jako jedna z oblastí Energy harvesting, ale jako zdroj alternativní energie a jejich makro použití může dokonce nahradit celý pohon letadla.

I když solární články poskytují dostatek elektrické energie, může být jejich využití energy harvest charakteru pro letecké aplikace finančně nákladné a problematické, co se týče vedení drátů trupem letadla a zajištění stálých podmínek zdroje okolní solární energie.

3.3 Tepelná energie:

Další v přírodě se vyskytující zpracovatelná forma energie, jejíž zdroje mohou být lidé, zvířata, stroje nebo různé přírodní jevy. V leteckém průmyslu nabízí tepelná energie veliký potenciál využití pro napájení Aircraft health monitoring systémů. Tuto formu můžeme rozdělit podle principů, kterých využívá do dvou kategorií:

termoelektrický princip

Teplotní gradient je přímo měněn v elektrickou energii pomocí tzv. termočlánků využívajících Seebeckova efektu (resp. opačného Peltierova jevu). Principem termočlánku je rozdílná výstupní práce elektronů dvou odlišných kovů, na jejichž společném konci vzniká takto rozdíl potenciálu napětí. Velikost termoelektrického napětí je přímo úměrné rozdílu teplot na spojích dvou různých kovů [7]. Termočlánky jsou hlavně používány jako teplotní měřiče, ale v posledních letech mají užitek i jako zdroje elektrické energie. Velké teplotní rozdíly jsou esencí pro generování využitelné energie. Některé firmy poskytují v dnešní době generátory pracující už při teplotním gradientu 5°C a jsou schopné produkovat tak dostatečný

výkon pro napájení malých snímačů. Nabízejí tím veliký potenciál využití v biomedicině, vojenských a domácích bezpečnostních zařízeních nebo průmyslového monitoringu [8].

pyroelektrický princip

Dalším způsobem je využívání pyroelektrického jevu, což je schopnost některých látek při ohřívání nebo ochlazování produkovat elektrické napětí nebo proud. Výhodou pyroelektrického principu oproti termoelektrickému je, že pyroelektrické materiály jsou stabilní i při teplotách okolo 1200°C, můžou takto využívat vysokoteplotních zdrojů a zvýšit termodynamický účinek. Nevýhodou je, ale že potřebují teplo zdroje měnící se s průběhem času, proto také produkují elektrickou energii po malých nepravidelných dávkách [8].

Tepelná energie patří v leteckých aplikacích mezi hlavní zdroje okolní energie. Její využití je založeno především na termoelektrickém principu, kdy jsme schopni dosáhnout vysokých teplotních rozdílů mezi okolním vzduchem a vnitřní částí letadla. Pyroelektrický princip bohužel kvůli zachování konstantního napájení zatím nenachází v leteckých aplikacích své vhodné využití.

3.4 Mechanická energie:

Využití mechanické energie má v oblasti Energy Harvestingu velice významnou pozici. Nabízí široké spektrum využitelných principů pro přeměnu energie (piezoelektrický, elektromagnetický, elektrostatický jev) a také velké množství zdrojů okolní energie. Zdrojem mechanické energie je pohyb hmoty (vibrace, pohyb lidského těla, rázy, tečení kapalin, proudění vzduchu).

Mezi námi nejsledovanější zdroj okolní energie patří vibrace. Vibrace se vyskytují v průmyslovém a dopravním odvětví velice často a poskytují tak dostatečné množství zpracovatelné okolní energie.

3.4.1 Proudění okolního vzduchu

Proudění okolního vzduchu lze také využít jako zdroj okolní energie. Generátory využívající proudění vzduchu většinou pracují na podobném principu jako vibrační generátory, nejdříve proud vzduchu konvertují na vibrace a ty následně pomocí elektromagnetického, piezoelektrického nebo elektrostatického principu mění na elektrickou energii. Konstrukčních principů může být pro tento zdroj okolní energie samozřejmě více (mikroturbíny).

Vývoj generátorů v této oblasti je zatím v ranních fázích. Většinou existují generátory pro proud vzduchu o rychlosti kolem 5m/s pro slabé nárazy vzduchu Helmholtz-rezonanční generátory a pro silnější nárazy vzduchu větrolamně založený generátor [22]. Výkon získaný s prouděním vzduchu je maximálně zatím 1,1mW při ideálních podmínkách [21]. Vhodné užití pro tyto generátory je např. jako MEMS zařízení pro snímání rychlosti vzduchu na křídlech atd.

3.4.2 Vibrace

Získávání elektrické energie z vibrací je založeno na rezonanci mezi oscilující hmotou a částí generátoru, která slouží jako elektromechanický konvektor [6].

Při provozu se na konstrukci letadla objeví v různých místech vibrace různých frekvencí a amplitud.

Aby vibrační generátor byl schopen přeměnit mechanickou energii na energii elektrickou, využívá těchto principů:

piezoelektrický princip

Piezoelektrický princip spočívá v deformaci nebo napínání piezoelektrických materiálů, které jsou schopny při takovémto zatěžování měnit vlastní rozložení elektrického náboje a tím i vlastního elektrického pole. Tato změna je úměrná velikosti vnějšího zatížení [8].

elektrostatický princip

Elektrostatický princip využívá generování elektrického napětí mezi dvěma deskami kondenzátoru, který ale musí být již nabit určitým počátečním nábojem. Změna elektrického potenciálu, čili vznik napětí, je dosažena měnící se vzdáleností desek kondenzátoru.

elektromagnetický princip

Tento princip využívá Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Spočívá v generování elektrické energie cívkou nacházející se v měnícím se vnějším magnetickém poli.

Zpracování a získávání energie z vibrací pro napájení senzorů a snímačů v leteckém průmyslu je vhodnou metodou s velkým a neustále se rozvíjejícím potenciálem. Častým principem vhodným pro přeměnu mechanické energie vibrací na energii elektrickou v námi studované oblasti je elektromagnetický princip, který nabízí vhodné konstrukční řešení a je schopen poskytovat dostatečný výkon. Často realizovaným principem bývá také piezoelektrický princip s využitím v oblastech s vyššími frekvencemi vibrací.

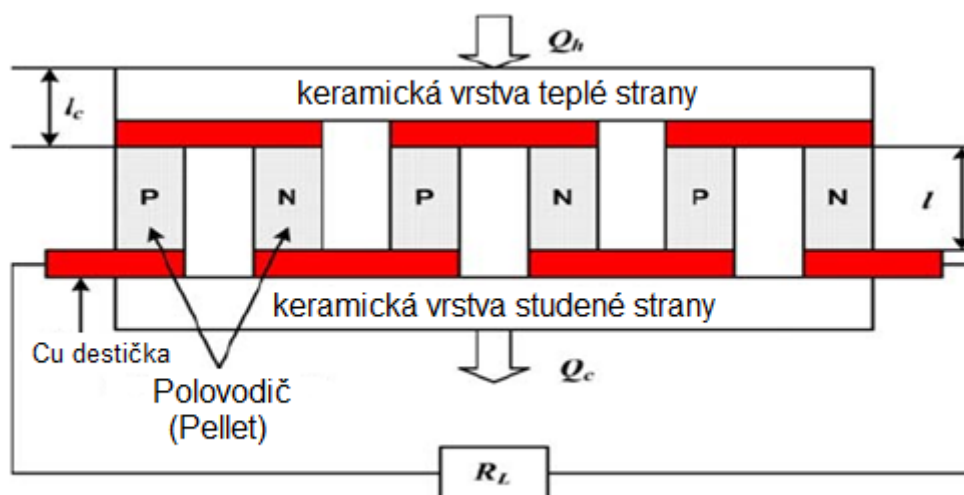
4 Fyzikální principy vhodných generátorů:

Ze zhodnocení vhodných zdrojů okolní energie pro letecké aplikace, vyplývající z výše uvedeného textu, vychází najevo, že nejvíce používanými Energy harvest generátory jsou termoelektrické generátory a vibrační generátory.

Existuje mnoho konstrukčních řešení a realizací daného typu generátoru založených na různých fyzikálních zákonech nebo jejich kombinací. Pro lepší orientaci si nyní uvedeme konstrukční principy vhodných generátorů (termoelektrické a vibrační) založených na základních fyzikálních principech:

4.1 Termoelektrické generátory:

Termoelektrické generátory využívají termočlánků, které generují elektrickou energii z teplotních rozdílů mezi teplotou vnitřní části kabiny letadla (okolo 20°C) a částí pod pláštěm letadla (často až -50°C), což je dostatek pro získání dostatečného výkonu potřebného pro napájení snímačů. Pro zvýšení získané elektrické energie se používá více termočlánků zapojených do série [12].



Obr. 3 Schéma jednoduchého termoelektrického generátoru [13]

Velikost rozdílů potenciálů napětí na dvou koncích daného kovu o rozdílných teplotách je definována Seebeckovým koeficientem α , jenž společně s tepelnou vodivostí a elektrickým odporem charakterizuje daný kov jeho součinitelem efektivnosti Z [15]. Teplotní rozdíly od -50°C do +80°C (Což při vhodné instalaci lze docílit i v leteckých aplikacích) zaručují např. pro materiál Bi_2Te_3 velice vysoký součinitel efektivnosti (jeho hodnota se blíží 1) [15].

Nutno dodat, že požadavky zajištění dostatečného rozdílu potenciálů napětí dvou kovů při jejich spojení tak, aby byly oba kovy zároveň dostatečně odolné proti vlivům okolí a tím pádem si zachovávali stabilní vlastnosti v průběhu času, splňují pouze určité dvojice kovů doporučené dle normy IEC 584-1, respektive ČSN IEC 584-1, nebo EN 60584-1 [16].

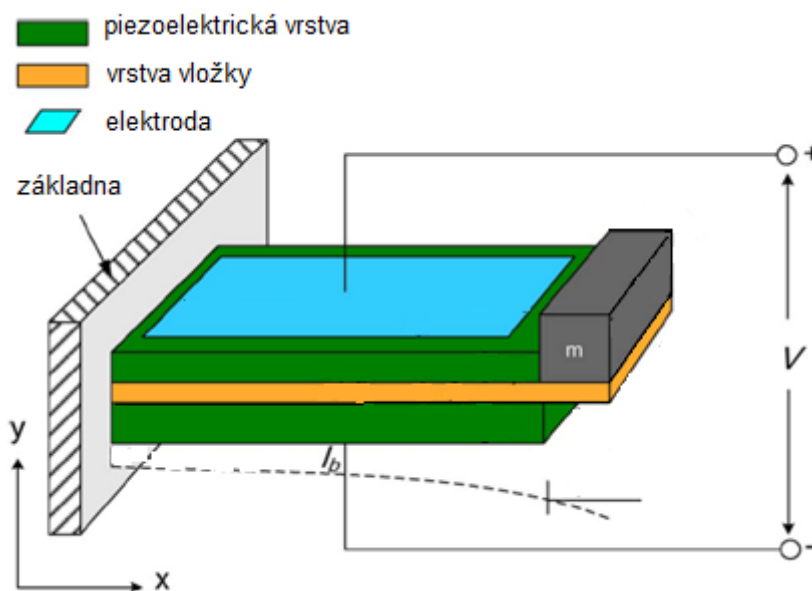
4.2 Vibrační generátory:

Hlavními částmi tvořící vibrační generátor jsou rezonanční mechanismus, vybaven vhodným konvertorem okolní energie na energii elektrickou, a elektrická zátěž. Rezananční mechanismus je založen na kombinaci hmotnosti m , tuhosti k , odporu b a je buzen okolními vibracemi.

Celý rezonanční mechanismus je svými parametry naladěn na charakter okolních vibrací, tak aby byl s nimi možná co nejlépe v rezonanci, protože snahou je docílit u kmitající hmotnosti m dostatečný relativní pohyb vůči konstrukci generátoru spojeného s vibrující hmotou [1].

4.2.1 Piezoelektrický generátor:

Obecný piezoelektrický generátor je obvykle sestaven z vetknutého nosníku, jenž je tvořen nebo obsahuje piezokeramický materiál, a břemene. Tento nosník představuje tuhost soustavy a vibrující břemeno upevněné na nosníku zase hmotnost soustavy. Při pohybu břemene dochází k namáhání piezokeramického materiálu a k následnému generování elektrické energie.

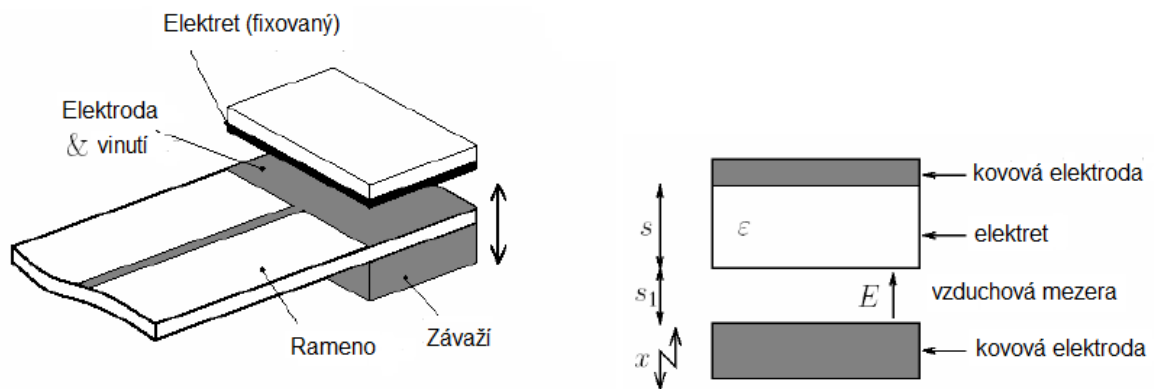


Obr. 4 Piezoelektrický generátor [14]

4.2.2 Elektrostatický generátor:

Elektrostatický generátor obvykle představuje soustavu dvou destiček s elektrickým nábojem, které se vůči sobě přibližují nebo vzdalují, čímž je generována elektrická energie. Tuhost soustavy nebo hmotnost můžeme určit až z jednotlivých konstrukčních principů.

Např.: mezi jedno z obvyklých konstrukčních řešení patří fixovaný nosník s tuhosti k , na jednom konci zatížený oscilujícím břemenem m s připevněnou destičkou, která společně s břemenem kmitá vůči jiné, pevně fixované destičce.

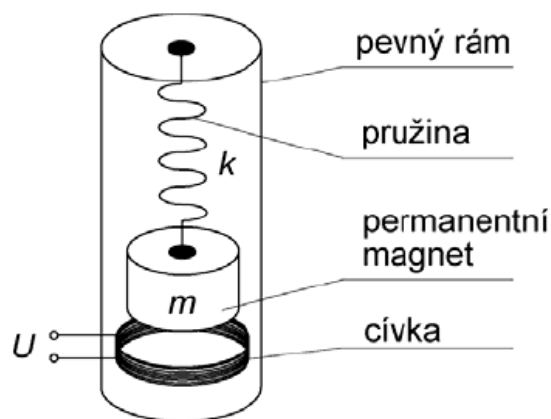


Obr. 5 Elektrostatický generátor [1]

4.2.3 Elektromagnetický generátor:

Aby mohlo dojít elektromagnetické indukci, tak se musí uskutečnit vzájemný pohyb magnetu a cívky. Nachází-li se cívka v měnícím se magnetickém poli, generuje se na jejím výstupu napětí U . Magnet nebo vodič (podle typu konstrukce) tvoří hmotnost m a kmitá většinou na pružině o tuhosti k .

Výsledná výstupní elektrická energie je závislá na velikosti magnetického toku procházejícího cívkou, aktivní délce a počtu závitů cívky, celkového odporu obvodu generátoru a rychlosti kmitavého pohybu magnetu vůči cívce.



Obr. 6 Elektromagnetický generátor [1]

4.3 Porovnání generátorů pro danou aplikaci:

Pro napájení aircraft health monitoring systémů nelze určit jednoznačně vhodný energy harvest generátor. Každá konstrukce generátoru má své výhody i nevýhody a navíc existuje celá škála jejich využití a implementování do konstrukce letadla.

Termoelektrický generátor patří dnes mezi rozšířené generátory používané v leteckých aplikacích. Jeho výhodou je schopnost nepřetržitě napájet daný senzor, na druhou stranu je někdy velice obtížné zajistit nepřetržitý teplotní spád při práci generátoru.

Provoz letadla nabízí celou škálu různých vibrací, které by mohli být vhodné jako zdroje okolní energie.

Samozřejmě i vibrační generátory mají své nevýhody podle typu konstrukce nebo principu, který využívají. Jejich výhodou je schopnost nepřetržitého dlouhodobého provozu za přítomnosti okolních vibrací. Jejich společnou nevýhodou ovšem je nutnost manuálně naladit jejich parametry na frekvenci budících vibrací.

generátor	termoelektrický	vibrační
Výhody	-schopnost nepřetržitého DC napájení	-letadla nabízejí velké množství energie v podobě vibrací
Nevýhody	-obtížná integrace (teplotní rozdíly vně a uvnitř letadla)	-nutnost nastavení parametrů do rezonance s okolními vibracemi

Tab. 2 Srovnání termoelektrického a obecného vibračního generátoru [9]

4.4 Srovnání vibračních generátorů na základě principů přeměny energie:

Elektrostatický generátor je rozměrově nejmenší, může být implementovaný do konstrukce letadla přímo nebo je využíván při konstrukci MEMS zařízení [1]. Jeho nevýhodou je nutnost nabíjet desky kondenzátoru počátečním elektrickým nábojem, proto je nutné pro zajištění jeho správného provozu kooperovat s jiným zdrojem elektrické energie.

Piezoelektrický generátor pracuje při širokém spektru frekvencí, poskytuje obecně vysoký výkon a vůbec je nyní nejpoužívanějším energy harvest generátorem v leteckých nebo jiných průmyslových aplikacích. Jeho nevýhodou je ale vysoký vnitřní odpor při nižších frekvencích a malý poskytovaný proud. [1]

Elektrodynamický generátor poskytuje obecně malé výstupní napětí, je-li rozměrově omezen. Při větších rozměrech je schopen, na druhou stranu, poskytnout dostatečný výkon a i napětí.

Generátor	<i>piezoelektrický</i>	<i>Elektrostatický</i>	<i>elektromagnetický</i>
Složitost napájecího procesu [8]	velká	Malá	velká
Obvyklá velikost [8]	makro	Integrovaný	makro
nevýhody	-Nízká hodnota proudu -vysoký vnitřní odpor při nižších frekvencích	-Potřeba přídavného zdroje -Mechanický doraz [1] -nedostatečný výkon	Nízká hodnota napětí
Výhody	-velký výkon -široké spektrum využití	-rozměry -schopnost integrace (MEMS)	-velký výkon -nejvhodnější využití pro frekvence do 100 Hz
frekvence	stovky Hz až řád kHz	řád kHz	desítky až stovky Hz

Tab. 3 Porovnání vlastností vibračních generátorů

5 Technické požadavky pro napájení senzorů v leteckých aplikacích:

Pro získání přehledu o výkonu potřebném k chodu běžného senzoru nebo snímače použijeme jako příklad platformu samostatného senzoru řízeného nízko- spotřebním mikrokontrolerem (TI MSP430 series) a 2,4 GHz IEEE 802.15.4 RF vysílačem (TI Chipcon 2420 series). Základní požadavky na velikost proudu a výkonu pro jednotlivé operace jsou uvedeny v tabulce 3.

Odběr informací, vzorků	0,16 mA	0,53 mW
Přesměrování, přepínání	4,77 mA	15,7 mW
Zapnutí	0,75 mA	2,5 mW
vysílání	14,95 mA	49,3 mW
nečinnost	0,07 mA	0,2 mW
Průměr	0,87 mA	2,9 mW

Tab. 4 Spotřeba proudu a výkonu samostatné jednotky senzoru [15]

Tyto hodnoty jsou měřeny na jednotce s vnitřním odporem 5 k Ω , pro dosažení velké spotřeby. Operační napětí je 3,3 V a průměrný odběr výkonu 2,9 mW [15].

Jedná se ovšem pouze o jeden určitý senzor, který nám ale dává představu o potřebném napájení senzorů. Ve skutečnosti se potřebné výkony harvest generátorů pohybují v rozmezí 1-5 mW pro běžné senzory, konstruované za tímto účelem. Nutno také podotknout, že výrobci nových nízkonákladových senzorů neustále s novým vývojem svoje nároky na napájení senzorů snižují.

Další požadavky na harvest generátory je omezení pracovními podmínkami, které mohou být za chodu letadla poskytnuty generátorům.

Frekvence vibrací letadla je v různých částech konstrukce různá, ovšem známé největší amplitudy vibrací se vyskytují na frekvencích 17, 34, 120 Hz se zrychlením v amplitudě o rozmezí 0,1 – 1 G. Tyto hodnoty se ovšem v různých letových podmínkách a různých typech letadel odlišují. Proto obecně uvažujeme většinou frekvence do 100 Hz.

Teplotní rozdíly, které mohou být poskytnuty termoelektrickým generátorům, jsou často až 70 K.

6 Vhodné konstrukční principy Energy harvest generátorů:

Jako modelové nebo příkladné funkční a užitě konstrukce generátorů jsou uvedeny pouze ty, které by mohli splňovat požadavky pro napájení potřebných senzorů uvedené výše a zároveň jsou schopné nabídnout reálnou možnost integrace do konstrukce letadla. Pro práci s patentovými databázemi jsme využili vyhledávacího softwaru Goldfire.

6.1 Termoelektrické generátory:

Na keramické bázi založený termoelektrický generátor **Eureca TEG1-9.1-9.9-0.8/200** [15] obsahuje 66 spojů, zabírá plochu 90 mm² a váží 1kg. Tento generátor dokáže už při teplotním rozdílu 40K poskytovat teoreticky výkon až 33 mW za předpokladu, že jeho oteplované a ochlazované plochy jsou napojeny přímo na příslušné zdroje tepla resp. chladu. Jejich požadovaný rozměr je aspoň 500- 700 cm², aby se tímto odstranilo parazitní teplo resp. chlad. Tento generátor Eureca může být vhodným energy harvestem pro letecké aplikace, kde díky teplotním rozdílům až 70K, může poskytnout napětí 0,945V a dodat tak potřebný výkon až 101 mW. Hodnota tohoto výkonu je ovšem simulovaná a skutečná hodnota při testování spadla až na 20mW, což ale stále vyhovuje našim požadavkům [15]. Výzvou pro zefektivnění tohoto generátoru je nalezení vhodného systému izolace mezi oteplovanými resp. ochlazovanými plochami, tak aby nedocházelo k přerušení teplotního spádu.

Dalšími možné řešení termoelektrických generátorů nabízejí tzv. Peltierovy články. Peltierovy články se prvotně používají k chlazení např. počítačových procesorů. Podstatou těchto článků je využití opačného Peltierova jevu (obrácený Seebeckův jev).

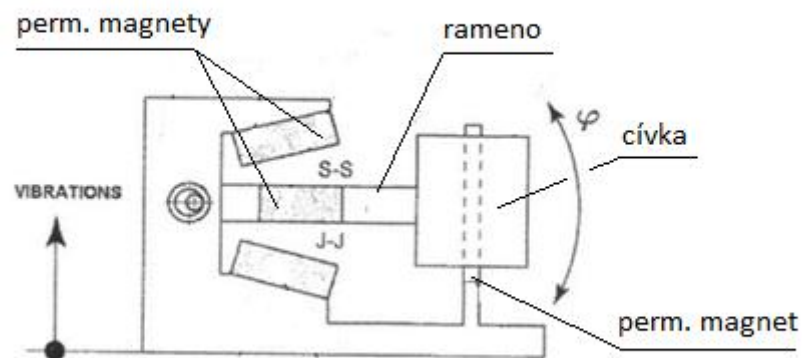
Dva odlišné kovy jsou zde polovodiče, které při zahřívání zvětšují svoji elektrickou vodivost. Na spojích těchto dvou polovodičů vzniká hradlová vrstva a elektrony tak nakonec putují z kovu s větší výstupní prací do kovu s menší výstupní prací. Při přechodu hradlovou vrstvou tak elektrony uvolňují přebytek energie v podobě tepla do okolí. Zároveň při přechodu touto vrstvou v opačném smyslu naopak elektrony si z okolí berou energii v podobě tepla. Hlavním typem polovodičů v Peltierových člancích bývá vizmut – tellur [16].

Nevýhodou je lehká možnost přehřátí nebo nevýhoda difuze mědi do polovodičového materiálu, která bývá užitá při konstrukci článku [16].

Termoelektrické generátory nenabízejí velkou paletu možných konstrukčních řešení. Vzájemně se liší většinou rozměry, typem kovů nebo jinými parametry. Peltierův článek užitý jako termoelektrický generátor se také odlišuje od jiných termoelektrických generátorů pouze typem materiálu a tím i s vlastnostmi dějů spojených (při průtoku proudu hradlovou vrstvou).

6.2 Elektromagnetické generátory:

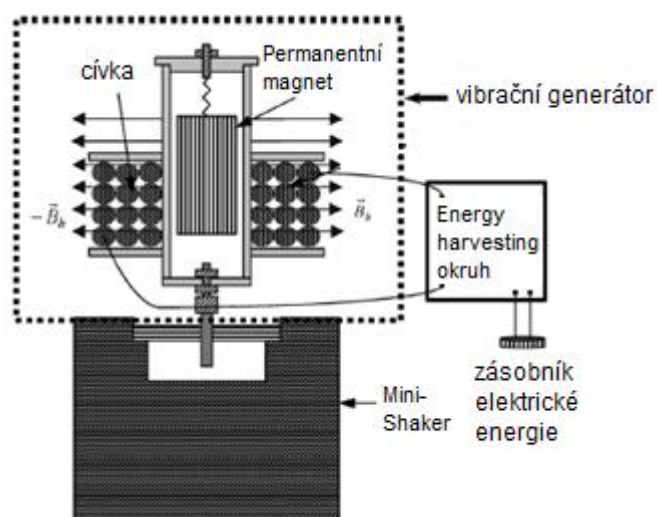
Elektromagnetické generátory můžeme podle konstrukčních principů rozdělit do několika skupin. Do jedné takové skupiny patří například generátory, kde hlavní závaží v podobě permanentního magnetu nebo cívky kmitá v prostoru na rameni spojeném s konstrukcí generátoru. Rameno v podobě kyvadla je většinou v krajních pozicích odpuzováno pružinami nebo magnety, může ovšem také být spojeno s konstrukcí generátoru pevnou vazbou a zajišťovat tak oscilaci svojí vlastní pružností.



Obr. 7 Elektromagnetický generátor s oscilující cívkou na rameni [P1]

Elektromagnetický generátor s magnetickým tlumením pocházející z univerzity Vysoké učení technické v Brně. Zde magnet osciluje na kyvadlu, které je v krajních pozicích odpuzované magnety. Tento systém řešení umožňuje snadné ladění rezonanční frekvence posuvem magnetu po délce ramene kyvadla a zároveň se tak částečně zbavuje mechanického tlumení. Při zrychlení v amplitudě 0,1 G podařilo získat výstupní výkon 3 mW a při zrychlení v amplitudě 0,5 G výstupní výkon až 26 mW. Rozměry generátoru jsou 50 x 40 x 40 mm [6]. Patent [P7] nabízí další konstrukční řešení magnetů kmitajících na rameni.

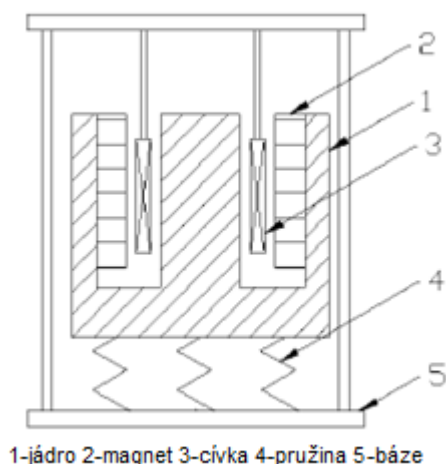
Další velkou skupinou jsou generátory ve tvaru dlouhé tuby, v které osciluje většinou permanentní magnet. Tato tuba bývá z vnější strany obepnutá cívkou. Oscilace magnetu je zajištěna zase pomocí magnetů na koncích tuby tak, aby odpuzovaly oscilující magnet, nebo pomocí pružiny.



Obr. 8 Schéma mini elektromagnetického generátoru [18]

Mezi tyto tubovité generátory patří i mini generátor vyrobený v Hong Kong University of Science and Technology, který je vysoký přibližně 7 cm. Jako jeho maximální výkon v rezonančním stavu se uvádí 35 mW, což se také podařilo experimentálně získat [18].

Dalšími zástupci jsou například japonský generátor [P3] nebo čínský generátor kdy pohyb magnetu neprotíná rovinu cívky. Experimentálně se podařilo z tohoto čínského generátoru získat přes 1mW při různě se měnících nízkých frekvencích [17].



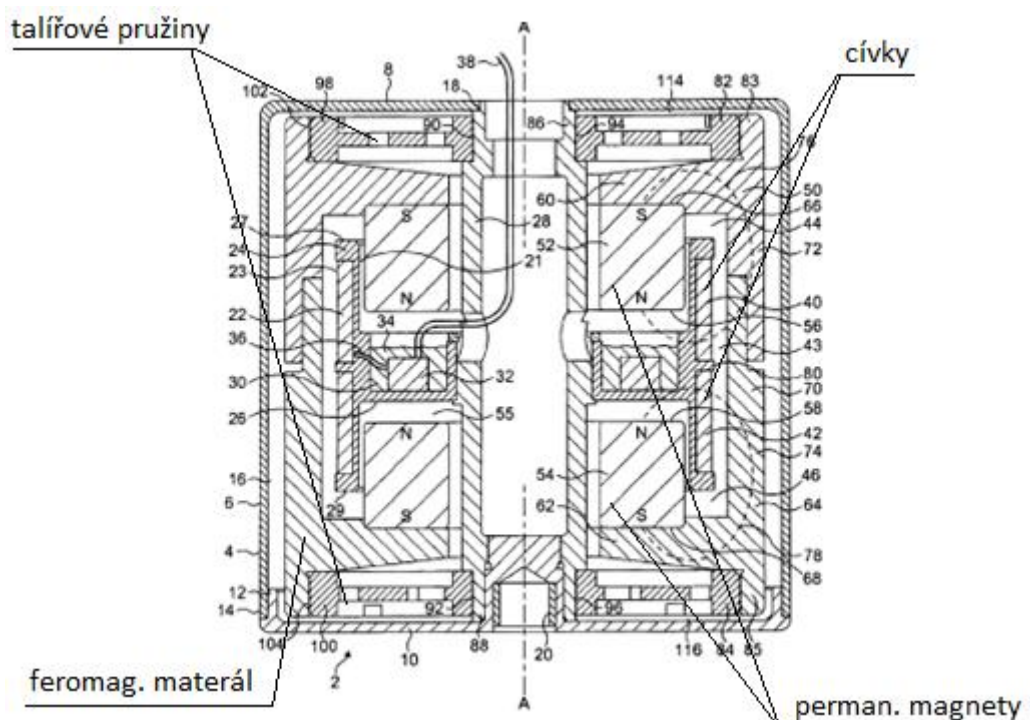
Obr. 9 Schéma lineárního elektromagnetického generátoru [17]

Zajímavé konstrukční řešení pro generátory nabízí i patent [P2], který poukazuje na možnost měnit délku těla své konstrukce a tím se snadno dostat do stavu rezonance s okolními mechanickými vibracemi. Tento “rezonátor“ nabízí využití pro velmi malé generátory založené na piezoelektrickém jevu a také pro elektromagnetické generátory.

Mezi elektromagnetické generátory vyskytující se na trhu se sériovou výrobou patří například generátor PMG- FSH od firmy Perpetuum. Tyto generátory nabízejí kompaktní velikost a hermetickou uzavřenost umožňující fungování i v teplotně nebo chemicky průmyslově extrémních podmínkách. PMG- FSH generátory jsou schopné poskytnout výstupní napětí 5V a proud 4mA. Jejich maximální výkon se pohybuje tedy kolem hodnoty 20 mW [20].

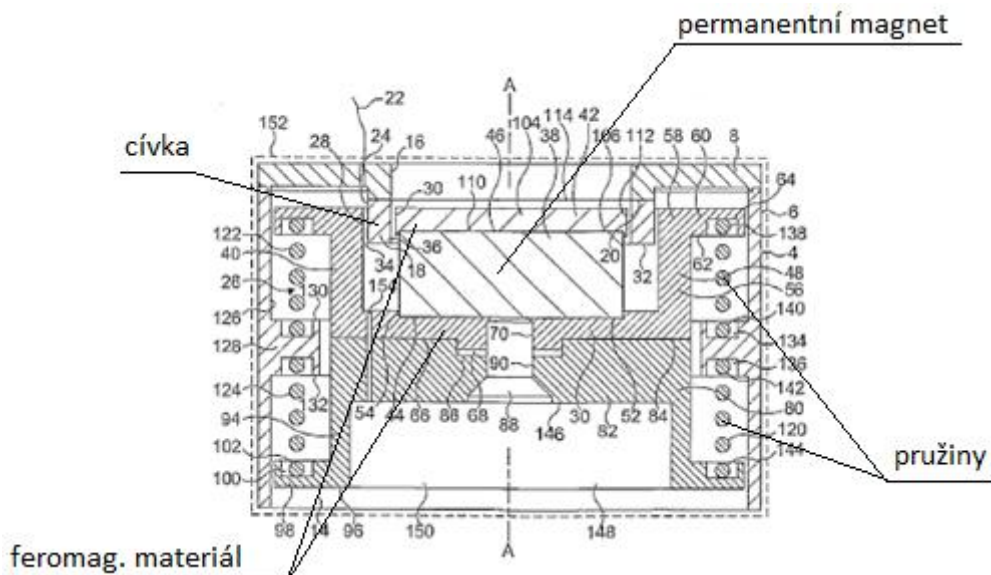
Firma Perpetuum vydala již více konstrukčních řešení svých generátorů. Důležitým prvkem je maximální využití vnitřního prostoru oscilující hmotou za účelem zvýšení indukovaného napětí.

Patent [P4] obsahuje dvě opačně polarizované magnetické jádra umístěné na společné oscilující feromagnetické bázi. Oscilace je umožněna talířovými pružinami, které zabírají minimální prostor uvnitř konstrukce generátoru.



Obr. 10 Konstrukční řešení generátoru [P4]

Patent [P5] je složený s pevně ukotvené cívky ke konstrukci generátoru, permanentního magnetu spojeného s feromagnetickou částí generátoru tvořící většinu oscilující hmoty a dvou pružin, které vzájemně umožňují relativní pohyb hmoty vůči konstrukci generátoru a tím i vůči cívce.



Obr. 11 Konstrukce generátoru firmy Perpetuum [P5]

Souhrn těchto několika základních principů tubovitých generátorů můžeme taktéž nalézt v patentu [P6].

7 Analýza elektromagnetického generátoru:

Cílem analýzy elektromagnetického generátoru je vybrat vhodnou konstrukci generátoru, která by mohla být použita pro letecké aplikace, a pomocí simulace stanovit, pokud možno, co nejvhodnější parametry této konstrukce, tak aby splňovali požadavky pracovního prostředí a požadavky výkonu na napájení obecného senzoru.

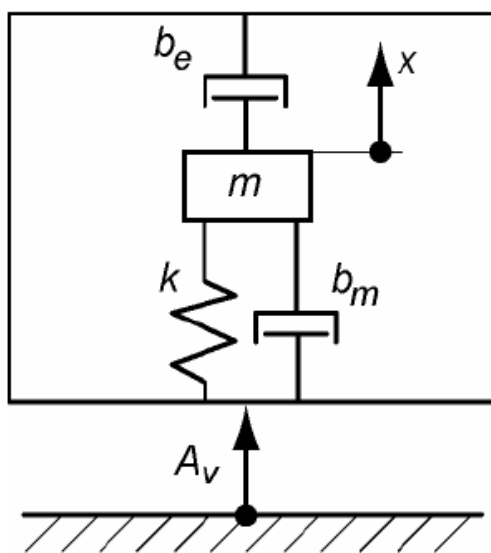
Mezi požadavky okolí patří vlastní frekvence soustavy elektromagnetického generátoru, která by měla být pro dosažení největšího výkonu naladěná na okolní budící mechanické vibrace o frekvenci přibližně 34 Hz, což je dvojnásobek otáček nosného rotoru vrtulníku [1], s Amplitudou zrychlení vibrací 0,3 G.

Rozměry generátoru nejsou v tomto případě výrazně omezené, proto můžeme využít potenciálu elektromagnetických generátorů na generování dostatečného výkonu.

Pro návrh parametrů soustavy vibračního generátoru jsme pro potřeby závěrečné práce vycházeli z konstrukce patentu [P4], která by měla na základě poskytovaných informací firmou Perpetuum vyhovovat našim požadavkům.

7.1 Matematický model oscilátoru:

Pro zjednodušení matematického popisu soustavy elektromagnetického generátoru zavádíme matematický model oscilátoru, představující rezonanční mechanismus generátoru. Z fyzikální podstaty tvoří tento model oscilující hmotnost m na pružině, o tuhosti k , a je tlumeno tlumením b . Vnější vstupem do soustavy jsou okolní vibrace se zrychlením A_v , které vychyluje hmotnost m o relativní výchylku x . Tlumení b je v případě elektromagnetických generátorů složeno s elektromagnetického tlumení b_e a mechanického tlumení b_m .



Obr. 12 Schéma obecného lineárního elektromagnetického vibračního generátoru [1]

Tento matematický model je popsán pohybovou rovnicí, jejíž tvar lze po úpravě zapsat takto:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \zeta_m \cdot \Omega \cdot \dot{x} + 2 \cdot \zeta_e \cdot \Omega \cdot x + \Omega^2 \cdot x = A_v \quad (1)$$

Kde Ω je vlastní frekvence soustavy a je dána vztahem $\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta_m = \frac{b_m}{2 \cdot m \cdot \Omega}$ je poměrné mechanické tlumení soustavy, stanovené na základě kvality rezonančního mechanismu generátoru, a $\zeta_e = \frac{b_e}{2 \cdot m \cdot \Omega}$ je poměrné elektromagnetické tlumení soustavy [6]. Předpokladem vycházející ze zjednodušené představy o okolních vibracích je sinusový průběh jejich zrychlení. Proto můžeme doplnit:

$$A_v = A_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Kde A_0 je amplituda zrychlení okolních vibrací, ω je frekvence těchto vibrací a t je čas, po který děj probíhá. Jako charakteristiky soustavy dále zavádíme kritické tlumení $b_k = 2 \cdot m \cdot \Omega$ a poměrný útlum soustavy $\zeta_0 = \frac{b_e + b_m}{b_k}$.

7.2 Fyzikální model generátoru:

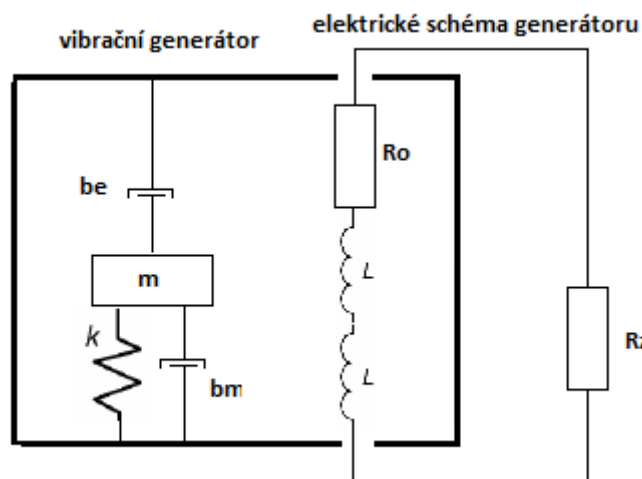
Při relativním pohybu magnetického jádra (magnet + feromagnetický materiál), které představuje rezonanční mechanismus, vůči cívice kotvy se v jednotlivých závitech cívky indukuje střídavé elektromotorické napětí, které je dáno vztahem:

$$u_i = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \quad (3)$$

Kde $\vec{v}$ je rychlost vodiče, na němž se indukuje napětí, vůči vektoru magnetické indukce $\vec{B}$, která popisuje magnetické pole, v němž se vodič pohybuje. Vzájemný pohyb vodiče a rezonančního mechanismu je popsán v matematickém modelu oscilátoru ($v = \dot{x}$). Uvažujeme-li počet závitů N , aktivní délku jednoho závitu l , kterou v našem případě reprezentuje délka celého závitu, kvůli osově souměrnosti generátoru, a B představuje kolmou složku magnetické indukce na směr pohybu, je pak okamžité indukované napětí popsáno vztahem:

$$u_i = \dot{x} \cdot B \cdot N \cdot l \quad (4)$$

Připojíme-li na generátor s kmitajícím magnetickým jádrem vnější zátěž, začne uzavřeným obvodem protékat proud a generátor začne generovat výkon. Generováním výkonu vzniká tlumící síla způsobující elektromagnetické tlumení b_e .



Obr. 13 Elektrické schéma vibračního generátoru

Celkový generovaný okamžitý výkon je dán vztahem:

$$p = \frac{u_i^2}{Z} \quad (5)$$

Kde Z je impedance celého obvodu a v našem případě, kdy jsou zapojené dvě cívky sériově, je dána vztahem:

$$Z = \sqrt{(R_z + R_o)^2 + (2L\omega)^2} \quad (6)$$

Kde R_z je odpor připojené vnější zátěže a R_o je celkový odpor na obou cívkách. Celkový výkon generátoru je tím pádem dán vztahem:

$$P = \frac{U_{ef}^2}{Z} \quad (7)$$

Kde U_{ef} je efektivní hodnota indukovaného napětí.

Prostřednictvím tlumící elektromagnetické síly je ze systému odebírán disipativní mechanický výkon, jehož velikost je závislá na velikosti relativní rychlosti vodiče a rezonančního mechanismu a na elektromagnetickém tlumení. Odebíraný celkový výkon je tedy dán vztahem [1]:

$$p = b_e \cdot \dot{x}^2 \quad (8)$$

Z podmínky rovnosti celkového generovaného výkonu a celkového odebíraného výkonu, můžeme stanovit výpočet pro elektromagnetické tlumení:

$$b_e = \frac{(B \cdot N \cdot l)^2}{Z} \quad (9)$$

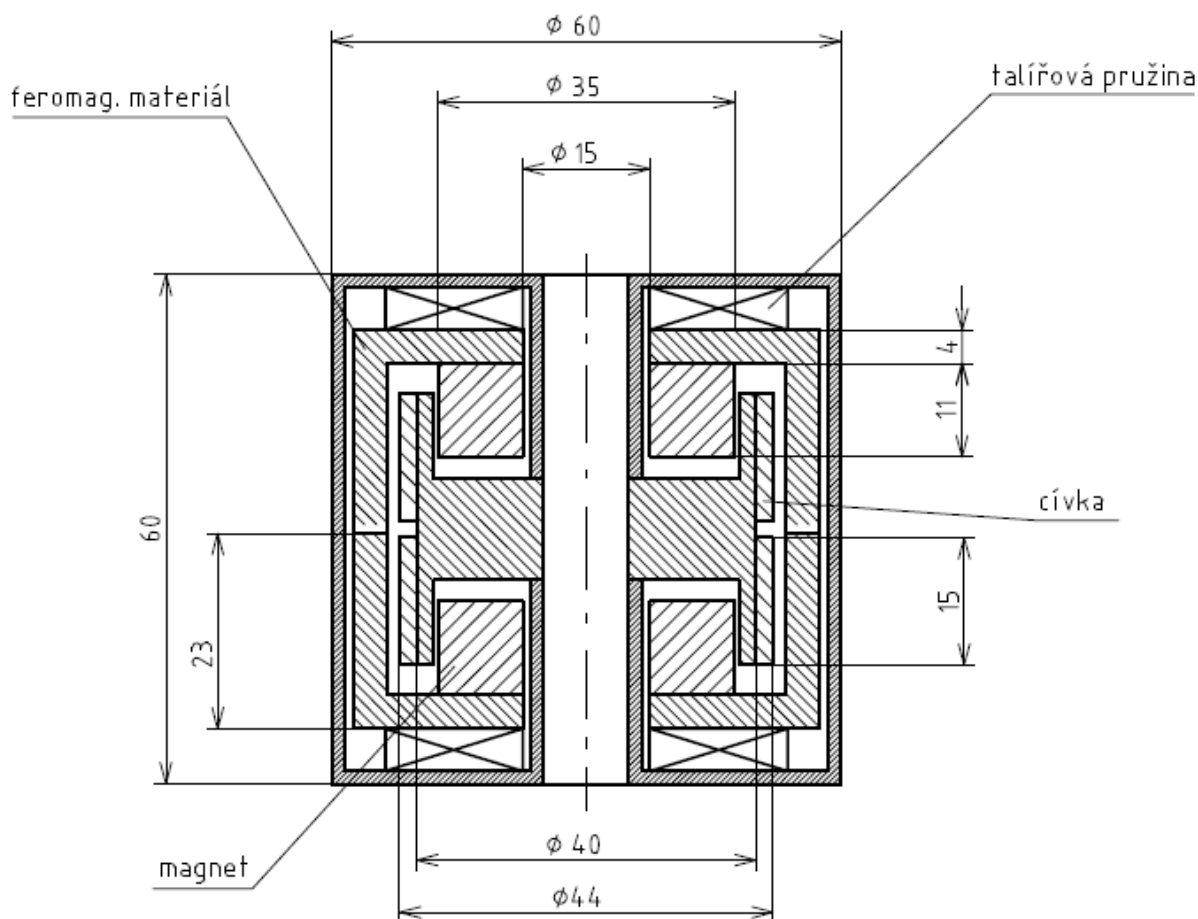
Je dokázáno, že největší generovaný výkon dosahuje generátor při rovnosti elektromagnetického tlumení b_e a mechanického tlumení b_m viz. [1].

7.3 Koncepce elektromagnetického generátoru:

Jednotlivé parametry elektromagnetického generátoru jsou stanoveny na základě rezonance mezi okolními vibracemi a vlastní frekvencí rezonančního mechanismu generátoru, zároveň bylo snahou o dodržení podmínky pro maximální generovaný výkon $b_e \approx b_m$. Poměrné mechanické tlumení soustavy ζ_m bylo stanoveno na 3%, na základě předpokladu kvality generátoru.

Rozměry generátoru:

Rozměry a z nich odvozené parametry jednotlivých částí (hmotnost oscilující části, velikost cívky, počet závitů cívky atd.) jsou přibližně stanoveny na základě informací o produktech poskytované firmou Perpetuum.



Obr. 14 Rozměry zjednodušeného modelu generátoru

Hmotnost oscilující části:

Hmotnost oscilující části vyplývá z objemu stanoveného na základě rozměrů zjednodušeného modelu generátoru na **obr. 14** a její hustoty, která je u těchto vzácných zemin podobná jako u železa. Železo taktéž bylo použito jako feromagnetický materiál. Tzn., že při hustotě železa 7860 kg/m^3 byla hmotnost oscilující části stanovena předběžně na $0,4660 \text{ kg}$

Magnet:

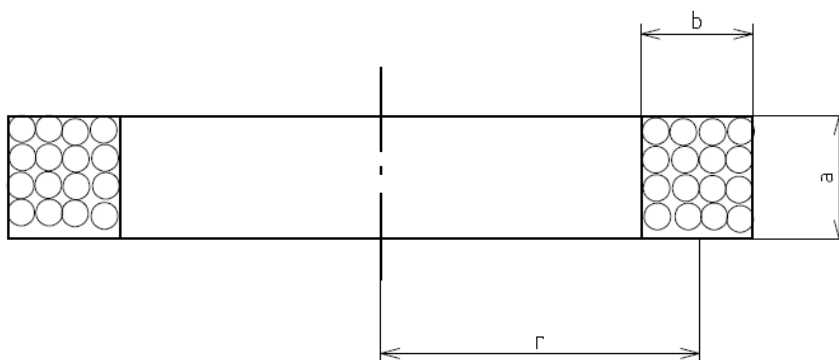
Magnety ze vzácných zemin FeNdB jsou schopny vytvořit magnetické pole ve vzduchové mezeře o průměrné velikosti magnetické indukce až 0,6 T [1]. Při naší simulaci jsme počítali s velikostí magnetické indukce 0,3 T, k jejíž hodnotě jsme dospěli po konzultaci s odborníky na magnetické pole. Pro přesnější analýzu magnetické indukce ve vzduchové mezeře by bylo nutné provést simulaci metodou konečných prvků anebo jinými analytickými výpočty magnetického pole.

Cívka:

Z rozměrů generátoru můžeme stanovit střední průměr cívky $\varnothing 42$ mm, z čehož vyplývá, že délka vodiče jednoho závitů cívky bude rovna v našem případě $l=131,95$ mm. Zároveň se jedná i o užitnou délku vodiče, protože vektor pohybu každého úseku vodiče je kolmý na vektor magnetické indukce v daném místě. Cívka je motána z lakovaného měděného drátu o průměru 0,1 mm, což nám kvůli rozměrům cívky v generátoru omezuje počet závitů na 3000. Indukčnost cívky v μH bez jádra lze vyjádřit vztahem [23]:

$$L = \frac{0,315 \cdot r^2 \cdot N^2}{6 \cdot r + 9 \cdot a + 10 \cdot b} \quad (10)$$

Kde a je šířka vinutí cívky v cm, b je výška vinutí cívky v cm a r je poloměr vinutí cívky v cm.



Obr. 15 Rozměry cívky

Předpokládáme-li cívku bez jádra a počet závitů cívky $N = 2488$ získaný na základě simulování pro splnění podmínky $b_e \approx b_m$ je výsledná indukčnost jedné cívky přibližně 0,306 H, přičemž po zavedení úvahy magnetického jádra obklopujícího cívku, je skutečná výsledná indukčnost cívky vyšší. Přesná indukčnost se nedá v tomto případě analyticky vypočítat. Při výpočtu jsme na základě odhadu a konzultaci s odborníky počítali s dvojnásobkem indukčnosti vypočítané pro cívku bez jádra.

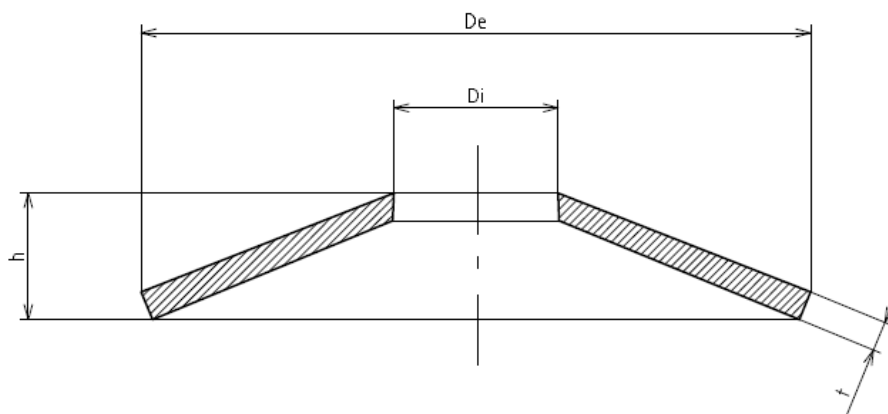
Celkový odpor cívky lze stanovit na základě vztahu pro výpočet odporu vodiče:

$$R_o = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (11)$$

Kde l je délka vodič, S je jeho průřez a ρ je měrný elektrický odpor materiálu, jehož hodnota pro měď je $0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$.

Pružina:

V patentu P4 se uvádí jako vhodný reprezentant tuhosti oscilačního modelu dvě talířové pružiny umístěné proti sobě na axiálních koncích konstrukce generátoru. Toto konstrukční řešení nabízí i možnost kombinací více talířových pružin zapojených paralelně nebo sériově tak, aby mohla být dosažena požadovaná tuhost.



Obr. 16 Rozměry talířové pružiny

Jednoduché talířové pružiny mají výhodu menších rozměrů, částečně eliminují boční pohyb kmitajícího magnetického jádra a zajišťují relativní spolehlivost, protože oscilující magnetické jádro generátoru dosahuje malých maximálních výchylek (menších než 1 mm) a tím pádem nedochází k překročení mezního stavu únavy a pružnosti pružiny.

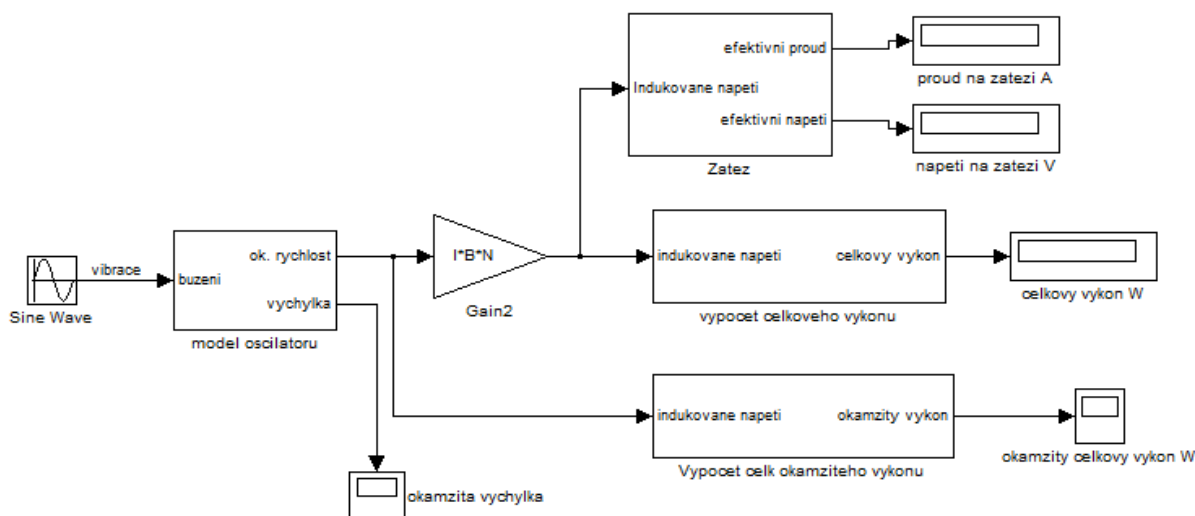
Celková tuhost pružin našeho rezonančního mechanismu je 21 289,43 N/m vypočtena na základě návrhu pružin o rozměrech: $De = 53,340$ mm, $Di = 15,240$ mm, $t = 1,905$ mm, $h = 3,810$ mm, přičemž původní snaha byla docílit tuhosti 21 267,00 N/m. Na každém axiálním konci generátoru jsou umístěné 2 pružiny paralelně (celkem tedy 4 pružiny) z oceli válcované za studena EN 10132–4 C55S. Jedná se pouze o jednu možnost z mnoha různých návrhů pružin na přibližnou požadovanou tuhost. Pružina byla navrhována za pomoci programu MITcalc.

Na základě naší získané tuhosti byla posléze upravena hmotnost oscilující části na 0,4665 kg, kvůli zachování rezonance s okolními budícími vibracemi a kvůli snadnějšímu způsobu ladění generátoru.

7.4 Simulační model generátoru:

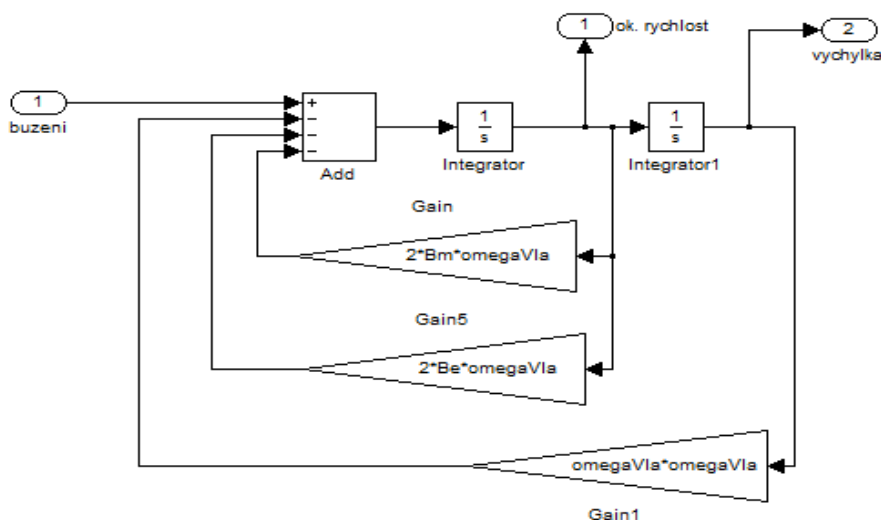
Cílem simulace je sestavení modelu elektromagnetického generátoru a jeho naladění na získání maximálního celkového generovaného výkonu vycházejícího ze splnění podmínky $b_e \approx b_m$.

Simulační model je sestaven v programu Matlab R2008a Simulink formou blokových zápisů rovnic matematického a fyzikálního modelu a jejich vzájemného provázání. Hlavním vstupem do modelu generátoru jsou vibrace, které mají v závislosti na čase sinusový průběh a výstupem je celkový výkon generátoru. Jako zhodnocení správnosti a funkčnosti modelu slouží vedlejší výstupy znázorňující okamžitou výchylku, okamžitý celkový výkon a efektivní hodnoty proudu a napětí na zátěži.

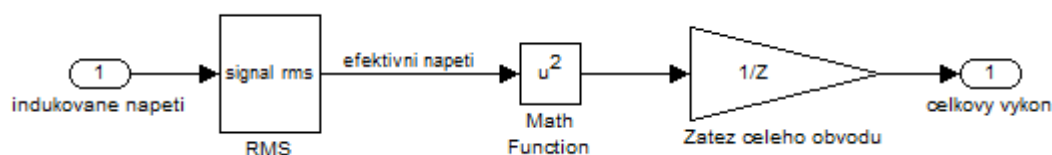


Obr. 17 Model simulace elektromagnetického generátoru

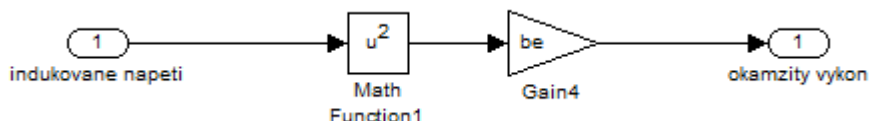
Kde *model oscilátoru* představuje sestavení pohybové (1), *výpočet celkového výkonu* představuje sestavení rovnice (7), *výpočet celkového okamžitého výkonu* rovnici (8).



Obr. 18 Model Oscilátoru

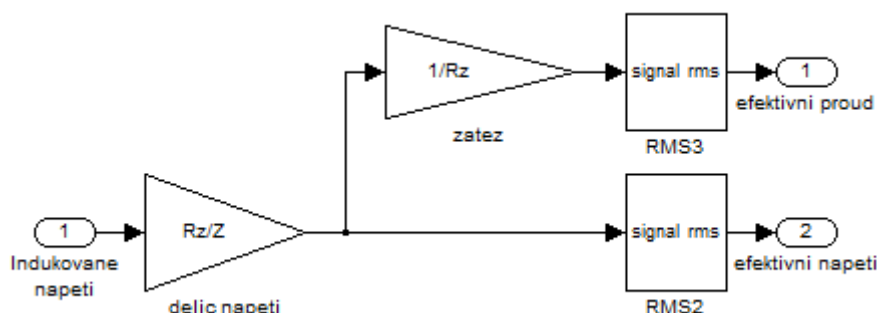


Obr. 19 Výpočet celkového výkonu



Obr. 20 Výpočet celkového okamžitého výkonu

Zátěž představuje průběh velikosti napětí a proudu na reálné připojené vnější zátěži. Obsahuje dělič napětí, využití Ohmova zákona, a RMS bloku sloužící k určení efektivních hodnot.



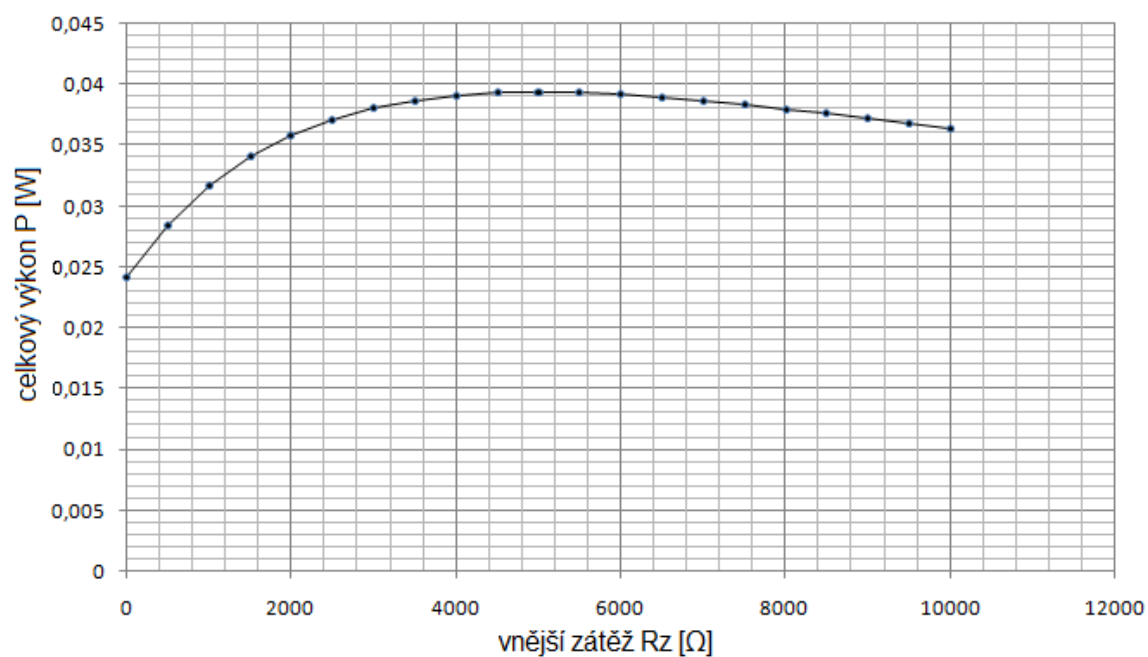
Obr. 21 Model Zátěže

Vstupy neboli parametry tohoto modelu simulace jsou stanoveny na základě koncepce elektromagnetického generátoru uvedené v kapitole 7.3 nebo jsou dopočítány na základě rovnic uvedených v kapitole 7.1 modelu matematického oscilátoru a v kapitole 7.2 fyzikálního modelu generátoru.

7.5 Výstup simulačního modelu generátoru:

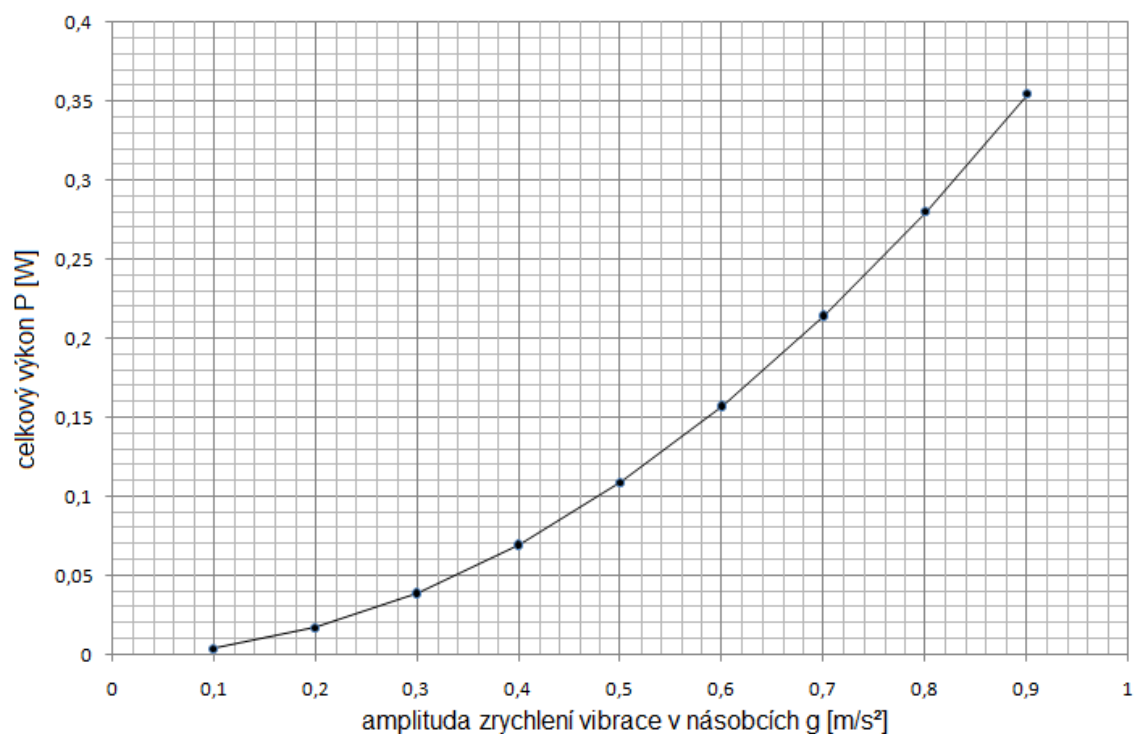
Ladění generátoru bylo prováděno na základě změny celkového počtu závitů obou cívek, za předpokladu, že obě cívky mají tento počet závitů stejný. Změnou počtu závitů cívky rovněž dochází i k ovlivnění odporu a indukčnosti cívek, což má za následek působení na výslednou hodnotu celkového výkonu.

Z **obr. 22** můžeme vidět vliv velikosti připojené zátěže na generovaný celkový výkon. Tendence průběhu závislosti rovněž dokazuje vliv velikosti zátěže na naladění generátoru, přičemž náš generátor byl původně laděn na vnější zátěž 5000Ω .



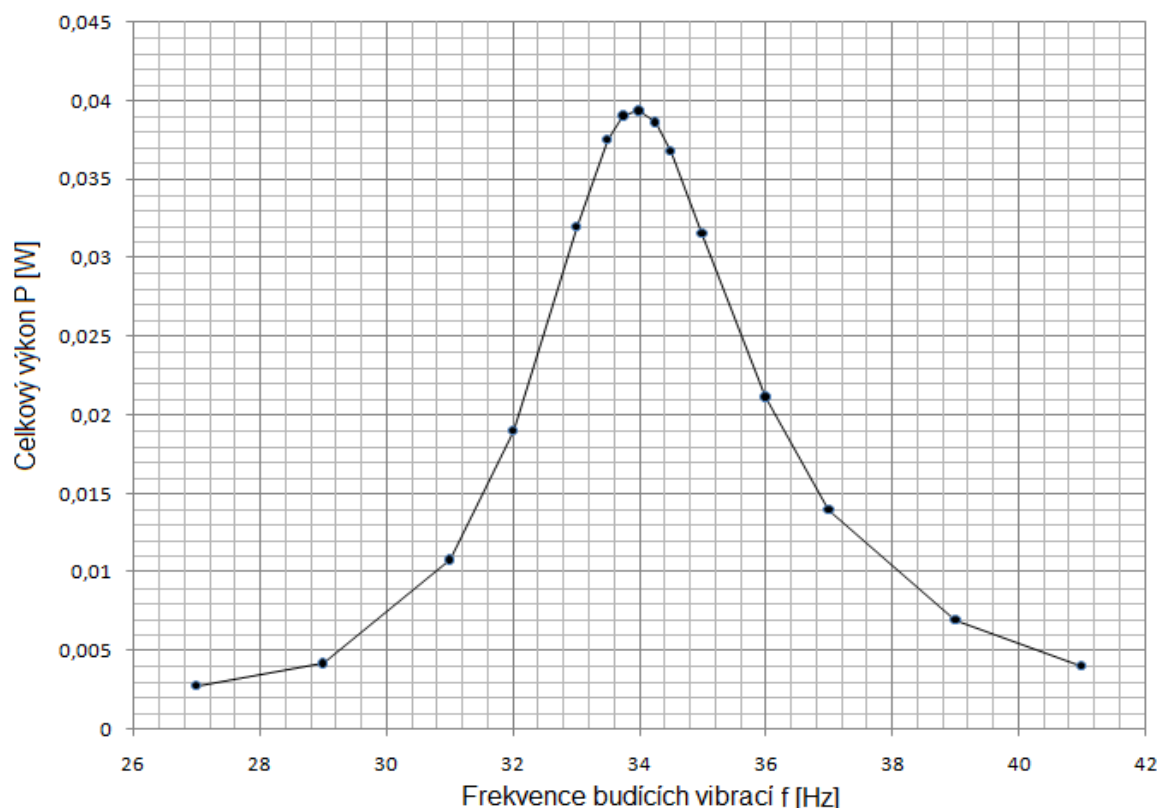
Obr. 22 Graf závislosti celkového výkonu na velikosti připojené zátěže

Na výsledný celkový výkon má rovněž vliv změna vnějších podmínek. Například na **obr. 22** je vidět vliv amplitudy zrychlení vibrace na celkový výkon při stále frekvenci vibrací 34 Hz.



Obr. 23 Závislost celkového výkonu na amplitudě zrychlení vibrace

Na **obr. 24** zase můžeme sledovat vliv okolních vibrací s konstantním zrychlením vibrace 0,3 G na generátor původně naladěný na frekvenci 34 Hz s připojenou vnější zátěží 5000 Ω . Přibližný průběh generovaného výkonu jenom potvrzuje důležitost rezonančního stavu mezi generátorem a budícími vibracemi.



Obr. 24 Závislost celkového výkonu na frekvenci budících vibrací

Pomocí simulačního modelování se nám podařilo nastavit vstupní parametry soustavy uvedené v kapitole 7.3 koncepci elektromagnetického generátoru na co možná největší generovaný celkový výkon, který při amplitudě zrychlení vibrace 0,3 G, pracovní frekvenci 34 Hz a připojené vnější zátěži 5 k Ω , dosahuje hodnoty až 39,41 mW. Dalším požadavkem byla velikost proudu protékajícího zátěží minimálně 0,8 mA, což bylo za těchto podmínek taktéž splněno a proud dosáhl maximální hodnoty až 2,5 mA.

Přestože nejsme schopni vždy zajistit ideální stálé pracovní podmínky, jak vyplývá z uvedených závislostí, generátor je schopen napájet daný senzor i v relativně blízkých odchylkách od zadaných hodnot amplitudy zrychlení vibrace a pracovní frekvenci.

8 Závěr:

Snahou této práce bylo seznámení se s možnostmi získávání elektrické energie v leteckých aplikacích, jejichž souhrn spadá do dynamicky se rozvíjejícího oboru Energy harvesting. V leteckých aplikacích se nám nabízí možnost využití solární energie, akustického hluku, tepelné energie a mechanických vibrací, přičemž nejefektivněji se získává elektrická energie při provozu letadla z energie tepelné a energie mechanických vibrací.

Tepelná energie se získává pomocí termoelektrických generátorů využívajících teplotních rozdílů mezi vnitřní a vnější částí trupu letadla na základě Seebeckova efektu.

Energie mechanických vibrací se získává pomocí vibračních generátorů pracujících na piezoelektrickém, elektrostatickém nebo elektromagnetickém principu, přičemž z porovnání generátorů na základě jejich vhodnosti pro danou aplikaci, se jako nejlepší možnost pro napájení bezdrátových jednotek senzorů a snímačů jeví elektromagnetický generátor užitý jako autonomní hybridní harvest systém.

Elektromagnetický generátor využívá pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou principu elektromagnetické indukce, kdy se vzájemným pohybem permanentního magnetu a vodiče indukuje napětí na tomto vodiči umístěném v poli permanentního magnetu.

Ne každý konstrukční návrh generátoru je vhodný pro námi zjišťovanou aplikaci, a proto je nutné provést výběr jednotlivých konstrukčních principů elektromagnetických generátorů až už v článcích o analýze výkonu generátorů nebo v patentových databázích. Pro práci s patentovými databázemi jsme využili vyhledávacího softwaru Goldfire.

Cílem práce bylo rovněž přiblížit mechatronický návrh parametrů vhodného konstrukčního principu zvoleného typu generátorů, tak aby tento navržený generátor byl schopen napájet uvedený konkrétní senzor, jehož požadavky na výkon byly přibližně 2,9 mW. Tyto požadavky se podařilo splnit a navrhnout tak parametry elektromagnetického generátoru s celkovým teoretickým simulovaným výkonem 39,41 mW. Tento generátor pracoval v rezonančním stavu s okolními vibracemi se stanovenou frekvencí 34 Hz a amplitudě zrychlení vibrací 0,3 G, což by mělo odpovídat podmínkám při provozu letadla. Simulace byla provedena za pomoci programu Matlab R2008a Simulink.

Z dosažených výsledků a získaných poznatků vyplývá užitečnost Energy harvesting technologií při náhradě časově nevyhovujících baterií. Energy harvesting se jeví jako dynamicky rostoucí sféra, která přispívá k technologickému rozvoji společnosti a průmyslu. Nacházejí se neustále nové postupy a principy získávání okolní energie, její přeměny nebo dochází k zefektivnění využití zdrojů již známých. V leteckých aplikacích navíc vzniká požadavek na výkon a integraci harvest systémů do konstrukce letadel a požadavek na samostatný provoz bezdrátového zařízení jako celku. Splněním těchto požadavků je věnována velká pozornost využívající poznatků z různých oborů a věd, přičemž jejich vzájemnou integrací a kooperací se zabývá vědní obor mechatronika.

Technologický vývoj zajišťuje postupem času snížení požadavků na výkon napájených zařízení a zároveň zvyšuje produkovaný výkon mikrogenerátorů, což postupně odstraňuje nároky na rozměr generátorů, jejich finanční náročnost nebo jejich případné nežádoucí vlivy na pracovní okolí.

9 Reference:

- [1] HADAŠ, Zdeněk. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. Diplomová práce na fakultě strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně. Vedoucí diplomové práce Singule Vladislav a Ondrůšek Čestmír.
- [2] MATEAU, L.; MOLL, F. *Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics*. Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium, 2005. Dostupné z <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.101.4417&rep=rep1&type=pdf>
- [3] LI HUANG; POP, V.; de FRANCISCO, R.; VULLERS, R. *Ultra Low Power Wireless and Energy Harvesting Technologies – An Ideal Combination*. (17-19 Listopad 2010), [cit. 13. Leden 2011]. Communication Systems (ICCS), 2010 IEEE International Conference on. Dostupná z <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [4] HADAŠ, Z.; SINGULE, V.; VĚCHET, S. *Development of Energy Harvesting Sources for Remote Applications as Mechatronic systems*. (6-8. Zář 2010). [cit. 21 Ř 2010]. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International. Dostupná z <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [5] PIMENTEL, D.; MUSILEK, P. *Power management with energy harvesting devices*. (2-5 Kv 2010). [cit. 16 z 2010]. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on. Dostupná z <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [6] HADAŠ, Z.; ONDRŮŠEK, Č.; SINGULE, V. Power sensitivity of vibration energy harvester. [6. Ůnora 2010]. Microsyst Technol (2010).
- [7] MEMS [online]. [cit. 7. 12. 2009]. Dostupná z <http://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>
- [8] YILDIZ, Faruk. *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques*. The Journal of Technology Studies. Fall 2009. Volume 35, Number 1. [cit. 10/07/2010]. Str. 40-48. Dostupné z <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v35/v35n1/yildiz.html>
- [9] ARMSTRONG, T. *Aircraft Structures Take Advantage of Energy Harvesting Implementations*. From May 2010 High Frequency Electronics. High frequency design str. 50-58. [cit. 2010-06-023]. Dostupné z http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SDYQ201006023.htm.
- [10] HAOWEI BAI; ATIGUZZAMAN, M.; LILJA, D. *Wireless sensor network for aircraft health monitoring*. (25-29. Prosinec 2004). [cit. 13 prosinec 2004]. Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on. Dostupné z <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [11] SHEPLAK, M.; HOROWITZ, S.; CATTAFESTA, L. *Acoustic Energy Harvesting Using an Electromechanical Helmholtz Resonator* [online]. [cit. May 19, 2009].

Acoustical Society of America 157th Meeting Lay Language Papers. Version 2pEAb2.
Dostupné z <<http://www.acoustics.org/press/157th/sheplak.html>>

- [12] *Energy-autonomous sensors for aircraft* [online]. [cit. 7. Října 2009]. Energy harvesting journal. Dostupné z <<http://www.energyharvestingjournal.com>>
- [13] HUN SIK HAN; YUN HO KIM; SEO YOUNG KIM. *Performance measurement and analysis of a thermoelectric power generátor*. (2-5. Července 2010). [cit. 01 červenec 2010]. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference on. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [14] KHALIGH, A. ; PENG ZENG ; CONG ZHENG . *Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art*. (9. Června 2009). [cit. 8. Února 2010]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [15] BECKER, T. ; KLUGE, M. ; SCHALK, J. *Autonomous Sensor Nodes for Aircraft Structural Health Monitoring*. (Listopad 2009). [cit. 6. Října 2009]. Sensors Journal, IEEE. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [16] MEJZLÍK, M. *Návrh a tvorba laboratorní úlohy s Peltierovým článkem*. Brno, 2009. Diplomová práce na fakultě elektroniky a komunikačních technologií Vysokého Učení Technického v Brně. Vedoucí diplomové práce Macháček Jan.
- [17] WANG, Y.C. ; SHI, D. ; SHEN, J.X. *Design and fabrication of a linear generator for vibration energy harvesting*. (6-9. Prosince 2010). [cit. 10. Ledna 2011]. Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [18] XINPING CAO ; WEN-JEN CHIANG ; YA-CHIN KING. *Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC–DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System*. (Březen 2007). [cit. 5. Března 2007]. Power Electronics, IEEE Transactions on. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [19] HADAŠ, Z.; KLUGE, M.; SINGULE, V. *Electromagnetic Vibration Power Generator*. (6-8. Září 2007). [cit. 4. Prosince 2007]. Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007. SDEMPED 2007. IEEE International Symposium on. Dostupná z<<http://ieeexplore.ieee.org/>>
- [20] *PMG FSH Free-Standing Vibration Energy Harvesters* [online]. [cit. 17. Května 2010]. PMG FSH Technical Datasheet. Dostupné z <<http://www.perpetuum.com/>>
- [21] MILLER, L.; CHEN, A.; MADAM, D. *Energy harvesting from vibrations, air flow, & temperature change*. [2010]. Prezentace formátu PDF. University of California, Berkeley. Dostupné z <<http://uc-ciee.org/all-documents/a/181/113/nested>>

- [22] SEONG-HYOK KIM; CHANG-HYEON JI; RESTON GALLE. *An electromagnetic energy scavenger from direct airflow*. [cit. 26 Srpen 2009]. 2009 J. Micromech. Microeng. 19 094010. Dostupné z < <http://iopscience.iop.org/0960-1317/19/9/094010>>
- [23] PRIYA, S; INMAN, D, J. *Energy Harvesting Technologies*. Springer US. 2009.
- [24] JANOSHA, H. *Adaptronics and Smart Structures*. Springer. 1999

10 Seznam příloh:

- [P1] US 2010/0237719 A1: ELECTROMAGNETIC VIBRATORY GENERATOR FOR LOW FREQUENCY VIBRATIONS
- [P2] US 7,812,466 B2: ADJUSTABLE RESONANCE FREQUENCY VIBRATION POWER HARVESTER
- [P3] JP08061475 (WO 2009057348 A1): VIBRATION ELECTROMAGNETIC GENERATOR
- [P4] GB 2 439 411 B: AN ELECTROMECHANICAL GENERATOR FOR CONVERTING MECHANICAL VIBRATIONAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY
- [P5] WO 2007/096615 A1: AN ELECTROMECHANICAL GENERATOR FOR CONVERTING MECHANICAL VIBRATIONAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY
- [P6] US 7,569,952 B1: HIGH EFFICIENCY, INDUCTIVE VIBRATION ENERGY HARVESTER
- [P7] US 7,795,763 B2: ELECTROMAGNETIC DEVICE FOR CONVERTING MECHANICAL VIBRATIONAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

Bakalarka_simulace_parametry.m – soubor programu Matlab R2008a s hodnotami parametrů soustavy modelovaného elektromagnetického generátoru.

Bakalarka_simulace.mdl – soubor programu Matlab R2008a Simulink s modelem parametrů soustavy elektromagnetického generátoru

Všechny přílohy jsou uloženy na přiloženém CD.