

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 525*

ISSN 1213-418X

**Zdeněk Hadaš**

**VÝVOJ ALTERNATIVNÍCH ZDROJŮ  
ELEKTRICKÉ ENERGIE  
PRO MODERNÍ ELEKTRONIKU**

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

**Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**

**VÝVOJ ALTERNATIVNÍCH ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE  
PRO MODERNÍ ELEKTRONIKU**

DEVELOPMENT OF ENERGY HARVESTING DEVICES  
FOR ULTRA-LOW POWER ELECTRONICS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE  
V OBORU APLIKOVANÁ MECHANIKA



BRNO 2015

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Získávání energie, elektromechanická přeměna, Faradayův zákon, vibrace, resonance, nízkopříkonová elektronika, power management, mechatronika, simulace, model.

## **KEYWORDS**

Energy Harvesting, Electromechanical conversion, Faradays Law, Vibrations, Resonance, Ultra Low Power Electronics, Power Management, Mechatronics, Simulation, Model.

## **HABILITAČNÍ PRÁCE JE ULOŽENA**

Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2, Brno.

# Obsah

1 ÚVOD .....	5
2 MOTIVACE.....	5
3 PŘEHLED ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH PRINCIPŮ ZÍSKÁVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OKOLÍ.....	8
3.1 Fyzikální principy generování elektrické energie .....	8
3.1.1 <i>Vibrace jako zdroj energie</i> .....	8
3.1.2 <i>Využití lidské energie</i> .....	11
3.1.3 <i>Fotovoltaický jev</i> .....	11
3.1.4 <i>Seebeckův jev</i> .....	11
3.1.5 <i>Další zdroje energie</i> .....	11
3.2 Mechatronická soustava energy harvesting aplikace .....	12
3.2.1 <i>Topologie mechatronické soustavy energy harvesting aplikace</i> .....	12
3.2.2 <i>Komerční řešení energy harvesting generátorů</i> .....	12
3.2.3 <i>Power management elektronika a akumulace energie</i> .....	14
3.2.4 <i>Vyvinutá energy harvesting aplikace jako mechatronická soustava</i> .....	16
3.3 Bezdrátové prvky a bezdrátové sítě .....	16
3.4 Zhodnocení technologie energy harvesting a její využití .....	17
4 MECHANICKÁ ENERGIE JAKO AUTONOMNÍ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	17
4.1 Letecký průmysl jako impuls pro vývoj energy harvesting technologií .....	17
4.2 Unikátní magnetický rezonanční mechanismus .....	18
4.3 Aplikace pro letectví – WISE .....	19
4.4 Parametry citlivého vibračního energy harvesting generátoru .....	21
5 ANALÝZA, MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE VIBRAČNÍHO GENERÁTORU .....	22
5.1 analýza a zhodnocení generovaného výkonu .....	22
5.2 Verifikace modelu a optimalizace parametrů konstrukce.....	23
5.3 Využití pokročilých metod modelování a verifikace výsledků .....	23
6 VYUŽITÍ ODEZVY CITLIVÉHO REZONANČNÍHO MECHANISMU PRO GENEROVÁNÍ ENERGIE Z MECHANICKÝCH RÁZŮ .....	25
7 TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY – ALTERNATIVA PRO LETECKÉ APLIKACE..	26
8 ENERGY HARVESTING JAKO ALTERNATIVA PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE....	27
9 ZHODNOCENÍ PŘEDKLÁDANÉ HABILITAČNÍ PRÁCE.....	27
9.1 Aktuálnost řešené problematiky a shrnutí práce .....	27
9.2 Přínosy práce.....	28
9.2.1 <i>Vědecký a teoretický přínos</i> .....	28
9.2.2 <i>Praktický přínos</i> .....	29
9.2.3 <i>Pedagogický přínos</i> .....	29
9.3 Možnosti dalšího využití výsledků práce .....	30
10 ZÁVĚR.....	30

## Představení autora

Zdeněk Hadaš se narodil v roce 1980 ve Vsetíně. Vysokoškolské vzdělání získal v oboru Aplikovaná mechanika: mechatronika na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně v roce 2003 složením státní závěrečné zkoušky a obhajobou diplomové práce „Vytvoření modelu nohy robotu pro optimalizaci hmotnosti mechanismu“.

V letech 2003 – 2006 absolvoval pod vedením školitele Doc. Ing. Vladislava Singuleho, CSc. a školitele specialisty Doc. Ing. Čestmíra Ondrůška, CSc. prezenční doktorské studium, které ukončil v roce 2007 obhajobou disertační práce s názvem „Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava“.



Během studia se aktivně zapojil do řešení mezinárodního projektu 6. rámcového programu WISE - Integrated Wireless Sensing, který se zabýval vývojem technologií pro bezdrátové snímání v letectví. V rámci tohoto projektu absolvoval v letech 2005 – 2006 roční zahraniční stáž ve vývojovém centru firmy EADS, Mnichov, Německo. Tato mezinárodní zkušenost jej profilovala a poté svoji pozornost zaměřil na technologie získávání elektrické energie z okolí, především z parazitních mechanických vibrací a rázů.

Od roku 2007 se autor aktivně zapojuje do mezinárodního vědeckého prostoru a publikoval již několik desítek prací v oblasti získávání elektrické energie z okolí. Je autorem či spoluautorem 2 patentů, 12 článků v časopisech a více než 70 příspěvků na vědeckých konferencích. Dále spolupracoval na vývoji několika funkčních vzorků alternativních zdrojů elektrické energie pro letecký průmysl, jak v projektu WISE, tak v projektu 7. rámcového programu ESPOSA - Efficient Systems and Propulsion for Small Aircraft. Profesionálně se věnuje oblasti mechaniky a mechatroniky především z pohledu multidisciplinárního modelování a návrhu mechatronických soustav.

Autor byl řešitelem projektu FRVŠ 2526/2010 F1b „Zavedení nového předmětu: Využitelnost okolní energie pro mechatronické aplikace“. Kromě toho, že spolupracoval na již zmíněných projektech rámcových programů WISE a ESPOSA, byl členem řešitelského týmu v projektu TA02010259 „Komplexní cenově dostupný řídicí systém leteckých motorů“ a GA13-18219S „Výzkum umělé mikroelektromechanické kochley založené na bance mechanických filtrů“. Podílel se na výzkumném záměru MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav“ a byl koordinátorem projektu OPVK CZ.1.07/2.3.00/09.0162 „Znalosti a dovednosti v mechatronice – Transfer inovací do praxe“. V neposlední řadě se věnuje řešení vývojových úkolů z průmyslové praxe (Hiwin, IFE, Thermacut, Huawei).

V pedagogické oblasti zavedl a garantuje předmět „Alternativní zdroje energie v mechatronice“, který je vyučován v magisterském studijním programu pro obory Mechatronika, Inženýrská mechanika a biomechanika, Aplikovaná informatika a řízení. Tento předmět je vyučován také v anglickém jazyce pro studenty programu ERASMUS. Dále na Fakultě strojního inženýrství přednáší předmět „Technická mechanika“ a věnuje se vedení cvičení dalších předmětů v oblasti mechaniky těles. Vedl 19 diplomových a 27 bakalářských prací, které byly úspěšně obhájeny.

Odborné zájmy zahrnují především oblast získávání elektrické energie z okolí. Jedná se především o elektromagnetický princip přeměny mechanických vibrací, ale v posledních letech spolupracuje i na vývoji s využitím dalších principů a technologií pro autonomní bezdrátové snímání v praxi. Dále se autor věnuje i multidisciplinárnímu modelování dynamiky mechatronických soustav, které je nezbytné ovládat pro vývoj alternativních zdrojů energie.

# 1 ÚVOD

Předkládaná habilitační práce se zabývá vývojem a metodami vývoje technologií generování elektrické energie z okolních a všudypřítomných parazitních zdrojů energie pro nízkopříkonovou a autonomní elektroniku. Tyto technologie jsou obecně označovány jako Energy Harvesting či Energy Scavenging a patří sem především fotovoltaické články, termoelektrické generátory a speciální elektromechanické generátory pracující na fyzikálním principu elektrostatické, elektromagnetické, piezoelektrické nebo magnetostrikční přeměny energie. Jedná se o alternativní a autonomní zdroje elektrické energie, které obecně mají výkon v jednotkách až desítkách miliwattů. Tyto alternativní zdroje mají za úkol nahradit baterie především v bezdrátových a autonomních aplikacích a prodloužit tak dobu chodu především bezdrátového prvku bez jakékoliv údržby. Takto navržené autonomní bezdrátové prvky je pak možno integrovat do konstrukce inženýrské soustavy, kde mohou s napájenou elektronikou pracovat po celou dobu životnosti inženýrské soustavy, např. autonomní bezdrátový monitoring parametrů mostních konstrukcí, budov, draků letadel, pohonových soustav, atd. V těchto rozsáhlých inženýrských soustavách se obvykle při běžném provozu objevuje i několik typů parazitní či odpadní energie, která může být využita pro napájení nízkopříkonových elektronických prvků. Ty jsou v dané soustavě využity k autonomnímu monitorování či diagnostice parametrů technické soustavy. Ve strojních soustavách mluvíme především o energii odpadního tepla a vytvořeného teplotního rozdílu nebo mechanických vibrací či rázech vyskytujících se při chodu inženýrské soustavy.

Práce se majoritně věnuje vývoji mechatronické soustavy autonomního generátoru, který využívá parazitní energii mechanických vibrací či rázů ke generování užitečné elektrické energie. Vývoj této mechatronické soustavy je založen na multidisciplinárním modelování a verifikované modely jsou optimalizovány pro správnou funkci celého autonomního zdroje energie.

## 2 MOTIVACE

Dostupnost a spotřeba elektrické energie je pro mnoho moderních a autonomních zařízení limitujícím faktorem, především pro neomezené využívání moderních komunikačních prvků. A nutno dodat, že využití komunikačních prvků se v dnešní moderní době stalo nedílnou součástí životního stylu většiny populace nejen rozvinutých zemí světa. Komunikace není jen o spojení mezi lidmi, ale s nástupem nového milénia se komunikace dostala i ke strojům. Komunikace mezi stroji, která používá označení machine-to-machine, zkráceně M2M komunikace, je již standardem i pro komunikaci mezi technickými zařízeními v nejen v rozsáhlých technických soustavách jako jsou rafinérie, potrubní soustavy, moderní výrobní závody, atd., kdy se běžně využívá pro potřeby monitorování, měření a automatizace výrobních a přepravních procesů, ale nyní je běžná i v dříve nemyslitelných zařízeních, které bezesporu můžeme označit jako mechatronické soustavy. Jedná se o moderní letadla, automobily a dopravní prostředky obecně, výrobní stroje a roboty v průmyslu, atd., ale v dnešní době zde patří třeba i běžné domácí spotřebiče, hračky a nástroje zábavy.

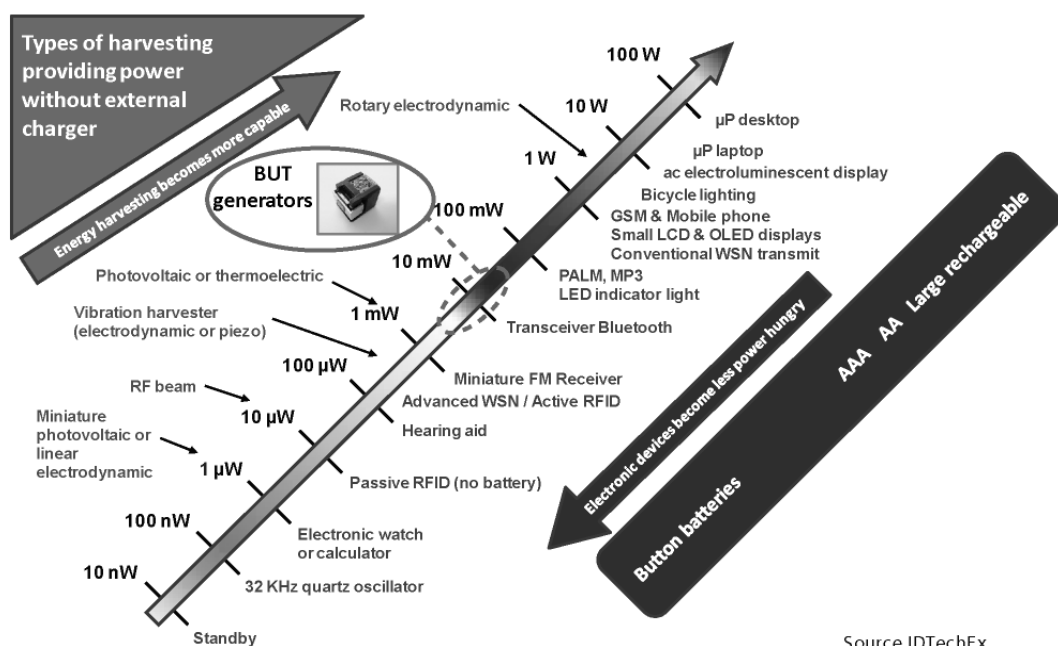
Komunikace v technických soustavách probíhá pro potřeby snímání, monitorování, automatizace a řízení s cílem co největší přidané hodnoty zařízení včetně úspory energie. S vývojem mobilních technologií a bezdrátových komunikačních protokolů se stále častěji i v těchto uvedených technických soustavách objevují bezdrátové komunikační prvky. Proč bezdrátové technologie? Bezdrátové technologie zvyšují komfort, snižují náklady na materiál kabelů a jejich instalaci a v mnoha případech lze jejím použitím zvýšit přidanou hodnotu technické soustavy. Bezdrátové sensorické sítě jsou již dnes zcela nezbytné pro monitorování prvků letadel a stále častěji i prvků automobilů, tedy tzv. kritických aplikací. Aktuálně je např. legislativně předepsáno snímání tlaku v pneumatikách u všech nově prodávaných vozů, a zde skoro všechny automobilky využívají bezdrátový senzor.

Komunikace mezi zařízeními se stává nezbytnou, pokud budeme mluvit o pojmech jako je Smart City, Smart Grid, energeticky nezávislé zelené budovy, výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů a hlavně do budoucna masivní využití elektrických vozidel. Komunikace mezi jednotlivými zařízeními a prvky technických celků se stává nezbytnou pro správnou funkci celých energetických sítí a efektivní využití obnovitelných zdrojů energie. V tomto kontextu mluvíme o pojmu internet věcí (internet of things) známý pod zkratkou IOT, kdy jednotlivá elektronická zařízení jsou schopna mezi sebou komunikovat, sdílet informační toky, a tímto lze v režimu SMART i predikovat a diktovat energetické požadavky a funkce jednotlivých zařízení, která mohou být efektivně řízeny. I zde hraje významnou roli bezdrátová komunikace mezi jednotlivými prvky a celky, a jedná se o velkém množství bezdrátových senzorů a ovládacích prvků. Např. firma EnOcean implementovala v roce 2013 více než 20 000 bezdrátových snímačů do SMART budovy s názvem The Squire v blízkosti letiště ve Frankfurtu s cílem vylepšit efektivnost a snížit energetické nároky této moderní stavby.

S významem slova bezdrátový se všem ihned vybaví moderní smartphone a jeho každodenní nabíjení. Z této zkušenosti je každému člověku jasné, že zdroj elektrické energie je zásadní pro využití bezdrátových technologií. Akumulační prvky prodělaly spolu s vývojem bezdrátových technologií výrazný pokrok a v některých aplikacích není problém i několikaletý provoz bezdrátového senzoru na jednu baterii. Vývoj probíhá v obou odvětvích současně a snižují se i energetické nároky na bezdrátovou komunikaci a elektroniku. Zde je již standardem pojem Ultra-Low-Power electronics, zkráceně ULP elektronika, která je při napájení bateriemi nezbytná pro dlouhodobou komunikaci. V případě bezdrátové ULP elektroniky mluvíme o příkonu těchto zařízení v jednotkách miliWattů, ale stále je lákavá vize nezávislé elektroniky, která by se nejlépe napájela sama a baterie by nevyužívala. Různé formy okolní energie se vyskytují téměř v každém technickém prostředí ve formě slunečního svitu či jiného záření, teplotního gradientu nebo mechanické energie. Množství okolní energie je obvykle velmi malé a do nedávna bylo zcela zanedbáváno. Nicméně pokud mluvíme o ULP elektronice, tak zde si již můžeme zcela realisticky klást otázku, zda by celý bezdrátový prvek založený na ULP elektronice nemohl napájet sám sebe, a tím zredukovat použití, či výrazně prodloužili životnost baterií pro tyto bezdrátové prvky. Zásadním prvkem je v tomto případě konvertor okolní energie na energii elektrickou a v kombinaci z ULP elektronikou vytvoří tento prvek zcela autonomní zařízení, které je označována jako self-powered electronic system.

Účinné generování elektrické energie z okolí v dostatečném množství je zásadní pro použití autonomních elektronických obvodů, ať pro bezdrátové sensorické sítě, či pro autonomní elektronické prvky, obr. 1. Tyto technologie mají ve světě obecné označení energy harvesting a zahrnují všechny druhy získávání elektrické energie z okolí pro ULP elektroniku.

Ve strojírenských aplikacích, jako jsou dopravní prostředky či výrobní technologické celky, je zajímavým zdrojem okolní energie nějaký druh mechanické energie. Především se jedná o kinetickou energii rázů a vibrací, které se chtěně či nechťně vyskytují u všech strojírenských soustav. Velikost této okolní energie je ovlivněna funkcí a přesností dané strojní soustavy. Ale v dopravních prostředcích, jako jsou letadla, auta či vlaky, se vyskytuje velké množství vibrací a rázů, které prostupují téměř celou soustavou, a tudíž jsou zajímavým zdrojem okolní energie pro nepřeberné množství autonomních či bezdrátových prvků se širokým spektrem využití – od monitorování až po ovládání či regulaci. Další typy okolní mechanické energie mohou mít formu cyklické deformace jednotlivých součástí či fluktuace tlaku především u hydraulických a pneumatických soustav.



Source IDTechEx

**Obr. 1. Přehled výkonových požadavků elektronických zařízení a možnosti energy harvesting zdrojů ([www.idtechex.com](http://www.idtechex.com)) – vyvinutý generátor začleněn do přehledu**

Pokud se vrátíme k budově The Squire, která má přes 20 000 kusů bezdrátových senzorů pro efektivní automatizaci budovy jako celku, je zcela zřejmé, že tyto bezdrátové senzory nemohou být anebo jen okrajově jsou napájeny bateriemi. I kdyby baterie měly životnost několik let, jejich výměna by byla logisticky velmi nákladná a cenově nezanedbatelná. Proto je zde velký prostor pro využití okolní energie a všech 20 000 bezdrátových senzorů v této budově je zcela autonomních, využívajících solární, tepelnou a mechanickou energii, která je k dispozici vždy v místě umístění senzoru během jeho provozu.

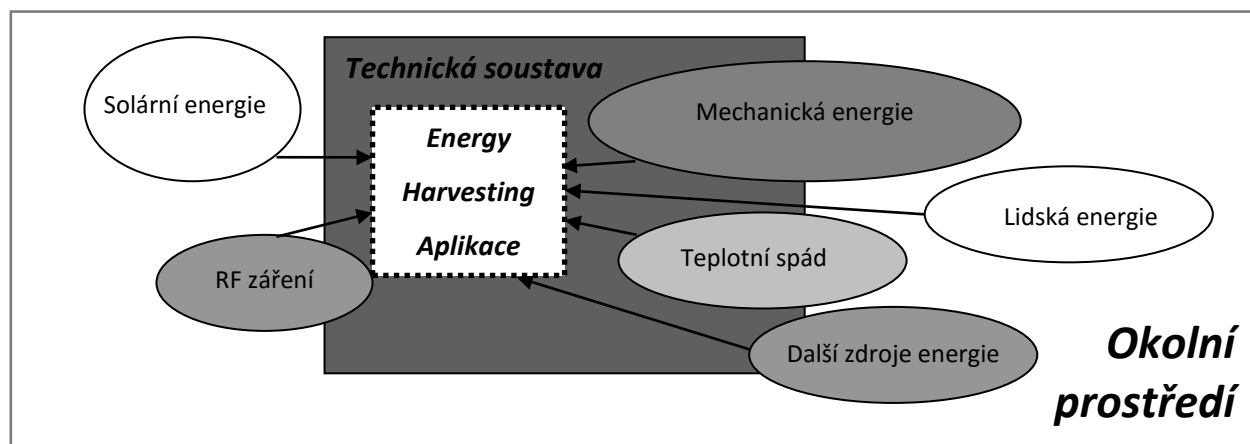
Energy harvesting technologie jsou tedy zajímavým řešením pro napájení zejména bezdrátových senzorických sítí, kdy odpadají náklady na instalaci kabelů, jak s elektrickou energií, tak pro komunikaci. Senzor však musí být umístěn v místě s dodatečnou okolní energií, a to především v dopravních aplikacích není problém. Proto o tyto technologie na začátku milénia projevil největší zájem letecký průmysl, který si klade za úkol snižovat náklady na provoz. Bezdrátové technologie v letectví mají za hlavní cíl snížit hmotnost letounu odstraněním množství kabeláže. Druhou hybnou silou jsou provozní náklady na údržbu letounů při zachování bezpečnosti, kdy jsou jednotlivé prvky konstrukce monitorovány, je vyhodnocováno jejich opotřebení a zvyšuje se efektivita údržby a generálních oprav. Tyto dva důvody vedly k velkému rozmachu energy harvesting technologií, které mají nyní širší oblasti uplatnění a jejich použití není de facto omezené. Se snižováním energetických nároků bezdrátových technologií nachází nové a nové uplatnění i v dalších oborech moderní strojírenské výroby a aplikací. Přičemž většina moderních strojírenských výrobků má charakter mechatrické soustavy.

Tato habilitační práce je zaměřena na technologii energy harvesting z mechanické energie vibrací, konkrétně na vývoj samotných autonomních zdrojů elektrické energie především pro napájení a s tím související autonomní využití bezdrátových senzorů v leteckém průmyslu. V práci jsou také uvedeny metody vývoje nezávislých zdrojů energie z tepelného spádu, které rovněž mají velký potenciál pro využití v leteckém průmyslu. Technologie energy harvesting jsou zajímavým řešením nejen pro průmyslové aplikace, ale i pro autonomní napájení biomedicínských aplikací. V práci je také nastíněn vývoj autonomního zdroje elektrické energie pro unikátní biomedicínské zařízení umělé kochley.



### 3 PŘEHLED ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH PRINCIPŮ ZÍSKÁVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OKOLÍ

Na obr. 2 je schematicky znázorněna obecná technická soustava a obvyklé zdroje energie v ní samé a v okolním prostředí. Pokud v technické soustavě budeme uvažovat využití zdroje energie z okolí pro danou autonomní aplikaci, zkráceně budeme používat převzatý název *energy harvesting zdroj*, máme na výběr vždy několik zdrojů energie (Priya a Inman, 2009), které lze použít pro napájení nízkopříkonové elektroniky ULP.



Obr. 2. Zdroje energie v technické soustavě a jejím okolním prostředí

Energy harvesting aplikace jsou zaměřeny na napájení moderních ULP elektronických zařízení (Beeby et al., 2007), která mohou být standardně napájena bateriemi či akumulátory, ale z hlediska přístupu či životnosti je vhodné využít některý z uvedených zdrojů energie i pro tuto ULP elektroniku. V práci jsou popsány fyzikální principy získávání elektrické energie z okolí (Arnold, 2007) a vývoj autonomního zdroje energie pro autonomní ULP zařízení v rámci řešených projektů. Definice energy harvesting zdroje je definována v publikaci (Mateu a Moll, 2005):

*“An energy harvesting device generates electric energy from its surroundings using some energy conversion method. Therefore, the energy harvesting devices here considered do not consume any fuel or substance. On the other hand the environment energy levels are very low (at least for today’s electronic devices requirements).”*

#### 3.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY GENEROVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

##### 3.1.1 Vibrace jako zdroj energie

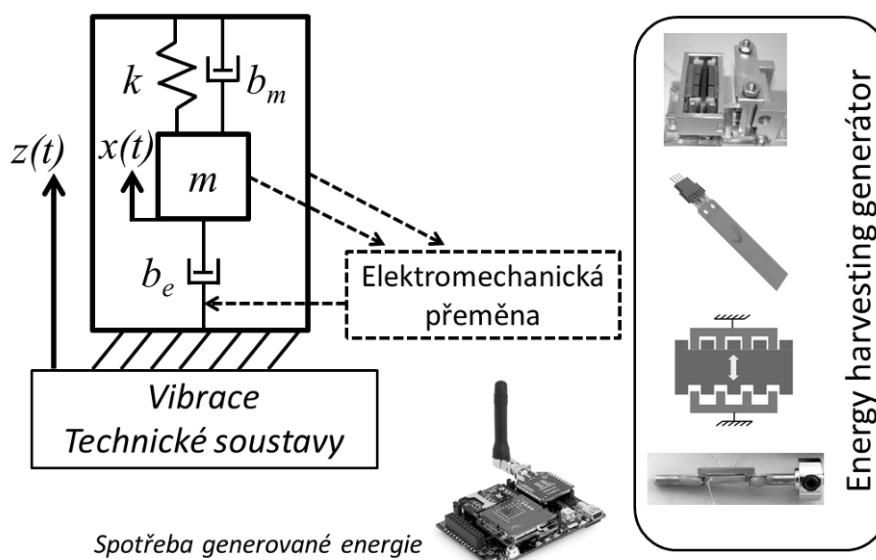
Konstrukce elektromechanického energy harvesting zdroje elektrické energie je založena na resonanci (Paradiso a Starner, 2005). Resonanční mechanismus, většinou s jedním stupněm volnosti, obr. 3, je naladěný na frekvenci vibrací. Zavěšená hmota  $m$  při naladěné tuhosti mechanismu  $k$  je rozpořehována kinematickým buzením okolní mechanické energie vibrací  $z$  a výsledný relativní pohyb  $x$  je transformován na užitečnou elektrickou energii některým fyzikálním principem elektromechanické přeměny. Relativní pohyb je ovlivněn velikostí kinematického buzení a frekvencí vibrace (Williams a Yates, 1996). Rovnice kmitání s jedním stupněm volnosti s kinematickým buzením okolní vibrací (1) je vyjádřena v relativní souřadnici  $x$  vzhledem k souřadnému systému spojenému s vibrující technickou soustavou jako

$$m\ddot{x}(t) + b_m \dot{x}(t) + b_e \dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{z}(t) \quad (1)$$

Zásadními parametry rezonančního mechanismu, které definují maximální generovaný elektrický výkon, jsou velikosti mechanického  $b_m$  a elektrického tlumení  $b_e$  v rezonančním mechanismu. Mechanické tlumení je tvořeno materiálovým tlumením, třením, atd. v rezonančním mechanismu energy harvesting zdroje. Elektrické tlumení je definováno disipací elektrické energie z kmitajícího systému a její spotřebou v elektrické části systému (reakcí kotvy), schematicky zobrazeno na obr. 3.

Mechanický energy harvesting zdroj elektrické energie využívá relativní pohyb hmoty, který je popsán pohybovou rovnicí (1), a jeho kinetická energie je transformována využitím některého ze známých fyzikálních principů (Mateu a Moll, 2005) elektromechanické energetické přeměny, jmenovitě:

- elektromagnetickým principem,
- piezoelektrickým principem,
- elektrostatickým principem,
- magnetostrikčním principem.



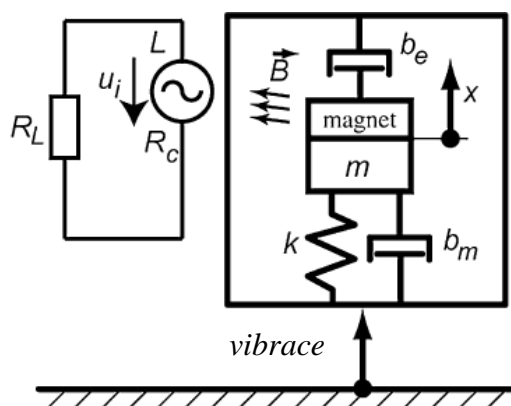
**Obr. 3. Princip energy harvesting z mechanické energie**

Elektrické tlumení tvoří zápornou zpětnou vazbu mechanického rezonančního systému a ovlivňuje množství generované užitečné elektrické energie. Energetická analýza byla již několikrát publikována, např. (Williams a Yates, 1996). V případě nevhodně navržených parametrů částí výkonové elektroniky může být funkce i velmi efektivního energy harvesting zdroje nevhodným chováním výkonové elektroniky omezena (Amirtharajah et al., 2006), případně generování zcela minimalizováno. Proto je nejdůležitější součástí vývoje a návrhu celého energy harvesting zdroje sladění zdroje a výkonové elektroniky s cílem maximálního generování výkonu (Lefeuvre et al., 2007).

Elektromagnetický princip (Beeby et al., 2007) je založen na pohybu vodiče rychlostí  $\vec{v}$  ve stacionárním magnetickém poli  $\vec{B}$  či opačně. Dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce (2) se indukuje na vodiči elektromotorické napětí  $u_i$  a při připojení elektrické zátěže elektrickým obvodem teče proud.

$$u_i = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{r} \quad (2)$$

Pro vytvoření magnetického pole se používají především magnety ze vzácných zemin, které jsou poddajně uloženy vůči stacionární cívice  $c$ . Elektromagnetický princip je schematicky znázorněn na obr. 4, kde kinematické buzení vynucuje kmitavý pohyb magnetického obvodu a v kotvě cívkou indukce napětí.



**Obr. 4.** Schéma modelu elektromagnetického principu vibračního energy harvesting generátoru s rezonančním mechanismem s jedním stupněm volnosti

Piezoelektrický princip (Benasciutti et al., 2009) je založen na piezoelektrickém jevu některých materiálů, které při vlastní deformaci v určitém směru uvolní na svých plochách náboj. Pokud tyto plochy opatříme elektrodami a k elektrodám připojíme elektrickou zátěž, tak touto mechanickou deformací generujeme elektrickou energii. Využívá se především PZT keramických materiálů, ale i piezoelektrických polymerů, které jsou fixovány na nosnících či membránách. Při kinematickém buzení vibracemi jsou tyto prvky deformovány a dochází ke generování elektrické energie.

Elektrostatický princip (Naruse et al., 2009) je založen na funkci kondenzátoru s proměnlivou tloušťkou dielektrika. Vstupní mechanická energie z okolí způsobí vzájemný pohyb elektrod a díky této proměnlivé tloušťce dielektrika lze odebírat elektrickou energii ze systému. Využití je především v mikroskopickém režimu, zejména v MEMS zařízeních, kdy je celý rezonanční mechanismus vyleptán přímo na křemíkových deskách.

Magnetostrikce (Naifar et al., 2014) je fyzikální jev, kdy se deformací určitých materiálů deformují magnetické dipóly, a vzniká proměnlivé magnetické pole, a ve stacionární cívice tato změna magnetického pole indukce elektromotorické napětí. Velmi využívaným materiálem s největšími magnetostrikčními vlastnostmi je slitina Terfenol-D.

**Tab. 1:** charakteristika jednotlivých fyzikálních principů elektromechanické přeměny

Princip	Charakteristika
<i>Elektrostatický</i>	+ MEMS struktura – vysoké pracovní frekvence cca kHz + Integrace konstrukce do napájeného čipu - Nízký výkon - Mechanické omezení musí být zahrnuto v konstrukci
<i>Piezoelektrický</i>	+ Vhodný zdroj pro frekvence vibrací v řádu desítek až stovek Hz + Vysoké napětí - Vysoká impedance pro nízké frekvence, malý proud
<i>Elektromagnetický</i>	+ Vhodný zdroj pro nízké frekvence pohybu – odpovídají tomu poměrně vysoké změny magnetického toku cívkou + Dostatečný výkon v případě neexistence omezení objemu a hmotnosti - Obvykle nízké napětí – stovky milivoltů až jednotky voltů
<i>Magnetostrikční</i>	+ Kombinace výhod piezoelektrického a elektromagnetického principu - Dostupnost magnetostrikčních materiálů s požadovanými parametry

### 3.1.2 Využití lidské energie

Aktivní i pasivní lidské chování je vydatným zdrojem okolní mechanické energie a je využitelné v mnoha aplikacích lidské činnosti (Poulin et al., 2004). Využívají se všechny již zmíněné principy elektromechanické přeměny, ať se jedná o aktivní a účelné vyvíjení mechanické energie (např. třepací baterie) či využití chůze a dalších pohybů (Patel a Khamesee, 2013).

V minulosti se jednalo především o napájení vojenských zařízení ozbrojených jednotek v nepřístupných oblastech jako je noční vidění či telekomunikace. V současnosti s vývojem biomedicínských zařízení je kritickým prvkem zdroj elektrické energie. Pro kardiostimulátory či naslouchadla nebo dávkovače léků je elektrická nezávislost v souvislosti s životností aplikace či komfortnosti jeho používání klíčová.

Lidskou energii lze využít jako zdroj pro autonomní ovládací prvky jako jsou tlačítka volby ve výtahu (budova Madrid) či světelné spínače v místnostech (EnOcean), kdy zmáčknutím tlačítka vygenerujeme dostatek energie pro bezdrátový přenos informace o stavu ovládacího prvku. Firma Arveni dokonce vyvinula nezávislý tlačítkový dálkový ovladač televizorů.

V současnosti jsou především v Nizozemí v módě taneční kluby, kde se při tanci na speciálním parketu generuje elektrická energie pro světelné efekty. Stále častější je i použití aktivních dlaždic na chodnících (Velká Británie), silnicích (Izrael) či fotbalových hřištích (Brazílie), kdy stlačení dlaždice při chůzi, běhu či přejezdu generuje elektrickou energii.

### 3.1.3 Fotovoltaický jev

Základním principem fotovoltaického jevu je uvolnění elektronu po dopadu fotonu na polovodičový materiál s PN přechodem. Uvolněné elektrony vytvoří v polovodičovém materiálu kladný náboj, který se pohybuje k elektrodě se stejnou polaritou. Při propojení jednotlivých elektrod vznikají fotovoltaické články (Nasiri et al., 2009). V současnosti je využíváno několik typů fotovoltaických technologií (Krikke, 2005), jako jsou krystalické křemíkové technologie, tenké vrstvy, nekřemíkové technologie a technologie založené na organických látkách. Účinnosti těchto článků záleží na zvolené technologii a pohybují se mezi 9 a 46 procenty.

### 3.1.4 Seebeckův jev

Seebeckův jev je založen na toku elektronů mezi dvěma kovovými či polovodičovými materiály, který nastává při rozdílných teplotách těchto materiálů. Velikost napětí závisí na hodnotách Seebeckových koeficientů jednotlivých materiálů a teplotním rozdílu studené a teplé strany. Kromě vhodných Seebeckových koeficientů musí mít použité materiály i malou tepelnou vodivost. Spojením několika termoelektrických dvojic vzniká tzv. termoelektrický generátor (D. M. Rowe, 2005), zkráceně TEG. V současné době jsou TEG založeny na materiálech na bázi bismutu a teluru.

### 3.1.5 Další zdroje energie

V rychle se vyvíjejících energy harvesting aplikacích najdete mnoho zcela unikátních zdrojů energie od využití tlaku lidské krve (Pfenniger et al., 2013) pro napájení kardiostimulátoru přes „nano-kartáčové“ ZnO generátory, tribologické generátory přeměňující tření na elektrinu až po „tepelné vibrace“ využívající pyroelektrický jev (Bowen et al., 2014).

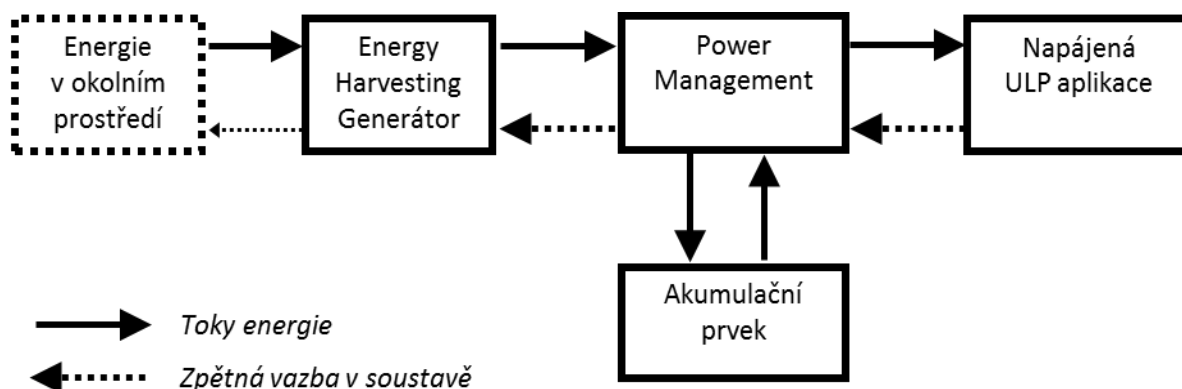
Technologie energy harvesting jsou za posledních 10 let intenzivně rozvíjením se vědním oborem a v rozsahu této práce není možné jednotně popsat tyto fyzikálně zcela odlišné jevy a principy. Vše závisí na daných vstupních parametrech a požadavcích napájeného zařízení a téměř vždy lze najít nějaký unikátní alternativní zdroj energie.

## 3.2 MECHATRONICKÁ SOUSTAVA ENERGY HARVESTING APLIKACE

### 3.2.1 Topologie mechatronické soustavy energy harvesting aplikace

Zcela obecně lze celý energy harvesting zdroj s napájenou aplikací chápat jako mechatronickou soustavu, která obsahuje jak toky energií, tak zpětné energetické vazby, které zásadně ovlivňují použití takového zdroje energie. Tato mechatronická soustava je znázorněna na následujícím obr. 5 a v principu je tato topologie použitelná pro různé typy okolní primární energie.

Vývoj autonomního zdroje elektrické energie z okolí je základním stavebním kamenem prezentovaných bezdrátových a autonomních technologií (Ottman et al., 2002), ale vzhledem k jednotlivým zpětným vazbám v tomto systému musíme celou soustavu chápat jako mechatronickou, a tudíž ji vyvíjet jako funkčně a prostorově integrovanou entitu. Energy harvesting generátor využívá zpravidla parazitní zdroje energií, které obecně mají velmi malou energetickou hustotu. Proto je tento generátor měkkým zdrojem energie a přílišné zatížení výrazně sníží generovaný výkon. Na druhé straně pokud bude napájená aplikace klást malé energetické nároky na zdroj energie, bude tento generátor předdimenzovaný, a bude generovat jen zlomek svého optimálního výkonu, což je v kritických aplikacích leteckého průmyslu nepřijatelné. Proto musí všechny energy harvesting aplikace obsahovat výkonový obvod, tzv. power management, který zajistí tzv. výkonové přizpůsobení, tedy optimální odběr energie z energy harvesting generátoru a umožní korektní funkci napájené ULP aplikace (Raghunathan a Chou, 2006).



**Obr. 5. Topologie mechatronické soustavy energy harvesting aplikace s napájenou ULP elektronikou**

Musíme si ale uvědomit, že příkon napájené aplikace je v řádu několika miliwattů, a proto nelze použít běžné výkonové prvky s aktivními operačními zesilovači (James et al., 2004). Tyto obvody by na svoji korektní funkci spotřebovaly více energie než velmi komplikovaně energy harvesting generátor vyrobí z nízké hustoty okolní parazitní energie. Energy harvesting aplikace proto využívají integrované výkonové obvody on-chip, které jsou v posledních 2 – 3 letech běžně komerčně dostupné pro různé typy zdrojů energie a různé napájené aplikace.

Důležitým elementem celého energy harvesting systému je i akumulární člen, který vykryvá energetické nároky po dobu, kdy není dostatek okolní energie. Jedná se především o různé druhy kondenzátorů, superkapacitorů či speciálních mikro-akumulátorů (Chao et al., 2007).

### 3.2.2 Komerční řešení energy harvesting generátorů

Energy harvesting generátor je klíčovým prvkem celé bezdrátové aplikace využívající okolní energii k autonomnímu chodu (Glynne-Jones et al., 2004). V současnosti je na trhu několik komerčně úspěšných produktů využívajících základní fyzikální principy energetické přeměny. Tyto generátory jsou vyvinuty pro konkrétní aplikace a jejich obecné použití v jiném prostředí je většinou velmi obtížné. Asi nejúspěšnějším energy harvesting generátorem, využívajícím

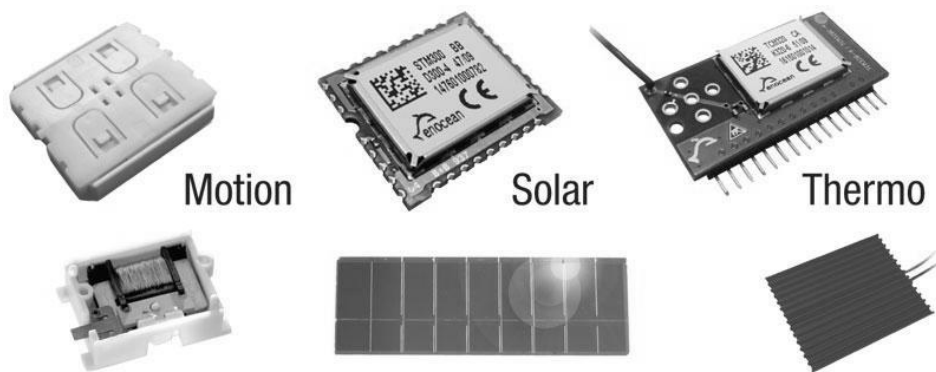
elektromagnetický princip, je výrobek firmy Perpetuum, obr. 6. Tento generátor slouží jako autonomní zdroj elektrické energie pro monitorování podvozků vlakových soustav ve Velké Británii.

Další komerčně úspěšné energy harvesting generátory nabízí firma EnOcean, obr. 7, která má ve svém portfoliu jak mechanické tlačítkové generátory, tak i solární a termoelektrické generátory. Jejich uplatnění v automatizaci moderních budov je nesporné, jak bylo uvedeno v kapitole 2.

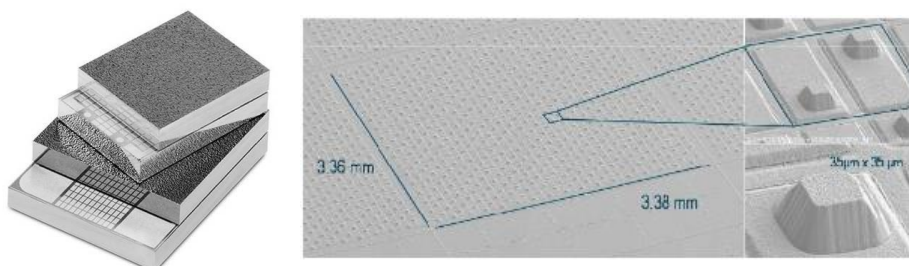
V oblasti termoelektrických generátorů, TEG, je důležité využít energy harvesting zdroj s dostatečným počtem termoelektrických dvojic pro generování dostatečného napětí. Proto se jako komerčně úspěšné pro výrobu TEG jeví využití MEMS technologií. Tyto moduly poskytují i při malých rozměrech dostatečný výkon pro autonomní aplikace. Jedním z výrobců je firma Micropelt, obr. 8, a dále firma Nextreme Thermal Solutions, která však k loňskému roku ukončila distribuci svých výrobků, které byly testovány i na našem pracovišti.



**Obr. 6. Komerčně nejúspěšnější aplikace elektromagnetického energy harvesting zdroje**



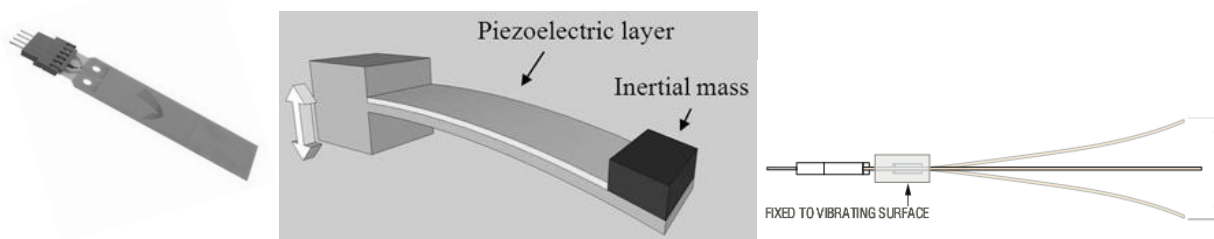
**Obr. 7. Energy harvesting produkty firmy EnOcean**



**Obr. 8. TEG založený na MEMS konstrukci firmy Micropelt**

Firem, které vyvinuly energy harvesting zdroj energie pro dané vstupní podmínky a parametry okolí a do několika měsíců svou produkci ukončily, je několik. Problémem je velmi obtížná unifikace alternativních zdrojů energie pro široké rozpětí vstupních a výstupních parametrů, které se v těchto technologiích vyskytují. Je velmi důležité se na celou soustavu dívat jednotně a vyvíjet celou energy harvesting aplikaci komplexně a dohromady. Jen tak lze získat optimální návrh energy harvesting aplikace s bezdrátovými technologiemi. Takováto aplikace má pak minimálními nároky na energii jak vstupní, tak generovanou, a poskytne maximální přidanou hodnotu dle potřeb zákazníka (např. autonomní a bezdrátový senzor pro konkrétní technickou aplikaci).

Velkou výhodou v principu a konstrukci poskytují piezoelektrické generátory, které mají piezoelektrickou strukturu nanesenou na poddajném nosníku o různých délkách a šířkách. Dle přidané hmotnosti rezonančního obvodu lze parametry generátoru ladit na požadovanou pracovní frekvenci a se správnou volbou piezoelementu lze velmi snadno sladit návrh tohoto energy harvesting generátoru s dalšími prvky aplikace, jako jsou power management, akumulátor a napájený bezdrátový senzor či autonomní aplikace. Příkladem takového výrobku je řada produktů firmy MIDE. Příklad tohoto výrobku je zobrazen na obr. 9, kde je vidět plocha pro možné umístění přídatné ladící hmotnosti.



Obr. 9. Příklad piezoelektrického generátoru firmy MIDE

### 3.2.3 Power management elektronika a akumulace energie

V energy harvesting aplikacích můžeme identifikovat dva základní typy zdrojů elektrické energie, a to stejnosměrné a střídavé zdroje napětí. TEG a fotovoltaické články jsou zdroji stejnosměrného napětí. V mnoha aplikacích je toto napětí poměrně nízké a je potřeba využít DC-DC převodníky pro napájení nízko-příkonové elektroniky. Při generování elektrické energie z okolní mechanické je výstupní napětí střídavé a je potřeba jej usměrnit a stabilizovat. Důležité je, aby hodnota střídavého napětí byla dostatečná pro použití usměrňovače. Lze použít Schotkyho diody s velmi malým úbytkem napětí a generované napětí cca 0,5 V je již pro usměrnění a stabilizaci v moderních power management obvodech využitelné. Lze využít i zdvojnásobovače napětí, ale část energie se na tomto zdvojnásobovací ztrácí.

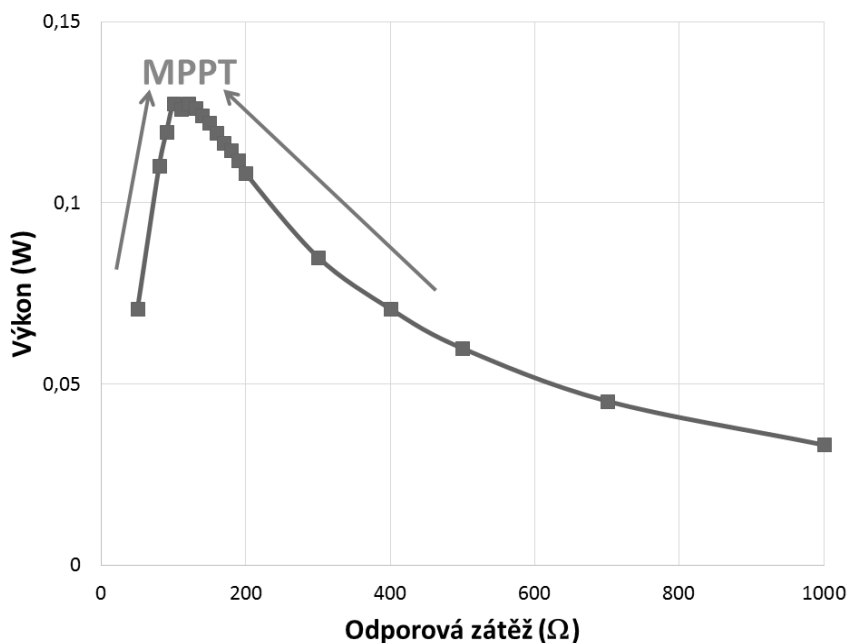
Výkonová elektronika v energy harvesting aplikaci má za úkol nejen usměrnit a stabilizovat výstupní napětí, ale hlavně optimálně odebrat generovaný výkon, který je využíván přímo napájenou UPL aplikací (Amirtharaiah et al., 2006), nebo nabíjet akumulární prvek, ale i zajistit distribuci energie mezi akumulárním prvkem a napájenou ULP aplikací (Chao et al., 2007).

Tyto funkce v energy harvesting aplikacích lze rozdělit do několika základních typů:

- Kontinuální generování energie a kontinuální odběr napájené aplikace – akumulace přebytečné energie v případě vypnutí zdroje energie.
- Nepravidelné generování energie a periodický odběr s danou provozní periodou – během této doby akumulace energie.
- Nepravidelné generování energie a její akumulování – v případě dostatečné kapacity akumulované energie nastává nepravidelný jednorázový odběr.
- Nepravidelné skokové generování velkého množství energie a její akumulování do akumulárního prvku, který kontinuálně či periodicky napájí aplikaci.

Dle nastíněné funkce je zřetelné, že použitá elektronika musí být schopna usměrnit, stabilizovat a zachytit generovanou elektrickou energii v akumulacním členu. Tato energie je poté využita pro napájení autonomní ULP aplikace. Power management obvody jsou cílem vývoje předních výrobců elektroniky, jako jsou firmy TI, Linear technology, Maxim integrated, Cymber, atd. Výsledkem vývoje posledních 5 let jsou obvody integrované do čipu (Power management on-chip), které běžně mají vlastní spotřebu v řádu nanoampérů a dokážou z energie harvesting zdroje odebrat optimální množství energie, distribuovat energii do připraveného akumulacního členu a poté napájet ULP aplikaci.

Power management elektronika a čipy jsou vyvíjeny dle požadavků na vstupní a výstupní napětí, které korespondují s danou energy harvesting technologií. Dále dle teplotního rozsahu, maximálního výstupního proudu a nastavení odebíraného proudu. Každý fyzikální princip energy harvesting generátoru vyžaduje jiný přístup k optimálnímu generování elektrické energie. Pro fotovoltaické články a termoelektrické generátory se využívá jednoduché nastavení optimálního výkonu, které není vhodné pro elektrodynamické generátory využívající parazitní mechanickou energii. Obecně se tato funkce power management čipu nazývá maximum power point tracking (MPPT) a má za úkol i za proměnlivých podmínek využít maximální výkon z měkkého energy harvesting zdroje energie. Princip MPPT je znázorněn na obr. 10, kdy je zobrazena charakteristika vyvinutého elektromagnetického generátoru, a principem je zajistit činnost stále v oblasti maximálního možného výkonu při daných vstupních podmínkách.



**Obr. 10. Princip maximum power point tracking v charakteristice vyvinutého vibračního energy harvesting generátoru**

V minulosti bylo testováno několik komerčních power management obvodů ve vyvíjených aplikacích. Jen některé obvody se jeví jako vhodné pro námi vyvinuté energy harvesting zdroje. Generovaný výkon je těmito elektronickými obvody distribuován pro nabíjení kondenzátorů, superkapacitorů anebo speciálních mikro-akumulátorů (thin film batteries). Tato energie je dále využitelná pro napájení ULP aplikace. Na trhu je nepřehledné množství obvodů a komerčně dostupných power management čipů, ale při vývoji samotného generátoru se musí uvažovat integrace jejich funkcí, především vhodný princip sledování maximálního výkonu, viz MPPT.

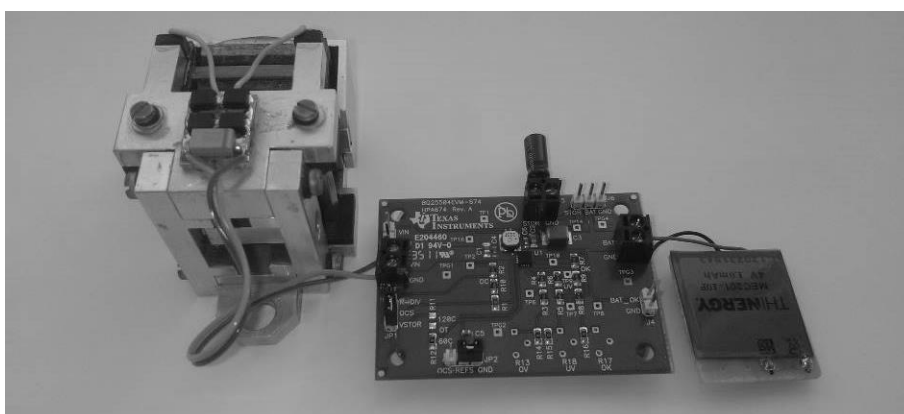


### 3.2.4 Vyvinutá energy harvesting aplikace jako mechatronická soustava

Z textu výše je patrné, že díky komplexnosti celé soustavy energy harvesting aplikace, je při jejím návrhu a vývoji dané aplikace jako celku velmi výhodné využít mechatronický přístup. Na základě zkušeností získaných za posledních 10 let vývoje těchto aplikací v několika projektech jsem si potvrdil, že samostatný vývoj jednotlivých prvků celé energy harvesting aplikace většinou nevede k optimálnímu návrhu, což je hlavně v kritických aplikacích jako je letectví zásadní. Proto se tato předkládaná práce zabývá vývojem energy harvesting generátoru v souvislostech s napájením konkrétních aplikací a laděním všech parametrů vzhledem k optimálnímu výkonu a poměru velikost a hmotnost versus generovaný výkon.

Pro potřeby verifikace vhodnosti vyvinutých energy harvesting zdrojů energie byla použita testovací elektronika připojená k vibračnímu energy harvesting generátoru, která se skládá z usměrňovače, power management obvodu umístěného na vývojovém kitu TI BQ25504, a připojenou thin-film mikro-baterií THINERGY. Power management TI BQ25504 on-chip představuje ULP zvyšující měnič s funkcí nabíjení a managementu baterií.

Tato energy harvesting soustava spolu se zdrojem energie představuje celou mechatronickou soustavu energy harvesting aplikace, obr. 11, se všemi toky energií a zpětnými vazbami, které jsou znázorněny v topologickém schématu této aplikace, viz obr. 5. Velkou výhodou tohoto konceptu je využití power management obvodu on-chip, který dokáže energii optimálně akumulovat v baterii a přitom energii z baterie distribuovat přímo napájené aplikaci, tudíž např. připojený bezdrátový senzor a jeho pracovní režim neovlivňuje přímo provoz energy harvesting generátoru, ale využívá energii pouze z akumulárního členu.



**Obr. 11. Mechatronická soustava energy harvesting aplikace: vibrační energy harvesting generátor s power management elektronikou a mikro-baterií**

### 3.3 BEZDRÁTOVÉ PRVKY A BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ

Hnací silou vývoje energy harvesting zdrojů energie jsou moderní komunikační technologie (Raghunathan et al., 2006). Pokud vyvineme mechatronickou soustavu prezentovanou v podkapitole výše, tak je technicky snadné připojit bezdrátový modul, obsahující jak autonomní snímání, tak bezdrátovou komunikaci s nadřazeným informačním systémem (Vijayaraghavan a Rajamani, 2010). Takto vytvořená mechatronická soustava s energy harvesting zdrojem energie a autonomním snímáním s bezdrátovou komunikací tvoří tzv. zero-power senzor, který je využitelný v mnoha průmyslových aplikacích (Niyato et al., 2007).

Hlavními hráči na globálním trhu s bezdrátovými technologiemi vhodnými pro energy harvesting zdroje jsou společenství firem EnOcean Alliance a ZigBee Alliance. Tyto aliance sdružují velké množství firem, které se podílejí na vývoji bezdrátových technologií a protokolů tak, aby tyto technologie bylo možno velmi efektivně napájet z energy harvesting zdrojů.

### **3.4 ZHODNOCENÍ TECHNOLOGIE ENERGY HARVESTING A JEJÍ VYUŽITÍ**

Cílem této kapitoly bylo přiblížit technologii získávání a přeměny okolní energie, a také topologii celé soustavy zdroje i napájené aplikace, která tvoří mechatronickou soustavu se vzájemnými vazbami a souvislostmi. Pokud v této soustavě nebude správně pracovat jakýkoliv jednotlivý prvek, celá aplikace energy harvesting aplikace selže. Důležitá je hlavně analýza získané energie a potřebné energie pro napájení především bezdrátové aplikace, a také správná funkce power management elektroniky, která zajistí maximální generovaný výkon při daných parametrech vstupní okolní energie.

Alfou a omegou celé aplikace je tedy správný návrh energy harvesting generátoru s optimálně navrženými parametry pro dostatečné napájení celé autonomní mechatronické soustavy. Jelikož množství okolní energie je ve většině inženýrských aplikací, které odpovídají danému použití monitorování technické soustavy, velmi malé, jsou energy harvesting zdroje většinou tvořeny speciálně vyvinutými elektrickými generátory pro přesně definované vstupní parametry a odpovídající požadavkům na zdroj energie. Mluvíme zde hlavně o generování elektrické energie z vibrací a rázů, případně z lidského chování. Generování elektrické energie z teplotních rozdílů či solárního záření má svá specifika a návrhy jednotlivých energy harvesting generátorů lze poměrně dobře unifikovat pro dané parametry vstupů a výstupů.

Práce se celkově soustředí na generování elektrické energie v inženýrských aplikacích, řešených na našem pracovišti. Jedná se o využití parazitní mechanické energie vibrací a rázů, především v projektech pro letecký průmysl. S postupným vývojem generátorů elektrické energie z vibrací pro letecký průmysl byly řešeny i další aplikace použití energy harvesting se svými specifiky.

## **4 MECHANICKÁ ENERGIE JAKO AUTONOMNÍ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE**

### **4.1 LETECKÝ PRŮMYSL JAKO IMPULS PRO VÝVOJ ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIÍ**

Impuls k vývoji a smysluplnosti energy harvesting technologií přišel z leteckého průmyslu, kdy vznikla poptávka po monitorování parametrů draku letounů. Tato poptávka vznikla v době, kdy se rozvinuly i bezdrátové technologie a primárním cílem bylo nahradit v moderním letounu stovky kilometrů kabeláže pro přenos informací i energií, a tím ušetřit hmotnost a hlavně spotřebu paliva. Syntéza těchto požadavků leteckého průmyslu dala prostor pro vznik projektů, které se zabývaly vývojem bezdrátových technologií, bezdrátových prvků a sítí a hlavně energy harvesting zdrojů energie pro bezdrátové prvky a senzory. Cílem tehdejšího vývoje bylo umístit tyto senzory do konstrukce bez nákladů na kabeláž, a dále také vyloučit nutnou výměnu tehdy obvyklé baterie během provozu letounů. Přitom v některých aplikacích bylo použití baterií zcela vyloučeno z technologických důvodů.

V leteckém průmyslu jsou hlavním zdrojem parazitní energie vibrace a teplotní rozdíly během letu a provozu. Z pionýrských projektů leteckého průmyslu z počátku tohoto milénia se vyvinula perspektivní průmyslové odvětví, které energy harvesting zdroje energie využívá nejen v moderní letecké technice, ale najdeme je i v aplikacích každodenního použití.

VUT v Brně bylo partnerem jednoho z pilotních projektů v této oblasti, který byl vedený francouzskou firmou DASSAULT AVIATION. Projekt 6. rámcového programu WISE (Integrated WIREless SENSING for AIRCRAFT SYSTEMS) se v letech 2006 – 2008 zabýval vývojem bezdrátových senzorů pro letecké aplikace a také vývojem autonomního napájením těchto senzorů z okolních vibrací.

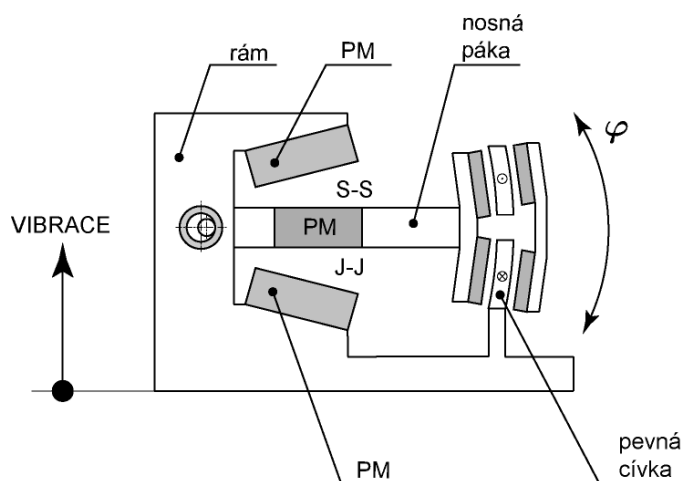
V leteckém průmyslu obecně byla zprvu parazitní energie mechanických vibrací vybrána jako nejvhodnější zdroj okolní energie určený pro napájení autonomních prvků. Zásadní vědeckou prací

pro energy harvesting technologie z mechanických vibrací byla publikace článku autorů (Williams a Yates, 1996), kdy byla prezentována myšlenka základního fyzikálního principu generování elektrické energie z vibrací a provedena obecná analýza generovaného výkonu.

Do roku 2005, kdy jsme na VUT v Brně vyvinuli první vibrační energy harvesting generátor s potenciálem pro využití v leteckém průmyslu, bylo v inženýrské a vědecké databázi IEEE Xplore publikováno pouze 15 článků zabývajících se generováním elektrické energie z mechanických vibrací. Do roku 2006 bylo zveřejněno v této významné databázi pouze 33 článků s touto tematikou. Již v letech 2007 – 2008 počet publikací v této oblasti stoupl několikanásobně (129 prací) a v letech 2009 – 2014 bylo zveřejněno 858 vědeckých publikací se zaměřením na energy harvesting technologie v databázi IEEE Xplore. Tyto čísla prezentují historický vývoj a odrážejí náhlou potřebu využití technologií výroby elektrické energie z okolí, přesněji z mechanických vibrací a rázů v místě napájené ULP elektroniky.

## 4.2 UNIKÁTNÍ MAGNETICKÝ RESONANČNÍ MECHANISMUS

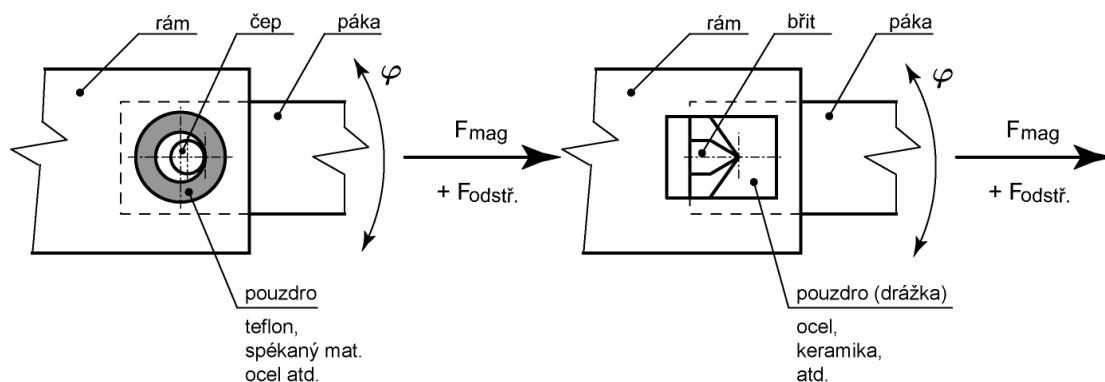
Úspěšný vývoj mechanických energy harvesting generátorů na VUT v Brně je založen na unikátní a patentované konstrukci resonančního mechanismu s minimální velikostí mechanického tlumení uvnitř mechanické konstrukce. Tato konstrukce neobsahuje mechanický pružný člen a tuhost mechanismu je dána odpuzujícími se silami permanentních magnetů ze vzácných zemin (FeNdB), obr. 12.



**Obr. 12. Princip konstrukce magnetického resonančního mechanismu elektromechanického generátoru**

Pro zachování pohybu v jednom stupni volnosti je nutné zařadit mechanický vodící člen, ve kterém dochází vlivem mechanického kontaktu k jedinému mechanickému tlumení v tomto mechanismu. Pro zachování vysoké citlivosti na budící vibrace bylo patentováno uložení pohyblivého členu dle obr. 13.

Zásadní výhodou této konstrukce je existence pouze jedné pohyblivé části, která je uchycena v uložení s velmi nízkými mechanickými ztrátami. Krajní polohy jsou vymezeny magnetickým polem odpuzujících se magnetů, takže i při přetížení nedochází k mechanickému kontaktu v krajní poloze. Díky těmto vlastnostem tato konstrukce může fungovat řadu let bez nutné údržby, což vytváří významný potenciál pro letecký průmysl.



Obr. 13. Schéma uložení pro zachování vysoké citlivost na budící vibrace

### 4.3 APLIKACE PRO LETECTVÍ – WISE

Jak již bylo zmíněno, bylo VUT v Brně v rámci 6. rámcového programu partnerem projektu WISE – Integrated Wireless Sensing for AIRCRAFT SYSTEMS. Cílem tohoto projektu bylo vyvinout zařízení pro možné uplatnění bezdrátových technologií v leteckých aplikacích. Za VUT v Brně v projektu spolupracovalo několik pracovišť, a to zejména na vývoji vibračních energy harvesting generátorů, a také na vývoji power management elektroniky.

Mým cílem v tomto projektu byla analýza pracovních vibrací, vývoj vibračního energy harvesting generátoru, definice požadavků na power management elektroniku a návrh mechanické konstrukce uložení bezdrátového senzoru teploty nasávaného vzduchu do motoru helikoptéry NH 90 firmy Eurocopter EADS. Tato technická soustava, obr. 13, je vhodným zdrojem mechanických vibrací díky konstantním otáčkám rotoru a v blízkosti převodovky se vyskytujícími vibracím s téměř konstantní frekvencí po celou dobu letu. Mechanické vibrace během letu mění pouze svoji velikost.



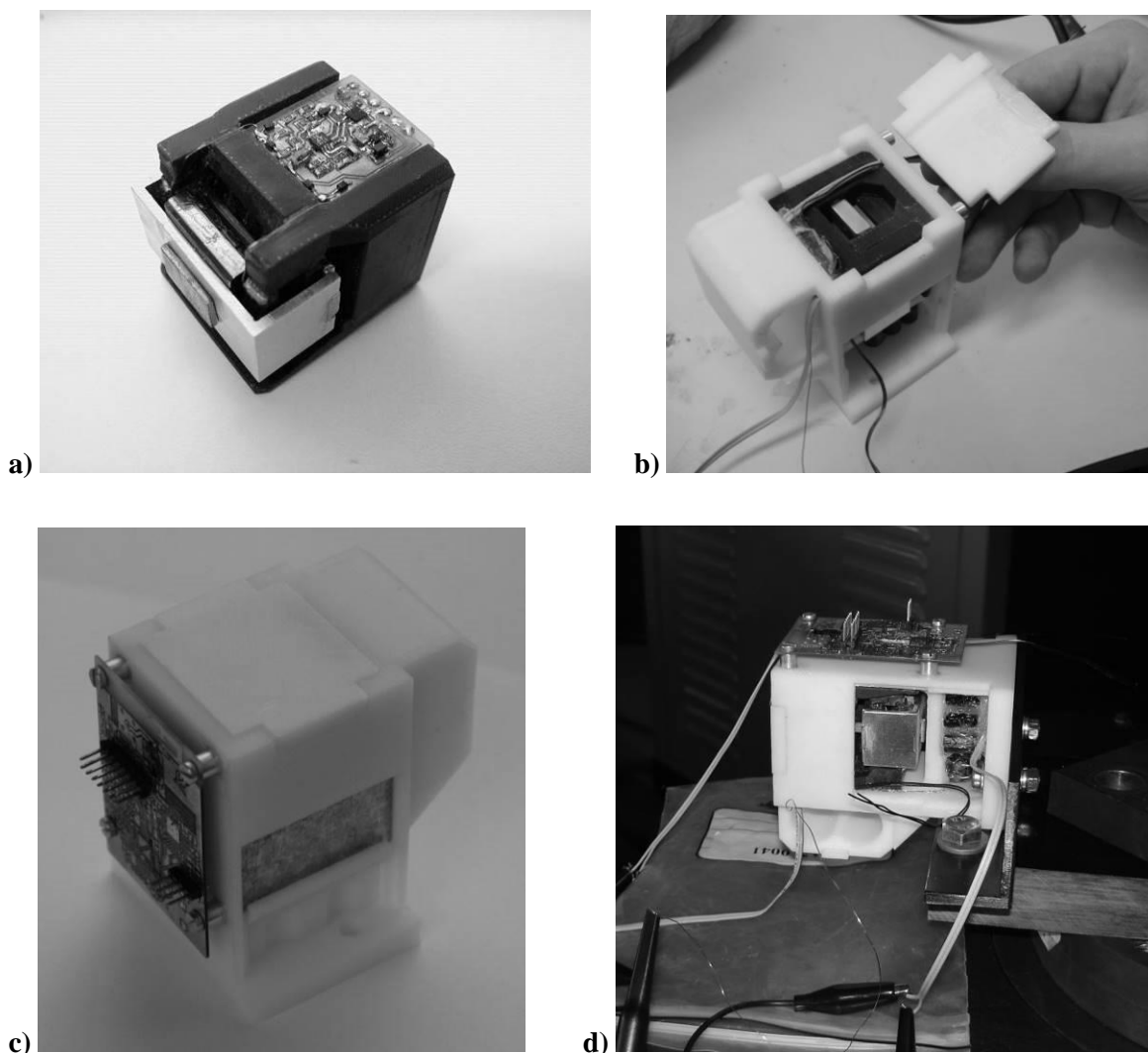
Obr. 14. Helikoptéra NH 90 firmy Eurocopter EADS

Základní výkonové analýzy a vývoj konstrukce vibračního energy harvesting generátoru jsou popsány v několika publikacích, např. (Hadas et al., 2010a) a (Hadas et al., 2009). Konstrukce generátoru vychází z citlivého magneticky vázaného rezonančního mechanismu, který umožnil generování dostatečné elektrické energie z vibrací uvedené technické soustavy. Důležitou součástí návrhu bylo i rozšíření pracovního frekvenčního pásma a návrh generátoru musel respektovat i požadavky na přetížitelnost, protože se v této technické soustavě vyskytují i rázy se zrychlením

několika násobků tíhové konstanty (hodnota  $G$  je její násobek). Oba tyto požadavky jsou splněny díky nelineárnímu průběhu tuhosti magnetické pružiny, což zajistí rozšíření šířky pásma, a nelinearita průběhu síly odpuzujících se magnetů zajistila, že nedochází k mechanickým nárazům do konstrukce generátoru při velkých vibracích.

Důležitou součástí návrhu byla rychlá výroba testovacích vzorků a jejich verifikace, a následná úprava parametrů na základě naměřených dat, především mechanického tlumení ve vazbě pohyblivého členu generátoru. Bylo využito metody rapid prototyping, tj. tisku plastové konstrukce rámu generátoru z ABS materiálu (Hadas et al., 2008). Tyto plastové díly zcela bez problému splnily podmínky kladené na konstrukci a hlavně byla uspořena hmotnost konstrukce generátoru, což je důležité pro letecké aplikace.

V rámci těchto prací vznikl vibrační elektromagnetický generátor zobrazený na obr. 15 a). Ten je integrován v plastové konstrukci spolu s elektronikou a záložními bateriemi. Celá konstrukce byla testována na odezvu na harmonické vibrace na laboratorní vibrační stolici, obr. 15 d).



**Obr. 15. Vibrační energy harvesting generátor pro projekt WISE**

**a) plastový generátor s výkonovou elektronikou;**

**b) integrace generátoru do konstrukce bezdrátového senzoru**

**c) kompletní integrovaný bezdrátový senzor teploty se záložní baterií**

**d) laboratorní testování celého senzoru na laboratorní vibrační stolici**

Výkonová elektronika byla vyvinuta v rámci projektu WISE na FEKT VUT v Brně, viz publikace (Fiala a Drexler, 2011), a bylo použito i záložní baterie pro potřeby napájení při nízkých vibracích. Celá soustava byla testována při buzení okolními vibracemi rozdílných velikostí vibrací při pracovní frekvenci 17 Hz.

Napájený bezdrátový teplotní senzor vysílá naměřenou hodnotu teploty s opakovací frekvencí 2 Hz a využívá a k vysílání využívá pouze 4 % času periody. Zbytek času je v pohotovostním režimu. Napájení tohoto senzoru je nastaveno na 3,3 V, při vysílání má senzor spotřebu 23,6 mA a v pohotovostním režimu 1 mA. Funkce toho bezdrátového senzoru s využitím energie z vibračního energy harvesting generátoru byla sledována a vyhodnocován byl poměr času napájení ze záložních baterií a pouze z vibračního generátoru.

**Tab. 2: Měření poměru času, kdy je senzor napájený z vyvinutého vibračního generátoru**

Zrychlení vibrací [G]		Měřený poměr času napájení z generátoru
Amplituda	Efektivní hodnota	
0,2	0,14	25 %
0,3	0,21	43,6%
0,35	0,25	54,4%
0,4	0,28	68,1 %
0,45	0,32	76,7%
0,5	0,35	~ 100 %

Z Tab. 2 vyplývá, že bezdrátový senzor teploty je schopen plné funkce pouze s energií z vibrací již od efektivní hodnoty zrychlení vibrací 0,35 G na pracovní frekvenci 17 Hz. Průměrná hodnota zrychlení vibrací v místě umístění senzoru je více než 0,5 G, tedy vibrační energy harvesting generátor bez problémů může napájet tento senzor. Generátor byl testován i na přetížení zrychlením kinematického buzení, přičemž generátor fungoval bez kontaktu v krajní poloze při harmonickém buzení s amplitudou zrychlení až 3 G. Pracovní amplituda generátoru byla díky nelineární tuhostní charakteristice v tomto přetížení prakticky shodná s amplitudou při kinematickém buzení 0,5 G.

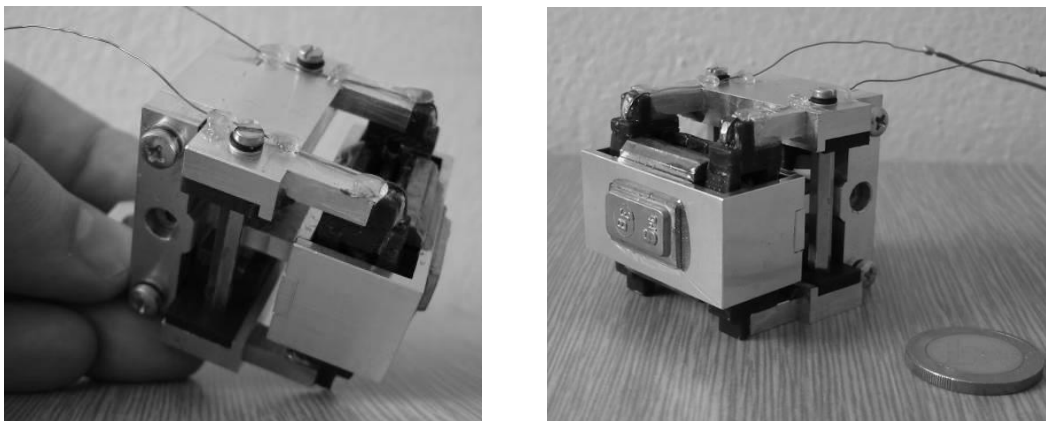
V rámci tohoto projektu vznikla téměř desítky testovacích vibračních energy harvesting generátorů pro různé frekvence vibrací a různé velikosti kinematického buzení. I po skončení tohoto projektu bylo na těchto generátorech pracováno a zvyšována byla především citlivost a nelinearita tuhosti, (Hadas et al., 2010a).

#### **4.4 PARAMETRY CITLIVÉHO VIBRAČNÍHO ENERGY HARVESTING GENERÁTORU**

Základní parametry konstrukčně upraveného generátoru s rozebíratelným duralovým rámem (Hadas et al., 2010a), obr. 16, a s možností snadné úpravy parametrů tuhosti a citlivosti jsou uvedeny v Tab. 3.

Na konstrukci lze upravovat tyto parametry:

- vzdálenost mezi tuhostními magnety, které mění průběh nelineární charakteristiky,
- uložení pohyblivého členu – úprava citlivosti,
- přídavné závaží – ladění pracovní frekvence.



**Obr. 16.** Vibrační energy harvesting generátor s rozebíratelným duralovým rámem pro snadnou úpravu parametrů

**Tab. 3:** Parametry vibračního generátoru

<b>Parametry (podmínky)</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotky</b>
<i>Hmotnost</i>	135	<i>g</i>
<i>Objem 50x40x40 mm</i>	80	<i>cm<sup>3</sup></i>
<i>Pracovní frekvence</i>	17	<i>Hz</i>
<i>Cívka (průměr vodiče 0,05 mm)</i>	2000	<i>závitů</i>
<i>Vnitřní odpor cívky</i>	1600	<i>Ω</i>
<i>Usměrněné napětí (amplituda vibrace 0.3 G; odpor 9,2 kΩ)</i>	13,5	<i>V<sub>rms</sub></i>
<i>Výkon (amplituda vibrace 0.3 G; odpor 9,2 kΩ)</i>	20	<i>mW</i>
<i>Optimální zátěž</i>	3 – 15	<i>kΩ</i>
<i>Maximální výkon (zátěž 3 kΩ; amp. vibrace 0,5 G a vyšší)</i>	36	<i>mW</i>

## 5 ANALÝZA, MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

### 5.1 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ GENEROVANÉHO VÝKONU

O implementaci energy harvesting aplikací je momentálně zájem i v dalších průmyslových odvětvích, pro které bezdrátové technologie a autonomní systémy otvírají nové technologické možnosti (Sari et al., 2008). Pro nová odvětví je potřeba detailně analyzovat množství okolní mechanické energie vibrací použitého stroje, stálost vibrací a energii akumulovanou v rezonančním mechanismu generátoru (Spreemann et al., 2006), a na základě toho realisticky odhadnout časový průběh možného generovaného elektrického výkonu během chodu stroje. Tyto analýzy byly provedeny pro odvětví obráběcích strojů, kde byla naměřena data v potencionálních místech s dostatečnou amplitudou parazitních vibrací. Tyto místa byla volena i z hlediska možného využití autonomního zdroje elektrické energie, především pro monitorování vlastností obráběcího stroje.

Lineární popis a model obecného energy harvesting generátoru a analýza generovaného výkonu v místech měření na obráběcím stroji byla např. prezentována v publikaci (Z Hadas et al., 2014). Takto vytvořenou analýzu je potřeba provést pro každou novou potenciální aplikaci vibračního energy harvesting generátoru. Je zde ale nutná podmínka, aby dynamika rezonančního mechanismu během generování elektrické energie neovlivnila dynamiku konstrukce a vibrace v místě umístění generátoru.

## 5.2 VERIFIKACE MODELU A OPTIMALIZACE PARAMETRŮ KONSTRUKCE

Během vývoje vibračních energy harvesting generátorů bylo nutné využívat nejen linearizované simulační modely, ale bylo nutné implementovat nelinearity tuhostí a verifikovat i další nelinearity, jako je nelineární chování třecích sil v uložení a nelineární odebrání elektrického výkonu z generátoru. Obě tyto nelinearity jsou verifikovány v modelu vibračního generátoru v publikaci (Hadas et al., 2010b). Tento verifikovaný model, který obsahuje 3 nelineární systémy (tuhost, tření a usměrňovač), lze použít ke kvantifikativní predikci generovaného výkonu během časového záznamu vstupních vibrací z reálně naměřených dat. Tato predikce modelu je důležitá k formulaci závěrů ohledně konstrukce celého energy harvesting zařízení:

- Je indukované napětí dostatečné pro zpracování v power management elektronice?
- Je generovaný výkon dostatečný pro napájení dané aplikace?
- Je možné redukovat hmotnost a objem zařízení vzhledem k dostatečnému generovanému výkonu? Případně opačně?

V těchto otázkách je velmi důležité aplikovat vhodnou optimalizační metodu na verifikovaný model a optimalizovat parametry modelu vzhledem k požadavkům zákazníka (projektu), viz (Ottman et al., 2003). Vzhledem ke komplexnosti takového zařízení je zcela nemožné použít tradiční optimalizační metody. Prezentovaný vibrační energy harvesting generátor po částečném zjednodušení tvoří 22 nezávislých konstrukčních parametrů, které vzájemně ovlivňují funkci jednotlivých subsystémů a tím i celého zařízení jako celku. Z tohoto důvodu byl pro optimalizaci parametrů vibračního generátoru využit evoluční algoritmus SOMA – *Self Organizing Migrating Algorithm* s účelovou funkcí reflektující minimální hmotnost a objem při maximálním generovaném výkonu s dodatečným výstupním napětím. Tento evoluční algoritmus, který je podobný genetickému algoritmu či algoritmu diferenciální evoluce, je využit k optimalizaci parametrů uvedeného modelu generátoru v prostředí Simulink. Výsledky této optimalizační úlohy jsou prezentovány v publikaci (Hadas et al., 2012a). Tyto optimalizační úlohy jsou v leteckých aplikacích velmi důležité pro dodržení poměru hmotnost/výkon.

## 5.3 VYUŽITÍ POKROČILÝCH METOD MODELOVÁNÍ A VERIFIKACE VÝSLEDKŮ

VUT v Brně je spoluřešitelem projektu 7. rámcového programu *ESPOSA (Efficient Systems and Propulsion for Small Aircraft)*. V rámci tohoto projektu jsou na VUT v Brně řešeny 2 dílčí úkoly a jedním z nich byl vývoj autonomního zdroje energie pro potenciální monitorovací systém v leteckých aplikacích (*Smart Health Monitoring System*). Tyto systémy se často označují HUMS (*Health and Usage Monitoring System*) a slouží k monitorování stavů a přetížení leteckých konstrukcí. Tento monitoring je důležitý z hlediska predikce kritických stavů konstrukce a touto predikcí lze velmi efektivně uspořít značné finanční prostředky v oblasti údržby a opravy malých letounů.

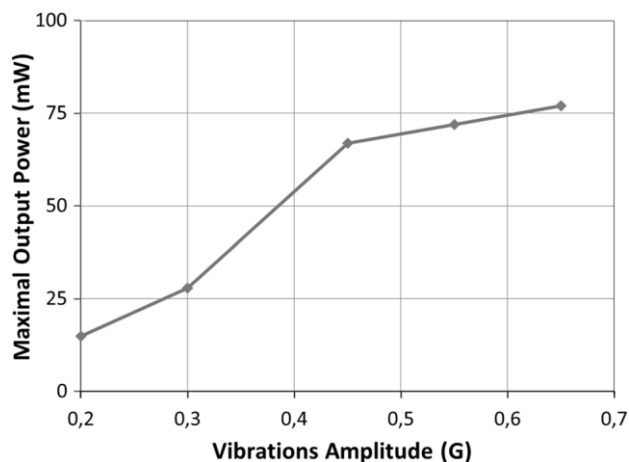
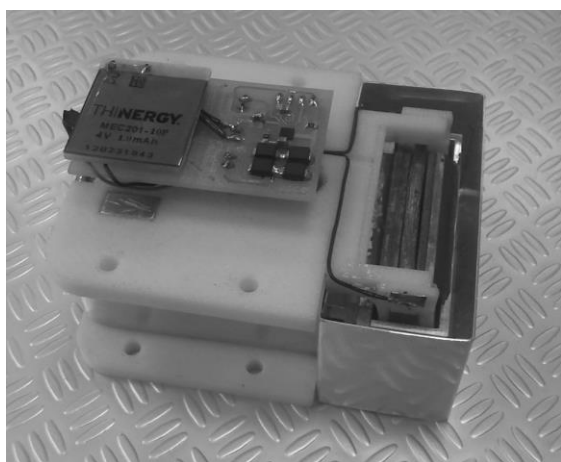
Řešeným tématem v této části projektu je analýza možností a případný vývoj autonomního zdroje energie z vibrací letecké konstrukce. Tento zdroj by měl autonomně napájet HUMS jednotku vyvíjenou firmou HONEYWELL s příkonem cca 100 mW. Tento výkon je ve srovnání s dalšími energy harvesting aplikacemi poměrně velký a představuje vzhledem k předchozím výsledkům novou výzvu. Proto jsem se rozhodl využít moderní metody návrhu mechatronických soustav, která již na úrovni návrhového modelu zahrne modely všech jednotlivých subsystémů a vazby mezi nimi. Tato metoda návrhu mechatronických soustav bývá anglicky označována jako *Model-based Design*. Dále, stejně jako ve WISE projektu, byla použita již ověřená topologie vibračního energy harvesting generátoru a pro úsporu hmotnosti i využít rapid prototyping technologie nejen k tisku plastových součástí z CAD modelů, ale i pro tisk kovových součástí přímo z CAD modelů.



Ucelený popis vývoje celého vibračního energy harvesting generátoru v rámci projektu ESPOSA je prezentován v publikaci (Zdenek Hadas et al., 2014). Při vývoji konstrukce tohoto generátoru a návrhu jeho parametrů bylo využito několika generací modelů jednotlivých subsystémů i celku od prvotního modelu pro analýzu výkonu až k CAD modelům, které vznikly na základě detailních konečno-prvkových výpočtů magnetických polí.

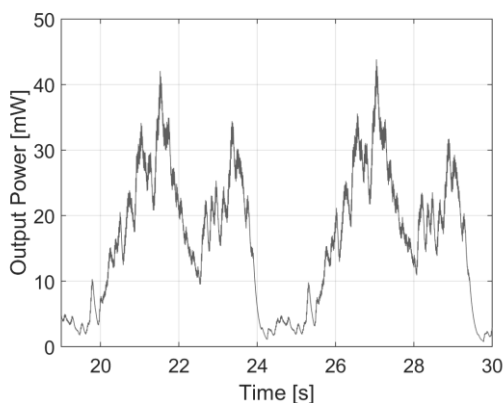
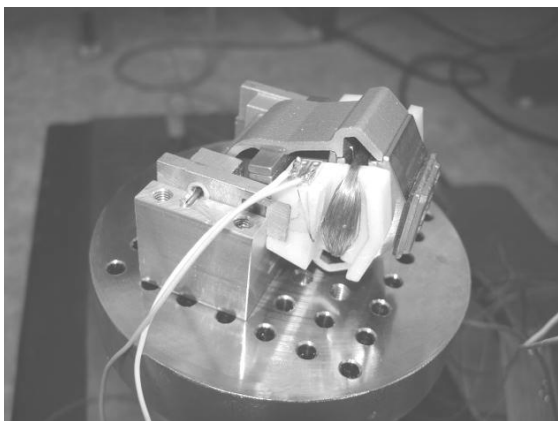
Metodou konečných prvků byl zpracován i celý návrh jedné z variant vibračního generátoru, která byla publikována v (Hadas a Huzlík, 2014). 3D model celého zařízení včetně magnetických polí vytvářejících tuhost a budících magnetických polí, která při relativním pohybu zajišťují indukovaní elektromotorického napětí, byl vytvořen v prostředí ANSYS Maxwell. Tento model je schopen zpětnovazebně komunikovat s dynamickým modelem rezonančního mechanismu buzeného modelem okolních vibrací a analyzovat výsledky návrhu parametrů generátoru a lze jej efektivně použít i pro vývoj s pokročilými optimalizačními metodami jako je SOMA.

Vibrační generátor, obr. 17, vyrobený na základě takto zpracovaného a popsánoho návrhu v publikaci, (Zdenek Hadas et al., 2014), byl testován pro použití při autonomním napájení HUMS jednotky. CAD modely součástí pevného rámu byly, stejně jako v předchozím WISE projektu, kvůli úspoře hmotnosti a vývojového času, vytištěny z plastu ABS. Byly zde aplikovány všechny vývojové kroky, které jsou již v této práci popsány včetně optimalizace parametrů generátoru. Bohužel vzhledem k přehnaným výkonovým požadavkům napájené HUMS aplikace nebyl splněn požadavek maximálního výkonu 100 mW. Vzhledem k požadovanému výkonu z analyzovaných vibrací bylo nutno použít odpovídající hmotnost rezonančního mechanismu, a tím dosáhnout i požadované kinetické energie vstupující do elektromechanické přeměny. Pro takto stanovenou hmotnost byly navrženy tuhostní magnety pro danou pracovní frekvenci. Kmitající hmota v dané pracovní frekvenci však byla na hranici možnosti použití běžných FeNdB magnetů a tyto magnety jen s obtížemi vytvořily požadovanou tuhost rezonančního mechanismu. Tímto byla omezena maximální pracovní výchylka a tím i maximální výkon.



**Obr. 17. Vibrační generátor ESPOSA, maximální generovaný výkon**

V další fázi vývoje bylo snahou inovovat konstrukci vibračního energy harvesting generátoru tak, aby tento autonomní zdroj splnil potřeby napájení HUMS jednotky. Problémem předchozí verze generátoru byl velká hmotnost pohyblivé části rezonančního mechanismu, a proto byla analyzována možnost inverzního návrhu tuhosti permanentních magnetů rezonančního mechanismu. Cílem bylo využít maximálního poměru hmotnosti rámu generátoru vůči užitečné hmotnosti pohyblivého členu. Pro tuto konstrukční úpravu byla uvažována i možnost tisku kovových součástí přímo z CAD modelů generátoru, obr. 18. Inovace konstrukce a návrhy parametrů modelu a jejich sestavení je prezentováno v publikaci (Rubes et al., 2014). Tento návrh slibuje potenciál dosažení požadovaných parametrů autonomního zdroje elektrické energie pro HUMS jednotku vyvinutou v rámci projektu ESPOSA.



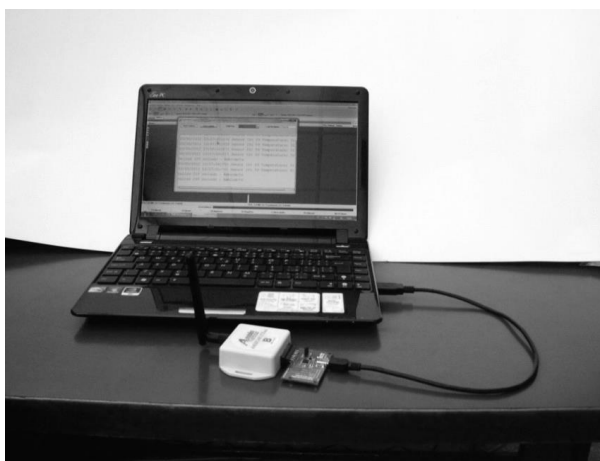
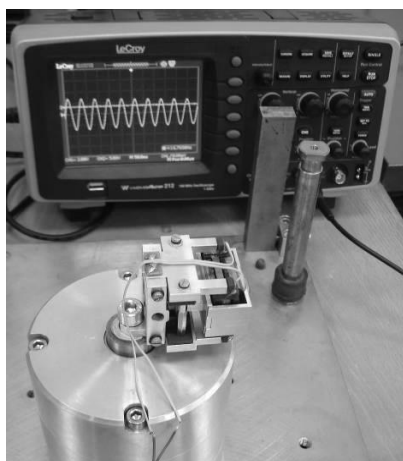
**Obr. 18. Inovovaná konstrukce pro projekt ESPOSA, generovaný výkon v průběhu laboratorního testu s reálným profilem vibrací**

## 6 VYUŽITÍ ODEZVY CITLIVÉHO RESONANČNÍHO MECHANISMU PRO GENEROVÁNÍ ENERGIE Z MECHANICKÝCH RÁZŮ

Během vývoje vibračních energy harvesting generátorů se mnohokrát řešila problematika nestálosti pracovní frekvence v budícím spektru vibrací. V některých technických aplikacích se dominantní frekvence budících vibrací mění a tuto změnu nelze zachytit ani nelineárním rozšířením pracovního pásma ve frekvenční oblasti. Toto rozšíření je možné jen o jednotky Hz a v aplikacích, kde jsou dominantní frekvence vibrací vybudeny pohony či převody s velkým rozsahem otáček, nelze efektivně resonančního provozního stavu generátoru docílit.

Některé technické soustavy, především v těžkém a hutním průmyslu, vykazují během provozního stavu zřetelné mechanické rázy. Tyto rázy jsou taktéž zdrojem okolní mechanické energie a je proto nasnadě tuto energii v některých aplikacích efektivně využít (Spreemann et al., 2006), například k monitorování provozních stavů.

Během vývoje vibračních energy harvesting generátorů byla analyzována velká citlivost některých testovaných generátorů na jakékoliv okolní vzruchy, kdy i malé rázy dokázaly generovat zpracovatelné napětí pro moderní power management obvody on-chip.



**Obr. 19. Test generátoru na rázy a bezdrátová komunikace**

V návaznosti na požadavky hutního průmyslu byla testovací verze jednoho z nejvíce citlivých generátorů použita pro analýzu možností využití mechanických rázů k bezdrátovému monitorování okolní teploty. Tato aplikace využívá komerční bezdrátový modul s integrovaným power management obvodem AmbioSystems a připojeným senzorem teploty. V laboratorním prostředí

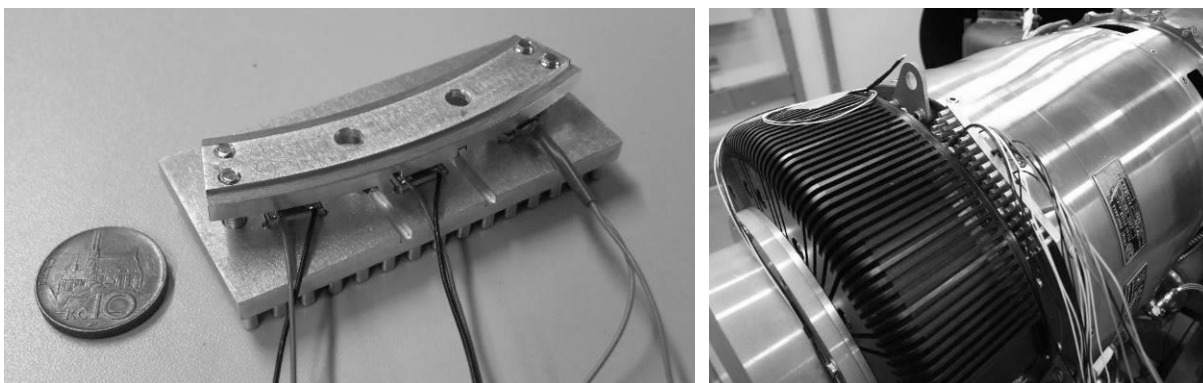
byly vybudeny mechanické rázy, které jsou běžné v hutním průmyslu, a námi vyvinutý vibrační energy harvesting generátor z jednoho rázu dokázal vygenerovat dostatek energie pro tři operace změření teploty včetně bezdrátového odeslání do přijímače připojeného k notebooku. Tato měření, obr. 19, a některé testy jsou popsány v publikaci (Hadas et al., 2012b).

## 7 TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY – ALTERNATIVA PRO LETECKÉ APLIKACE

Letecký průmyslu má své specifika a na rozdíl od dalších průmyslových odvětví klade velký důraz na bezpečnost a spolehlivost všech technických objektů na palubě letounu (Becker et al., 2009). Z toho důvodu musí všechny použité prvky projít procesem certifikace a schválení pro letecký provoz. Proto není vibrační energy harvesting generátor, vzhledem ke své mechanické konstrukci s pohyblivým členem, příliš vhodným prvkem pro snadný certifikační proces. Proto letecké společnosti nově vidí potenciál spíše u termoelektrických generátorů – TEG, které představují tepelný konvertor bez pohyblivých součástí. TEG rovněž pracují efektivně v poměrně velkém spektru vstupních hodnot, a i když rozdíl teplot klesne pod navrženou mez, stále generují určitý elektrický výkon. To je zásadní rozdíl vůči vibračním generátorům, které při změně frekvence buzení mimo blízké okolí pracovní frekvence generují jen zlomek maximálního výkonu. Taktéž řízení maximálního výkonu TEG je oproti vibračním generátorům poměrně jednoduché a optimální zátěž se řídí nastavením v poměru k napětí na prázdko. Z těchto důvodů se i velké společnosti jako EADS soustředily především na termoelektrické moduly (Samson et al., 2012) a vývoj vibračních energy harvesting generátorů pro své aplikace zastavily.

V rámci projektu TAČR TA02010259 – CAAE, Komplexní cenově dostupný řídicí systém leteckých motorů, byla s průmyslovým partnerem firmou UNIS zahájena spolupráce na vývoji energy harvesting modulů pro záložní letecké systémy využívajícího teplotního spádu. Teplotní gradient je v leteckých aplikacích zcela běžný hlavně v okolí motoru, kde je umístěna řídicí jednotka vyvíjená firmou UNIS. V jednotce je potřeba redundantně zálohovat zdroj elektrické energie a díky stabilnímu teplotnímu gradientu se TEG pro potřeby záložní energy harvesting aplikace tímto zdrojem stává. Konkrétně v tomto projektu bude energy harvesting aplikace napájet třetí nezávislý zdroj elektrické energie pro snímání otáček motoru. Senzor otáček je standardně napájen z palubní soustavy, dále je použita záložní baterie, a námi vyvíjená aplikace bude sloužit jako zcela nový a autonomní záložní zdroj.

Ve zveřejněných publikacích je popsána analýza TEG (Janak et al., 2014), simulační výpočty TEG založené na MEMS technologiích (Ancik et al., 2014) a systémový návrh záložního TEG modulu pro tuto leteckou aplikaci (Janak et al., 2015). Funkční vzorek této aplikace je již finálně testován na leteckém motoru, obr. 20, a jeho maximální výkon je cca 200 mW.



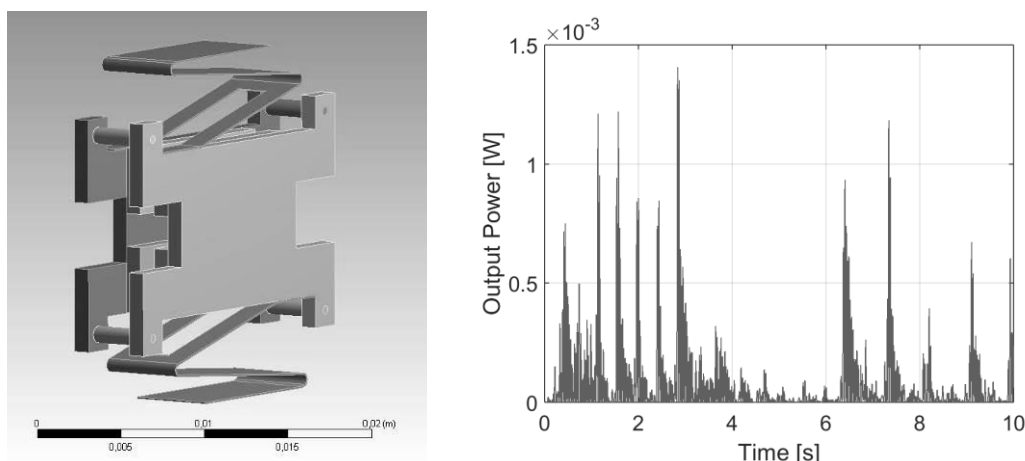
Obr. 20. Funkční vzorek TEG a jeho zástavba do řídicí jednotky leteckého motoru

## 8 ENERGY HARVESTING JAKO ALTERNATIVA PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE

Biomedicínské aplikace jsou jednou ze zajímavých oblastí, kde je potřeba generovat elektrickou energii přímo v místě spotřeby (Ben Amor et al., 2008).

Vzhledem ke zkušenostem z vývoje energy harvesting aplikací jsem přivítal možnost podílet se na vývoji unikátní biomedicínské aplikace, která vrátí lidem poškozený či ztracený sluch. Jedná se o vývoj umělého kochleárního implantátu, který ke své funkci využije MEMS banku mechanických a elektricky aktivních filtrů akustického signálu. Tato aplikace tedy bude spotřebovávat elektrickou energii jen pro zpracování signálu z filtru a excitace nervového zakončení, a proto poskytuje ideální prostor pro napájení tohoto biomedicínského zařízení využitím některé z energy harvesting technologií.

Předpokládá se, že vyvinutá umělá kochlea bude plně implantovatelná do prostoru lebky, kde lze využít prostor 2 x 2 x 0,5 cm pro zdroj elektrické energie. Prozatím je předpokládán příkon implantátu v řádu 100 mikroWattů. Jako vhodný zdroj elektrické energie se zde jeví kombinace termoelektrického modulu a mechanického zdroje energie. Teplotní gradient na pokožce lidského těla je velmi malý, ale ne zanedbatelný (Hoang et al., 2009), a stejně můžeme mluvit o kinetické energii pohybu hlavy (Accoto et al., 2009). Již dnes je známé využití energy harvesting aplikací pro napájení kardiostimulátorů (Zurbuchen et al., 2013), aplikátorů léků (Paulo a Gaspar, 2010), či senzorů ortopedických pomůcek (Wei a Liu, 2008).



**Obr. 21. Model vyvíjeného energy harvesting zdroje, simulační výsledky výkonu při chůzi**

Tento záměr byl řešen v rámci projektu GAČR - 13-18219S s názvem Výzkum umělé mikroelektromechanické kochley založené na bance mechanických filtrů. Ve studii celého systému, (Žák et al., 2015), je na soustavě modelů popsána celá struktura implantátu i s analýzou vyvíjeného energy harvesting zdroje energie pro tuto zajímavou aplikaci, model a simulační výsledky jsou zobrazeny na obr. 21

## 9 ZHODNOCENÍ PŘEDKLÁDANÉ HABILITAČNÍ PRÁCE

### 9.1 AKTUÁLNOST ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A SHRUTÍ PRÁCE

Řešená problematika alternativního napájení bezdrátových senzorů a autonomních zařízení je stále velmi aktuální. V roce 2010 se dle studie konzultační firmy IDTechEx technologiemi energy harvesting aktivně zabývalo cca 500 organizací, z toho asi polovina byla z akademické sféry. V posledních dvou letech se řešení dílčích cílů jednotlivých energy harvesting technologií či teoretickému popisu jednotlivých problematik věnují všechny prestižní university na celém světě. Aktuálnosti řešeného tématu odpovídá i nabídka komerčních produktů v oblasti energy harvesting

zdrojů energie na globálním trhu. Zcela dostupné jsou nové generace fotovoltaických článků, termoelektrických generátorů založených na MEMS technologii s vysokou hustotou výkonu na jednotku plochy a také jsou komerčně dostupné „polotovary“ pro vývoj piezoelektrických generátorů. Dále jsou na trhu i speciální elektromagnetické či magnetostrikční zařízení pro konkrétní aplikace. Vše podporuje vývoj výkonové elektroniky on-chip a nových akumulčních prvků. Stále se snižující energetická spotřeba prvků bezdrátových sítí a vývoj bezdrátových technologií jsou hnacím motorem celé oblasti energy harvesting. Tyto technologie mají obrovský potenciál pro nasazení nejen v leteckém, ale i v automobilovém a stavebním průmyslu pro bezdrátové monitorování i autonomní ovládání. Již nyní existuje řada aplikací, kde se běžně energy harvesting zdroje energie využívají, např. pro monitorování mostních konstrukcí, rafinérií, leteckých prvků a podvozků vlaků, bezdrátové snímání tlaku vzduchu v pneumatikách, atd., a škála těchto aplikací se bude dále rozšiřovat.

Pokud se zaměříme pouze na generování elektrické energie z okolní mechanické energie, tak i zde je v určitých aplikacích značný potenciál k velmi efektivnímu využití tohoto zdroje energie. Vzhledem k charakteru a velikosti okolní mechanické energie tento zdroj energie nebude nikdy tak masově použit jako fotovoltaické články či termoelektrické generátory. V průmyslových aplikacích bez zjevných omezení velikosti a hmotnosti energy harvesting zdroje však lze i při minimální velikosti parazitní mechanické energie generovat dostatek výkonu pro monitorování provozních stavů takovýchto technických soustav (potrubní systémy, hutní provozy, kontejnerová doprava, atd.).

Existuje i mnoho dalších fyzikálních principů elektromechanické přeměny, které v této práci nejsou zmíněny, nebo jsou zmíněny jen okrajově, a i jejich potenciál může být v určitých charakteristických podmínkách komerčně velmi zajímavý.

V oblasti biomedicínských aplikací určitě bude vývoj alternativních zdrojů energie pokračovat mílovými kroky s vidinou velmi komfortní indikace léků, monitorování zdravotního stavu či napájení smart implantátů.

Předkládaná vědecká práce se zabývá vývojem alternativních zdrojů energie jako celku a prezentuje efektivní využití simulačního modelování a technologie prototypování k vývoji konkrétních aplikací se svými specifiky. Především bych chtěl vyzdvihnout, z jak malých hodnot zrychlení vstupních vibrací jsou vyvinuté generátory schopny účinně napájet dané aplikace. Technologii energy harvesting se věnuje momentálně mnoho autorů a pracovišť, ale vstupní hodnota mechanické energie vibrace pro buzení jejich produktů je obvykle o řády vyšší při stejném výstupním výkonu.

Velký potenciál mají i výsledky nelineárních charakteristik na dynamiku rezonančních mechanismů, které přináší další výhody, především pak nahrazení mechanických dorazů a rozšíření pásma pracovních frekvencí.

## **9.2 PŘÍNOSY PRÁCE**

### **9.2.1 Vědecký a teoretický přínos**

Vědecký a teoretický přínos předkládané práce leží v rovině návrhu a ověření metodiky vývoje prezentovaných komplexních technických soustav. Tato metodika spočívá v optimálním využití matematických modelů a jejich aplikace v multidisciplinárních simulačních modelech pro efektivní vývoj těchto soustav dle specifických požadavků. Vzhledem k analýze a predikci generovaných výkonů je nutné verifikovat parametry modelu experimentálně (tření, mechanické tlumení), a takto verifikované modely lze v simulačních prostředích taktéž velmi dobře optimalizovat dle požadavků účelové funkce.

Na vývoj energy harvesting zdrojů energie byl aplikován mechatronický přístup a jeho metody, které zefektivnily a zkrátily vývojový čas od prvotní analýzy po finální ověření funkčního vzorku.

Metoda model-based design dovoluje analyzovat a kvantifikovat pozitivní vlivy nelinearit na vlastnosti vyvinutého zařízení.

Předkládaná práce otvírá potencionální možnosti vědecké spolupráce v oblasti tribologie, smart materiálů, akumulace energie, senzorických principů, bezdrátových protokolů a matematických metod multikriteriální optimalizace v několika dimenzionálním technickém prostoru.

Publikace a prezentace vědeckých výsledků na uznávaných mezinárodních vědeckých konferencích a v časopisech mně také otevřely prostor pro další vědeckou spolupráci především se zahraničními kolegy. Drtivá většina mých vědeckých publikací z posledních let je indexovaná v databázích SCOPUS a WOS, kde si nacházejí čtenáře, o čemž svědčí i počet citací v tomto úzce profilovaném vědeckém oboru i v rámci energy harvesting technologií. Na základě předložených publikací jsem velmi často oslovován organizačními výbory konferencí z celého světa s prosbami o prezentaci vědeckých výsledků na mezinárodních konferencích v oblasti energy harvesting. V poslední době figuruji i jako recenzent několika časopisů, především impaktovaných časopisů Mechatronics (Elsevier) a IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Dále jsem členem vědeckého výboru mezinárodních konferencí Mechatronics a Mechatronika a vědeckého workshopu Devices and materials for energy harvesting 2016.

### 9.2.2 Praktický přínos

Praktický přínos leží v implementaci netradičních konstrukčních řešení založených na mezioborových znalostech z přesné mechaniky, elektrotechniky, magnetismu a optimalizačních algoritmů, např. uložení s nelineární magnetickou tuhostí a minimálními vnitřními ztrátami. Tím byl vytvořen základ pro úspěšný návrh vibračních energy harvesting generátorů pro projekty WISE a ESPOSA. Vyvinutá citlivá konstrukce vibračního energy harvesting generátoru je schopna generovat kontinuální výkon přes 100 mW. V rámci výzkumného záměru a projektu NETME bylo a je pokračováno ve vývoji ještě citlivějších a efektivnějších energy harvesting zdrojů energie.

Technologie rapid prototyping byly úspěšně aplikovány a prakticky využity pro verifikační a testovací modely i finální konstrukce generátorů. Tyto technologie tisku plastových i kovových dílů přímo z CAD modelů zkracují vývojový čas a dovolují aplikovat optimalizační analýzy i na tvarově složité díly, které lze velmi obtížně vyrobit konvenčními metodami výroby strojních součástí (obrábění, lití, lisování atd.).

Další praktický přínos spočívá v aplikaci teoretických znalostí a již úspěšně uplatněného mechatronického přístupu založeného na modelu i pro vývoj termoelektrického autonomního zdroje energie v projektu CAAE. Tento přístup zefektivnil a zkrátil vývoj záložního termoelektrického modulu s výkonem v rozmezí 100 - 200 mW.

### 9.2.3 Pedagogický přínos

Pedagogickým přínosem vývoje těchto technologií na VUT v Brně je zavedení volitelného předmětu *Alternativní zdroje energie v mechatronice* pro studenty magisterského studia – obory Mechatronika a Inženýrská mechanika. Tento předmět je úzce profilován, ale studentům názorně prezentuje na jednoduchých energy harvesting zdrojích souvislosti mezi jednotlivými mechatronickými subsystemy jako jsou dynamické modely, magnetické pole, elektromechanická přeměna energie, elektronika, akumulace energie, bezdrátové technologie atd. Studenti získají přehled o fyzikálních principech výroby elektrické energie a o modelování těchto jevů (Seebeckův, piezoelektrický, atd.). Jednotlivé principy jsou prezentovány i na technologiích MEMS a jejich aplikacích.

Nesporným přínosem je vedení desítek bakalářských a diplomových prací a dvou studentů prezenční formy doktorského studia, a také moje angažovanost jako školitele specialisty jednoho studenta doktorského studijního programu na ČVUT v problematice alternativních zdrojů energie pro telekomunikace.

V rámci závěrečných bakalářských a diplomových prací byly řešeny a řeší se jednotlivé subsystémy energy harvesting generátorů nejrůznějších fyzikálních principů a konstrukcí a jejich komplexní prostorová a parametrická integrace a optimalizace modelu včetně verifikace dle naměřených dat. Několik závěrečných prací dospělo k velmi zajímavým výsledkům, které byly prezentovány na mezinárodních konferencích. Většinou byly tyto vědecké výsledky prezentovány samotnými studenty (Bc. Kšica, Bc. Rubeš a Ing. Janák).

### 9.3 MOŽNOSTI DALŠÍHO VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Výsledky předkládané práce jsou průběžně prezentovány v relevantních časopisech, na mezinárodních vědeckých fórech, konferencích a workshopech. Prezentované výsledky obvykle vyvolávají kladný ohlas a diskuzi, v které se řeší potenciální spolupráce na současných či budoucích projektech. Momentálně se zahraničními kolegy diskutujeme možnost aplikace prezentovaných výsledků v některé výzvě projektů Horizont 2020, případně bilaterálních a národních projektů zemí Evropské unie (Německo, Polsko).

Jak již bylo uvedeno, potenciální využití prezentovaných výsledků v průmyslových aplikacích a další vývoj bude excitován rozvojem bezdrátových technologií a snižováním jejich energetické náročnosti. Vzrůstá i společenská poptávka po těchto technologiích v souvislostech s projekty smart grid, smart city, internet of things (IOT) a machine-to-machine (M2M) komunikace. V kombinaci s využitím smart materiálů či moderních technologií výroby je velký potenciál i ke zvyšování konkurenceschopnosti prezentovaných vibračních a termoelektrických generátorů. Mnoho možností vývoje alternativních zdrojů energie leží také v oblasti biomedicínských aplikací.

## 10 ZÁVĚR

Energy harvesting aplikace jsou v současnosti jednou z nejdynamičtěji se vyvíjejících technologií současnosti. Jejich vývoj rapidně podporuje rozvoj a všudypřítomnost bezdrátových technologií a taktéž společenská a průmyslová poptávka po nich. Snižování energetické náročnosti jednotlivých bezdrátových uzlů dovoluje využití nových a alternativních zdrojů energie přímo z okolí v místě umístění tohoto uzlu. Další rozvoj energy harvesting aplikací slibuje i pokračující vývoj smart a nanomateriálů pro jednotlivé fyzikální principy přeměny energie.

Použití bezdrátových technologií v průmyslu je již nyní žádáno ve speciálních aplikacích (monitorování nepřístupných míst – např. drak letadla, mostní konstrukce, pneumatika – špatný přístup přívodu elektrické energie) a předpokládá se, že množství těchto aplikací se bude stále rozšiřovat. Výhodou běžného průmyslového prostředí je existence parazitní mechanické energie ve formě vibrací či rázů a již nyní je energetická hustota těchto zdrojů dostatečná pro elektromechanickou přeměnu a napájení moderních ULP bezdrátových aplikací přímo v místě umístění pouze z okolních zdrojů energie.

V práci je prezentován vývoj, návrh a optimalizace citlivého vibračního energy harvesting generátoru stanovených parametrů pro potřeby leteckých aplikací, kdy vyvinutý alternativní zdroj elektrické energie využívá přímo energii mechanických vibrací v místě umístění napájené aplikace.

Tento zdroj je založen na rezonančním mechanismu s magnetickou vazbou a minimálními mechanickými ztrátami, který pracuje v poměrně úzkém pásmu okolo rezonanční frekvence. Díky nelineárním magnetickým charakteristikám tuhosti tohoto mechanismu lze pracovní pásmo rozšířit, a nelineární magnetické síly také zabraňují i mechanickým nárazům při přetížení v rezonanci. Generování elektrické energie způsobuje disipaci energie z rezonančního mechanismu, tedy zpětně ovlivňuje velikost amplitudy pohybu mechanismu v rezonanci, a tím i generovaný elektrický výkon. Disipace energie v rezonančním mechanismu je ovlivněna připojenou elektronikou, elektrickou zátěží či způsobem odebírání elektrického výkonu. Špatnou volnou výkonové elektroniky lze pohyb mechanismu energy harvesting generátoru utlumit a zcela

zastavit generování energie. Proto musí být v obvodu zařazena moderní výkonová elektronika, tzv. on-chip, která optimálně disipuje z rezonančního mechanismu tolik mechanické energie, aby systém generoval maximální elektrický výkon. Ten je distribuován do akumulčního členu a z něj dále do napájené elektroniky, nebo přímo, pokud je v optimálním pracovním bodě dostatek výkonu. Celé toto zařízení lze chápat jako mechatronickou soustavu, a proto na jeho návrh lze aplikovat všechny přístupy a metody optimálního návrhu – především vývoj a návrh založený na multidisciplinárním modelu celku i jednotlivých subsystémů. S využitím verifikovaného modelu lze velmi přesně predikovat množství generované elektrické energie při simulaci buzení reálnými vibracemi. Optimalizace parametrů tohoto zařízení je díky množství nezávislých parametrů možná jen využitím moderních nástrojů, jako jsou evoluční či genetické algoritmy. Citlivý vibrační generátor lze použít jako zdroj elektrické energie i v místech zatíženými mechanickými rázy.

V rámci dvou mezinárodních projektů rámcových programů navázaných na letecký průmysl byly vyvinuty vibrační generátory pro zadané letecké aplikace. Nyní se dokončuje v rámci projektu TAČR vývoj záložního termoelektrického autonomního zdroje pro řídicí jednotku leteckého motoru.

Zajímavý potenciál pro aplikace energy harvesting technologií do budoucna představuje oblast biomedicínských aplikací, kde je cílem vývoj energeticky co nejméně náročných zařízení (kardiostimulátory, dávkovače léků či implantáty), které budou napájeny jen z okolní energie v místě aplikace tohoto biomedicínského zařízení – např. z pohybu tepny během srdečního tepu, dýchání, pohybu částí těla či chůze.



## Literatura

- Accoto, D., Calvano, M., Campolo, D., Salvinelli, F., Guglielmelli, E., 2009. Energetic analysis for self-powered cochlear implants. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2009, 4860–4863.
- Amirtharaiah, R., Wenck, J., Collier, J., Siebert, J., Zhou, B., Acemoglu, 2006. Circuits for energy harvesting sensor signal processing, in: 43rd Design Automation Conference, Proceedings 2006, Design Automation Conference. s. 639–644.
- Ancik, Z., Hadas, Z., Vlach, R., Janak, L., Singule, V., Prochazka, P., 2014. Simulation modelling of MEMS thermoelectric generator for aircraft applications, in: 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014. s. 184–189.
- Arnold, D.P., 2007. Review of Microscale Magnetic Power Generation. *IEEE Trans. Magn.* 43, 3940–3951. doi:10.1109/TMAG.2007.906150
- Becker, T., Kluge, M., Schalk, J., Tiplady, K., Paget, C., Hilleringmann, U., Otterpohl, T., 2009. Autonomous Sensor Nodes for Aircraft Structural Health Monitoring. *IEEE Sens. J.* 9. doi:10.1109/JSEN.2009.2028775
- Beeby, S.P., Torah, R.N., Tudor, M.J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C.R., Roy, S., 2007. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *J. Micromechanics Microengineering* 17, 1257–1265. doi:10.1088/0960-1317/17/7/007
- Ben Amor, N., Kanoun, O., Lay-Ekuakille, A., Specchia, G., Vendramin, G., Trotta, A., 2008. Energy harvesting from human body for biomedical autonomous systems, in: 2008 IEEE Sensors. *IEEE*, s. 678–680. doi:10.1109/ICSENS.2008.4716532
- Benasciutti, D., Moro, L., Zelenika, S., Brusa, E., 2009. Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes. *Microsyst. Technol.* 16, 657–668. doi:10.1007/s00542-009-1000-5
- Bowen, C.R., Taylor, J., LeBoulbar, E., Zabek, D., Chauhan, A., Vaish, R., 2014. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.* 00, 1–21. doi:10.1039/C4EE01759E
- D. M. Rowe, 2005. *Thermoelectrics Handbook*, IEEE Electrical Insulation Magazine. CRC Press. doi:10.1201/9781420038903
- Fiala, P., Drexler, P., 2011. Energy harvesting circuit for sensor system power supply 8066, 1–13. doi:10.1117/12.884768
- Glynne-Jones, P., Tudor, M.J., Beeby, S.P., White, N.M., 2004. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors Actuators A Phys.* 110, 344–349. doi:10.1016/j.sna.2003.09.045
- Hadas, Z., Holub, M., Blecha, P., Vetiska, J., Singule, V., 2014. Energy analysis of energy harvesting from machine tool vibrations. *MM Sci. J.*
- Hadas, Z., Huzlík, R., 2014. FEM model of electro-magnetic vibration energy harvester, in: *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. s. 371–377.
- Hadas, Z., Kurfurst, J., Ondrusek, C., Singule, V., 2012a. Artificial intelligence based optimization for vibration energy harvesting applications. *Microsyst. Technol.* 18, 1003–1014. doi:10.1007/s00542-012-1432-1
- Hadas, Z., Ondrusek, C., Singule, V., 2010a. Power sensitivity of vibration energy harvester. *Microsyst. Technol.* 16, 691–702. doi:10.1007/s00542-010-1046-4
- Hadas, Z., Singule, V., Ondrusek, C., 2010b. Verification of Vibration Power Generator Model for Prediction of Harvested Power. *Solid State Phenom., Solid State Phenomena* 164, 291–296. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.164.291

- Hadas, Z., Singule, V., Ondrusek, C., 2009. Optimal Design of Vibration Power Generator for Low Frequency. *Solid State Phenom., Solid State Phenomena* 147-149, 426–431.
- Hadas, Z., Vetiska, V., Huzlik, R., Singule, V., 2014. Model-based design and test of vibration energy harvester for aircraft application. *Microsyst. Technol.* 20, 831–843. doi:10.1007/s00542-013-2062-y
- Hadas, Z., Vetiska, V., Singule, V., Andrs, O., Kovar, J., Vetiska, J., 2012b. Energy Harvesting from Mechanical Shocks Using A Sensitive Vibration Energy Harvester. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 9, 1. doi:10.5772/53948
- Hadas, Z., Zouhar, J., Singule, V., Ondrusek, C., 2008. Design of energy harvesting generator base on rapid prototyping parts. *Power Electron. Motion Control Conf. 2008. EPE-PEMC 2008. 13th* 1665–1669. doi:10.1109/EPEPEMC.2008.4635506
- Hoang, D.C., Tan, Y.K., Chng, H.B., Panda, S.K., 2009. Thermal energy harvesting from human warmth for wireless body area network in medical healthcare system, in: *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. IEEE, s. 1277–1282. doi:10.1109/PEDS.2009.5385814
- Chao, L., Tsui, C.Y., Ki, W.H., Acm, 2007. Vibration Energy Scavenging and Management for Ultra Low Power Applications, in: *Islped'07: Proceedings of the 2007 International Symposium on Low Power Electronics and Design*. s. 316–321.
- James, E.P., Tudor, M.J., Beeby, S.P., Harris, N.R., Glynn-Jones, P., Ross, J.N., White, N.M., 2004. An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications. *Sensors Actuators A Phys.* 110, 171–176. doi:10.1016/j.sna.2003.10.057
- Janak, L., Ancik, Z., Hadas, Z., 2014. Simulation modelling of MEMS thermoelectric generators for mechatronic applications, in: *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. s. 265–271.
- Janak, L., Ancik, Z., Vetiska, J., Hadas, Z., 2015. Thermoelectric Generator Based on MEMS Module as an Electric Power Backup in Aerospace Applications. *Mater. Today Proc.* 2, 865–870. doi:10.1016/j.matpr.2015.05.112
- Krikke, J., 2005. Sunrise for energy harvesting products. *IEEE Pervasive Comput.* 4, 4–5. doi:10.1109/MPRV.2005.23
- Lefevre, E., Audigier, D., Richard, C., Guyomar, D., 2007. Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester. *IEEE Trans. Power Electron.* 22, 2018–2025. doi:10.1109/TPEL.2007.904230
- Mateu, L., Moll, F., 2005. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics, in: *Lopez, J.F., Fernandez, F. V, Lopez-Villegas, J.M., de la Rosa, J.M. (Ed.), VLSI Circuits and Systems II, Pts 1 and 2, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie)*. s. 359–373. doi:10.1117/12.613046
- Naifar, S., Bradai, S., Keutel, T., Kanoun, O., 2014. Design of a vibration energy harvester by twin lateral magnetolectric transducers, in: *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*. s. 1157–1162. doi:10.1109/I2MTC.2014.6860925
- Naruse, Y., Matsubara, N., Mabuchi, K., Izumi, M., Suzuki, S., 2009. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion. *J. Micromechanics Microengineering* 19. doi:094002 10.1088/0960-1317/19/9/094002
- Nasiri, A., Zabalawi, S.A., Mandic, G., 2009. Indoor Power Harvesting Using Photovoltaic Cells for Low-Power Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 56, 4502–4509. doi:10.1109/TIE.2009.2020703
- Niyato, D., Hossain, E., Rashid, M., Bhargava, V., 2007. Wireless sensor networks with energy harvesting technologies: a game-theoretic approach to optimal energy management. *IEEE Wirel. Commun.* 14, 90–96. doi:10.1109/MWC.2007.4300988

- Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Bhatt, A.C., Lesieutre, G.A., 2002. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Trans. Power Electron.* 17, 669–676. doi:10.1109/TPEL.2002.802194
- Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Lesieutre, G.A., 2003. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Trans. Power Electron.* 18, 696–703. doi:10.1109/TPEL.2003.809379
- Paradiso, J.A., Starner, T., 2005. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. *IEEE Pervasive Comput.* 4, 18–27. doi:10.1109/MPRV.2005.9
- Patel, P., Khamesee, M.B., 2013. Electromagnetic micro energy harvester for human locomotion. *Microsyst. Technol.* 19, 1357–1363.
- Paulo, J., Gaspar, P.D., 2010. Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices, in: *WCE 2010 - World Congress on Engineering 2010*. s. 909–914.
- Pfenniger, A., Wickramarathna, L.N., Vogel, R., Koch, V.M., 2013. Design and realization of an energy harvester using pulsating arterial pressure. *Med. Eng. Phys.* 35, 1256–65. doi:10.1016/j.medengphy.2013.01.001
- Poulin, G., Sarraute, E., Costa, F., 2004. Generation of electrical energy for portable devices. *Sensors Actuators A Phys.* 116, 461–471. doi:10.1016/j.sna.2004.05.013
- Priya, S., Inman, D.J. (Ed.), 2009. *Energy Harvesting Technologies*. Springer US, Boston, MA. doi:10.1007/978-0-387-76464-1
- Raghunathan, V., Ganeriwal, S., Srivastava, M., 2006. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *Ieee Commun. Mag.* 44, 108–114.
- Raghunathan, V., Chou, P.H., 2006. Design and Power Management of Energy Harvesting Embedded Systems, in: *ISLPED'06 Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design*. IEEE, s. 369–374. doi:10.1109/LPE.2006.4271870
- Rubes, O., Smilek, J., Hadas, Z., 2014. Development of vibration energy harvester fabricated by rapid prototyping technology, in: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*. IEEE, s. 178–182. doi:10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018255
- Samson, D., Kluge, M., Fuss, T., Schmid, U., Becker, T., 2012. Flight test results of a thermoelectric energy harvester for aircraft. *J. Electron. Mater.* 41, 1134–1137. doi:10.1007/s11664-012-1928-6
- Sari, I., Balkan, T., Kulah, H., 2008. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations. *Sensors Actuators A Phys.* 145-146, 405–413. doi:10.1016/j.sna.2007.11.021
- Spreemann, D., Manoli, Y., Folkmer, B., Mintenbeck, D., 2006. Non-resonant vibration conversion. *J. Micromechanics Microengineering* 16, S169–S173. doi:10.1088/0960-1317/16/9/S01
- Vijayaraghavan, K., Rajamani, R., 2010. Novel Batteryless Wireless Sensor for Traffic-Flow Measurement. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 59, 3249–3260. doi:10.1109/TVT.2010.2050013
- Wei, X., Liu, J., 2008. Power sources and electrical recharging strategies for implantable medical devices. *Front. Energy Power Eng. China* 2, 1–13. doi:10.1007/s11708-008-0016-3
- Williams, C.B., Yates, R.B., 1996. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors Actuators A Phys.* 52, 8–11. doi:10.1016/0924-4247(96)80118-X
- Zurbuchen, A., Pfenniger, A., Stahel, A., Stoeck, C.T., Vandenberghe, S., Koch, V.M., Vogel, R., 2013. Energy harvesting from the beating heart by a mass imbalance oscillation generator. *Ann. Biomed. Eng.* 41, 131–41. doi:10.1007/s10439-012-0623-3
- Žák, J., Hadaš, Z., Dušek, D., Pekárek, J., Svatoš, V., Janák, L., Prášek, J., 2015. Model-based design of artificial zero power cochlear implant. *Mechatronics*. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.04.018

## **Abstract**

This thesis deals with a unique principle of energy harvesting technologies and a development of autonomous sources of electrical energy for ultra-low power electronics like modern wireless sensors. Presented energy harvesting devices generate electric energy from its surroundings using some kind of energy conversion method. Therefore, the considered energy harvesting device does not consume any fuel or substance.

The definition of energy harvesting describes these technologies as the use of an ambient energy to provide electrical power for small electronic and electrical devices making them self-sufficient. The surrounding of the most engineering systems contains some form of a sufficient ambient energy. The technologies employed variously convert vibrations or other movement, human behavior, heat differences, visible light to electricity.

Motivation, methods, models and development process of energy harvesting devices are described. The developed generators convert ambient source of energy to electricity. This thesis is mainly focused on development of vibration energy harvesting technologies for aircraft applications. Several generators were developed under two European projects where the vibration energy harvesters use ambient energy of mechanical vibration.

This application presents a complex engineering problem and the vibration power generator consists of precise mechanical part, electro-mechanical converter, electronics, storage element and a powered application. It can be perceive as a mechatronic system and a mechatronic approach was used for development of our vibration energy harvester. An essential step of development process of these devices is simulation modelling which is based on mechatronic approach. Used model-based design of the vibration energy harvester is very useful during development and optimization process.

This development process was used for development of a thermoelectric energy generator and also for study of energy harvesting in biomedical applications of an artificial cochlear implant.