

ANALYSIS OF VIBRATION POWER GENERATOR

V. Singule^{*}, Z. Hadaš^{**}, Č. Ondrůšek^{***}

Summary: *The paper deals with possibility of feeding wireless sensors using energy harvesting methods. The vibration generator generally consists of a resonance mechanism and an energy transducer. Individual principles and designs of vibration generators are suitable for other nature of ambient vibration and required output power. This paper briefly explains the principles of different vibration generators for harvesting electrical energy from ambient vibration. Further, power analysis of a generic vibration generator is created and design principles of vibration generator are compared for different nature of ambient vibration.*

1. Úvod

Článek se zabývá možností využití všudypřítomné okolní energie k napájení bezdrátových senzorů. Okolní energie je zajímavý zdroj energie pro bezdrátové senzory, kde není možné s nějakého důvodu využít napájení baterii, rozsah pracovní teploty, životnost atd. Nejznámějším a nejvyužívanějším zdrojem okolní energie je solární energie, ale lze využít i dalších zdrojů okolní energie (rozdílu teplot, proudění různých medií, pasivního lidského chování, mechanických vibrací atd.) k získávání energie pro různé autonomní systémy a senzory. Pokud se v okolí napájeného zařízení vyskytuje nějaká forma dostatečné okolní energie, je velmi zajímavé ji využít k napájení a tak se vyhnout ne vždy vhodnému použití baterii. Tento způsob napájení je vhodný pro napájení bezdrátových senzorů umístěných v nepřístupných místech strojních soustav a nebo přímo do vnořených a nepřístupných struktur, např. konstrukce strojních soustav, stavby atd.

Velmi zajímavý zdroj okolní energie jsou mechanické vibrace, které se vyskytují u většiny strojních soustav. Pro generování elektrické energie lze použít několik fyzikálních principů přeměny mechanické energie na elektrickou energii. Naším cílem je analyzovat množství generované elektrické energie pomocí vibračního generátoru, který je buzen okolními vibracemi. Tato analýza je použita při návrhu konstrukce vibračního generátoru.

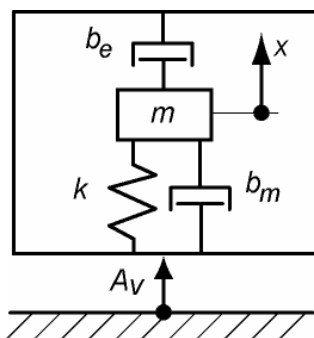
^{*} Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc., Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: 541142189, e-mail: singule@fme.vutbr.cz

^{**} Ing. Zdeněk Hadaš, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: 541142804, mail: yhadas00@stud.fme.vutbr.cz

^{***} Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, Fakulta elektroniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: 541142463, e-mail: ondrusek@feec.vutbr.cz

2. Princip vibračního generátoru

Obecně se vibrační generátor skládá z rezonančního mechanismu, který je představován kombinací hmotnosti m , tuhosti k a mechanického tlumení b_m , a převodníku mechanické energie na elektrickou energii, který ve vibračním generátoru představuje tlumení b_e způsobené odebráním elektrického výkonu ze systému.



Obr. 1 Schematicky znázorněný vibrační generátor

Resonanční mechanismu při buzení vibracemi A_v vytváří relativní pohyb hmoty mechanismu. Tato kinetická energie je pomocí vhodného převodníku energie transformována na elektrickou energii. Jako převodníku mechanické na elektrickou energii (Roudny et al., 2003) se může využít několika základních fyzikálních principů převodu energie:

- **Elektromagnetický generátor** - U tohoto principu je přeměna kinetické energie na elektrickou energii založena na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce. Pokud je vodič umístěn v magnetickém poli pohybujícího se permanentního magnetu, indukuje se v něm napětí. Konstrukce generátoru může být i opačná, kdy se vodič pohybuje vůči magnetickému poli permanentního magnetu.
- **Piezelektrický generátor** - Piezelektrický materiál vykazuje při mechanickém zatížení elektrickou polarizaci, která je úměrná zatížení. Tento efekt lze použít pro přeměnu kinetické energie na elektrickou energii. Piezelektrický vibrační generátor je tvořen nejčastěji vetknutým nosníkem z piezokeramiky, nebo z jiného materiálu, přičemž piezokeramická destička je na nosníku fixována. Tento vetknutý nosník vytváří tuhost mechanismu a v kombinaci s hmotností je vytvořen rezonanční mechanismu, který při buzení vibracemi deformuje piezokeramickou destičku a v ní se generuje elektrické napětí.
- **Elektrostatický generátor** - Elektrostatický generátor se skládá ze dvou navzájem dielektrikem oddělených vodičů (tj. kondenzátor) a vzájemným relativním pohybem se generuje elektrická energie. Relativní pohyb je i zde vytvářen rezonančním mechanismem naladěným na charakter okolních vibrací. Nevýhodou tohoto principu je nutnost použití zdroje napětí, který inicializuje přeměnu energie. Generátor musí být nabitý počátečním nábojem, aby mohla být spuštěna přeměna kinetické energie na elektrickou energii.
- **Magnetostrikční generátor** – Magnetostrikční materiál vykazuje při mechanickém zatížení magnetické pole, které je úměrné deformaci. Tento efekt lze využít s podobně sestaveným rezonančním mechanismem jako u piezelektrického materiálu a s použitím cívky lze pomocí Faradayova zákonu elektromagnetické indukce generovat elektrickou energii.

3. Konstrukce resonančního mechanismu

Pro každou aplikaci použití generátoru musí být vhodně zvolena a naladěna nejen konstrukce resonančního mechanismu tak celého vibračního generátoru. Jednotlivé fyzikální principy převodníku energie vyžaduje jinou konstrukci resonančního mechanismu, který poskytuje potřebnou kinetickou energii k přeměně na elektrickou energii. Dalšími důležitými aspekty konstrukce vibračního generátoru jsou kromě charakteru vibrací i jeho velikost a požadovaný generovaný výkon. Od těchto požadavků se odvíjí možnost využití jednotlivých typů konstrukce resonančního mechanismu. Variant konstrukčního řešení je velmi mnoho. Ne všechny jsou však vhodné pro použití ve vibračním generátoru. Problémem některých konstrukčních variant je vysoké mechanické tlumení. Toto je u většiny konstrukcí limitujícím faktorem a při návrhu se snažíme snížit hodnotu tlumení na minimum.

Resonanční mechanismus je vždy tvořen pružným členem o dané tuhosti a hmotou generátoru. Tato kombinace tuhosti a hmotnosti je naladěna na nejčastější frekvenci vibrací. Pro konstrukci resonančního mechanismu vibračního generátoru se mohou použít tyto konstrukční principy pružného členu:

- Pružina – válcová, tvarová, torzní pružina, speciální konstrukční varianty pružiny atd.
- Vetknutý nosník – jednostranně či oboustranně,
- Membrána,
- Odpuzující síly mezi permanentními magnety (Hadaš et al., 2005),
- Tuhost kombinovaných konstrukčních struktur atd.

Konstrukci generátoru můžeme ve velmi malém rozsahu přeladovat přidáním či odebráním hmoty. Z hlediska mechanického přeladění či doladění resonančního mechanismu generátoru na frekvenci vibrací se jeví jako nejvhodnější použití tuhosti sady odpuzujících se magnetů. Takto se změnou vzdálenosti mezi magnety změní i tuhost mechanismu a tím i vlastní frekvence mechanismu. Bohužel mechanické přeladování resonanční frekvence mechanismu během chodu generátoru je prakticky nemyslitelné a generátor pracuje jen ve velmi úzké šířce pásma kolem naladěné resonanční frekvence.

4. Porovnání a zhodnocení jednotlivých principů

Každý z fyzikálních principů převodu energie a konstrukcí resonančního mechanismu je vhodný pro jiný charakter vibrací a generovaný výkon. Pro vibrace vyskytující se u běžných strojních soustav je vhodné použít elektromagnetický generátor popřípadě piezoelektrický generátor. Záleží zde hlavně na frekvenci a intenzitě budících vibrací a dále na požadovaném výkonu. Generovaný výkon lze zvyšovat zvětšením rozměru (hmotnosti) vibračního generátoru.

Elektrostatický generátor je velmi vhodný svým principem a výrobou pro použití v MEMS zařízeních. Vhodný je pro výkony v řádu μW a obvykle využívá vibrace s frekvencí nějakoli kHz. Nevýhodou tohoto principu je nutnost použití zdroje napětí, který inicializuje přeměnu energie. Tuhost resonančního mechanismu je zde nejčastěji tvořena tvarovou strukturou v křemíkové destičce, která zajišťuje relativní pohyb vybuzený vibracemi.

Piezoelektrický a magnetostrikční generátor mají podobné vlastnosti co se týká resonančního mechanismu. Ten je nejčastěji tvořen vetknutým nosníkem, popřípadě

membránou, a nanosená piezokeramická vrstva se při výchylce deformuje a generuje elektrickou energii. Piezoelektrický generátor se jeví jako vhodnější pro použití při vyžadovaném malém objemu generátoru, okolo 1 cm^3 , ale je jej možno použít i v MEMS zařízeních. Generuje podstatně větší napětí, avšak menší měrný výkon díky vysoké vnitřní impedanci. Při nízkých frekvencích je vnitřní impedance piezokeramického materiálu podstatně vyšší, v řádu $\text{M}\Omega$, a proto je vhodný pro použití při buzení vyšší frekvencí vibrací. I díky konstrukci rezonančního mechanismu je vhodnější pro větší frekvence vibrací, řádově 100 Hz a více. Generovaný výkon je obvykle do 1 mW (záleží na velikosti generátoru). Je jej možno použít i pro generování elektrické energie z velmi nízké hladiny vibrací.

Magnetostrikční generátor je zatím stále ve světě ve stádiu výzkumu a zatím nebyl ještě realizován. Bylo však už realizováno několik lineárních generátorů a pohonu na tomto principu. Vývoj magnetostrikčních materiálů avšak slibuje rozvoj tohoto principu a ukáže vhodnost použití tohoto principu i pro vibrační generátory.

Elektromagnetický generátor se je vhodnější pro použití bez podstatného omezení rozměrů generátoru, několik cm^3 . Je to dáno velikostí cívky (délka vodiče je obvykle několik desítek metrů), na které se indukuje napětí. Použití tohoto generátoru je vhodnější při nižších frekvencích vibrací, tzn. při vyšší amplitudě vibrací, kdy vybuzený relativní pohyb má větší amplitudu a tím dochází k větší změně magnetického indukčního toku a i k většímu generovanému napětí. Je možno jej použít i pro MEMS zařízení (malý výkon, nízké napětí), ale tato konstrukce jeví jako nejvhodnější pro větší generované výkony, několik mW až desítek mW . Elektromagnetický generátor je díky svému výkonu nejvhodnější zdroj elektrické energie z okolních vibrací pro napájení bezdrátových senzorů. U tohoto generátoru je velmi důležitá vhodná konstrukce kotvy a magnetického obvodu převodníku energie, která musí být optimálně sladěná s konstrukcí rezonančního mechanismu. Jako pružný člen lze při vhodném sladění s elektromagnetickým převodníkem energie použít jakýkoliv konstrukční princip. Zvolení vhodné konstrukce záleží na charakteru vibrací.

5. Analýza generovaného výkonu

Při analýze vibračního generátoru je pro zjednodušení uvažován lineární model (Hadaš, Z., 2005). Podle schématu zobrazeného na obr. 1 má pohybová rovnice mechanismu generátoru následující tvar:

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

Předpokládá se buzení generátoru zrychlením okolních vibrací A_v s výchylkou sinusového tvaru $z = Z_0 \cdot \sin(\omega t)$. Vlastní úhlová frekvence generátoru je dána vztahem $\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Dále je zaveden součinitel kritického tlumení $b_k = 2m\Omega$, a celkový poměrný útlum soustavy $\zeta_o = \frac{b_e + b_m}{b_k}$. Po dosazení má pohybová rovnice následující tvar:

$$\ddot{x} + 2\zeta_o\Omega\dot{x} + \Omega^2x = A_v \quad (2)$$

Při připojení zátěže na svorky generátoru odebíraný výkon ze systému vytvoří v převodníku energie tlumící sílu $F = b_e \cdot v$ (Roudny, 2003), kde v je rychlost relativního

kmitavého pohybu. Tato síla je funkcí výkonu generátoru a rychlosti, kterou kmitá budicí soustava. Výkon je pak dán následující rovnicí:

$$P = \int_0^v F dv \quad (3)$$

Po dosazení tlumící síly generátoru a integrováním rovnice (3) dostaneme výsledný vztah popisující efektivní výkon generátoru:

$$P = \frac{1}{2} b_e v^2 \quad (4)$$

Odvození vztahu pro výkon generátoru dostaneme vyřešením pohybové rovnice (1) a dosazením do vztahu (4). Toto odvození je jednoduché a bylo už několikrát publikováno (Williems et al., 1996). Výsledný vztah pro výkon vibračního modelu generátoru je:

$$P = \frac{m \zeta_e \Omega \omega^2 \eta^3 Z_0^2}{(2 \zeta_o \eta)^2 + (1 - \eta^2)^2}, \quad (5)$$

kde $\zeta_e = \frac{b_e}{2m\Omega}$ je složka poměrného útlumu způsobená přeměnou energie a $\eta = \frac{\omega}{\Omega}$ je součinitel naladění generátoru. Při buzení vibracemi o frekvenci shodné s rezonanční frekvencí generátoru se vztah (5) zjednoduší a pro maximální výkon vibračního generátoru obdržíme výsledný vztah:

$$P_e = \frac{m \zeta_e \omega^3 Z_0^2}{4 \zeta_o^2} = \frac{m \zeta_e A_v^2}{4 \omega \zeta_o^2}. \quad (6)$$

Pro porovnání mechanický výkon kmitající hmoty uvnitř generátoru je tak dán vztahem:

$$P_{mech} = m \ddot{x} \ddot{x}. \quad (7)$$

Kvalitativní faktor Q vibračního generátoru je definován jako poměr amplitudy kmitající hmoty generátoru X_0 ku amplitudě vibrací Z_0 . Maximální amplituda kmitající hmoty X_0 při rezonanční frekvenci je dána známým řešením lineární pohybové rovnice mechanismu (1):

$$X_0 = \frac{m\Omega}{b_o} Z_0. \quad (8)$$

Kvalitativní faktor Q lineárního generátoru je:

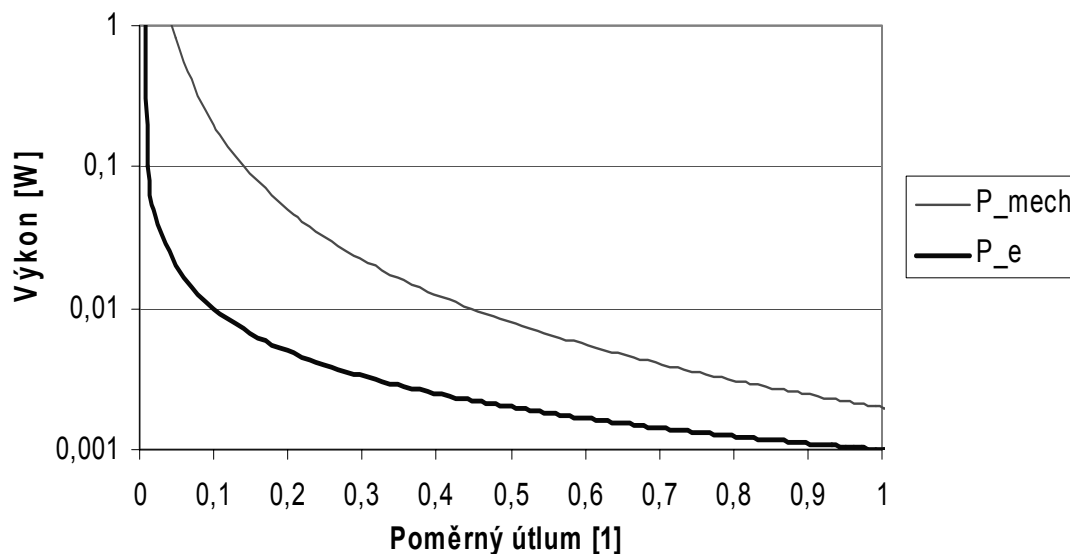
$$Q = \frac{X_0}{Z_0} = \frac{m\Omega}{b_o} = \frac{1}{2\zeta_o}. \quad (9)$$

Ze vztahu (9) je vidět jak poměrný útlum ovlivňuje velikost kmitavého pohybu hmoty. Pomocí vztahu (9) můžeme upravit rovnici (7) na vztah (10) udávající mechanický výkon vibračního generátoru závislé na vlastnostech budících vibrací:

$$P_{mech} = m \ddot{z} \ddot{z} Q^2 = m Z_0^2 \omega^3 \frac{1}{4 \zeta_o^2} = \frac{m A_v^2}{4 \omega \zeta_o^2}. \quad (10)$$

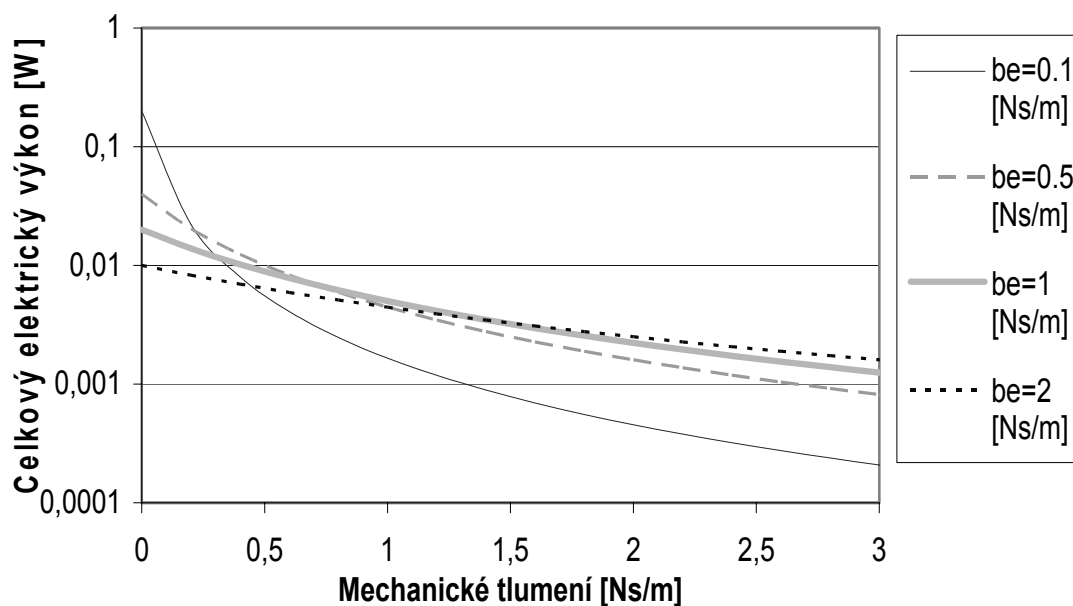
Na obrázcích jsou znázorněny grafy ukazující generovaný elektrický výkon (6) v závislosti na kvalitě rezonančního mechanismu, tzn. velikosti mechanického tlumení. Analýza výkonu

je provedena na základě zhotoveného rezonančního mechanismu (Hadaš et al., 2005). Efektivní hmotnost pohyblivé části rezonančního mechanismu je 23,5 g a generátor je naladěný na rezonanční frekvenci 36 Hz. Předpokládáme buzení vibracemi s efektivní hodnotou zrychlení 6 m/s^2 .



Obr. 2 Výkon v závislosti na celkovém poměrném útlumu

Na obr. 2 jde vidět jak hodnota elektrického výkonu dramaticky klesá se zvyšujícím se mechanickým tlumením. Dále graf ukazuje jakou část mechanického výkonu lze převést na celkový elektrický výkon. V analýze se předpokládá hodnota elektrického tlumení o stejné velikosti jako hodnota mechanického tlumení, viz následující obr. 3. Hodnota mechanického výkonu je důležitá pro konstrukci rezonančního mechanismu, protože odpovídá maximální relativní výchylce v mechanismu. Pokud mechanismus nebude vhodně zkonstruovaný na požadovaný výkon, bude docházet k nárazům pohybující hmoty do rámu vibračního generátoru.



Obr. 3 Celkový elektrický výkon v závislosti na mechanickém tlumení

Na obr. 3 je znázorněná závislost celkového generovaného elektrického výkonu v závislosti na mechanickém tlumení pro různé hodnoty elektrického tlumení způsobeného generováním energie. Je patrné, že vibrační generátor generuje maximální výkon vždy, pokud je hodnota elektrického tlumení shodná s hodnotou mechanického tlumení v rezonančním mechanismu.

6. Závěr

Generovaný elektrický výkon závisí na vlastnostech vibrací, úhlové frekvenci a zrychlení vibrací, a dále na konstrukci vibračního generátoru, pohybující hmotnosti, celkovém poměrném útlumu a elektrickém poměrném útlumu, který je dán konstrukcí převodníku energie. Maximální elektrický výkon je generován při buzení rezonanční frekvencí vibrací. Poměr elektrického a mechanického poměrný útlum ovlivňuje také generovaný výkon a je maximální, pokud tyto tlumící složky jsou si rovny.

Vibrační generátor je vhodný a nevyčerpatelný zdroj elektrické, pokud je umístěn v prostředí zatíženém dostatečnými vibracemi. Tento generátor musí být vhodně a optimálně navržen a svými parametry naladěn přesně na charakter budících vibrací a poté je schopen dodávat elektrickou energii vždy, když je buzen těmito vibracemi.

7. Poděkování

Tato práce byla provedena za podpory projektu MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických soustav".

8. Literatura

- Hadaš, Z. (2005) *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Pojednání ke státní doktorské zkoušce, FSI VUT v Brně.
- Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č. (2005) Mechanism of Vibration Microgenerator Based on Non-linear Stiffness. *MRB 2005*, Třešť, pp. 19-24.
- Roundy, S., Rabaey, J. M., Wright, P. K. (2003) *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: With Special Focus on Vibrations*, Kluwer Academic Publishers, Boston MA.
- Roundy, S. J., (2003) *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley CA.
- Williams, C. B., Yates, R. B (1996) Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Sensors and Actuators*. A52(1), pp. 8-11.