

TUNING UP PARAMETERS OF VIBRATION GENERATOR

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

Summary: *The paper deals with tuning up parameters of a vibration power generator for feeding wireless sensors. The vibration power generator obtains electrical energy from ambient energy of the mechanical vibration. This device consists of a resonance mechanism and an electromagnetic circuit (energy transducer). The energy transducer must be tailored exactly to relatively movement of mass in resonance mechanism, which depends on overall damping factor of generator. This vibration power generator is capable generates useful electric power but the generator must be tailored exactly to the specific application, environment and vibration.*

1. Úvod

Článek se zabývá návrhem a laděním parametrů elektromagnetického vibračního generátoru, který je schopen generovat elektrickou energii s okolních vibrací. Tento generátor najde uplatnění pro napájení bezdrátových senzorů a bezdrátových sensorických sítí. Tyto bezdrátové senzory jsou umístěny zpravidla v místech, kde není z nějakého důvodu možnost použít napájení bateriemi (teplotní rozsah pracovní teplot nebo nepřístupnost senzoru). Nutností je, aby senzor pracoval v prostředí zatíženém dostatečnými vibracemi s pokud možno konstantní frekvencí.

Vibrační generátor je konstruován jako mechanický rezonanční obvod, který je naladěn svou vlastní frekvencí na nejčetnější frekvenci okolních vibrací, a tudíž pracuje správně jen v poměrně úzkém frekvenčním pásmu okolo této frekvence. Při zatížení vibracemi o rezonanční frekvenci dochází k vybuzení relativního pohybu kmitající hmoty uvnitř generátoru, který je pomocí vhodně zkonstruovaného elektromagnetického obvodu transformuje kinetickou energii kmitající hmoty na eklektickou energii. Elektromagnetický obvod, který generuje elektrickou energii, se skládá z permanentního magnetu a cívky kotvy. Vhodně navržený magnetický obvod s permanentním magnetem je spojen s rezonančním mechanismem a při buzení vibracemi se relativně pohybuje vůči cívice kotvy. Parametry

* 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. Vladislav Singule, CSc., Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.:541142189, mail: singule@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, mail: ondrusek@fec.vutbr.cz

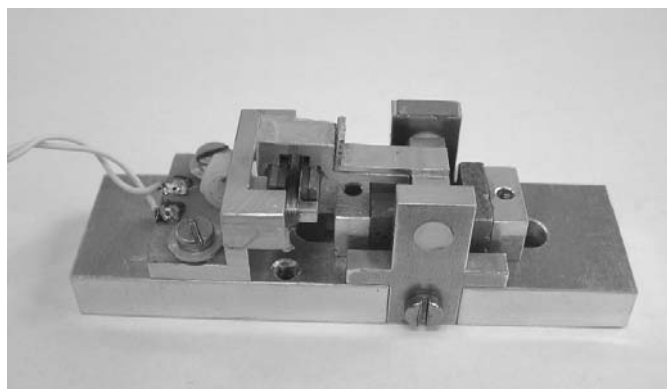
tohoto elektromagnetického obvodu musí být navrženy podle parametrů a naladění konstrukce rezonančního mechanismu vibračního generátoru. V cívce kotvy se díky relativnímu pohybu podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce indukuje výstupní napětí.

Je navrženo a simulačně ověřeno několik koncepcí konstrukce jak rezonančního obvodu, tak i elektromagnetického obvodu (Hadaš, 2005). Článek se zabývá naladěním vhodné konstrukce vibračního generátoru pro budící vibrace s frekvencí okolo 36 Hz.

2. Elektromagnetický vibrační generátor

Konstrukce navrženého elektromagnetického vibračního generátoru, obr. 1, je založena na již dříve vyrobeném rezonančním mechanismu (Hadaš et al., 2005). K této konstrukci byl vytvořený nový elektromagnetický obvod jako převodník energie, který je vhodnější pro generování elektrické energie, než předešlý návrh (Hadaš et al., 2005). Tento převodník energie se skládá s magnetického obvodu a samonosné cívky.

Parametry rezonančního mechanismu jsou naladěny na vlastní frekvenci 36 Hz a generátor je schopen generovat dostatečnou elektrickou energii již při intenzitě budících vibrací s efektivní hodnotou okolo 0,4 G.

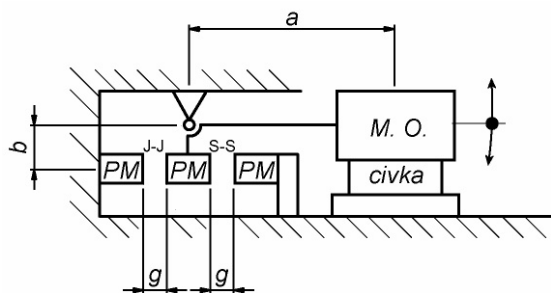


Obr. 1 Konstrukce vibračního generátoru

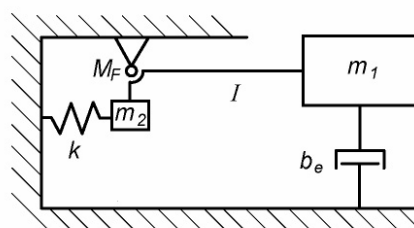
3. Konstrukce a naladění rezonančního mechanismu

Konstrukce navrženého rezonančního mechanismu vibračního generátoru (Hadaš et al., 2005) je založena na tuhosti odpuzujících se permanentních magnetů a na hmotnosti, kterou tvoří magnetický obvod pohybující se vůči kotvě cívky. Magnetický obvod i odpuzující magnet jsou umístěny na dvojramenné páce, která se natáčí v teflonových kluzných ložiscích.

Konstrukce rezonančního mechanismu, která je schématicky znázorněna na obr. 2, má permanentní magnet *PM* umístěný na rameni dvojčinné páky. Magnet se pohybuje mezi dvěma opačně orientovanými pevnými magnety a takto vytvořená tuhost mechanismu je závislá na vzdálenosti mezi magnety *g* (Hadaš et al., 2005). Páka se natáčí v kluzném teflonovém ložisku a druhé rameno páky nese pohyblivou část magnetického obvodu *M.O.* mechanismu, která se při vybuzení vibracemi pohybuje relativně vůči cívce pevně spojené s rámem mechanismu.



Obr.2 Schéma resonančního mechanismu



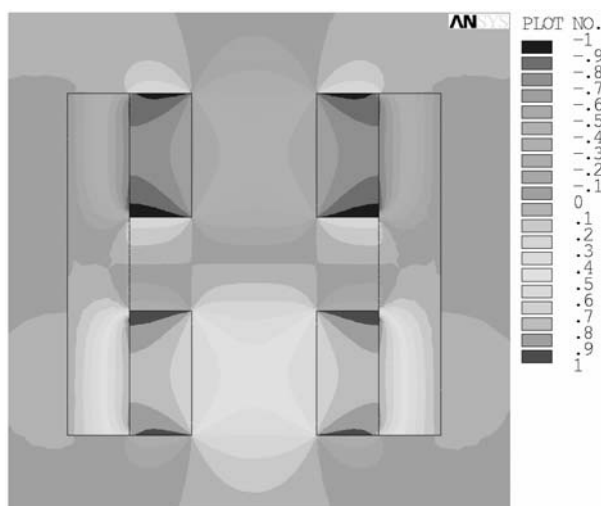
Obr. 3 Model vibračního generátoru

Zobrazený zjednodušený model vibračního generátoru na obr. 3 se skládá ze dvou hmotností $m_{1,2}$ umístěných na páce, tuhosti k , třecího momentu M_F v kluzném ložisku a tlumení b_e způsobené generováním elektrické energie.

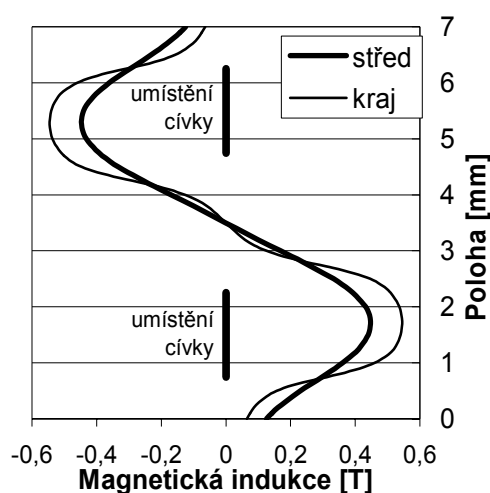
Podle tohoto modelu (Hadaš, 2005) byla naladěna vlastní frekvence resonančního mechanismu na frekvenci 36 Hz. Ladění tohoto mechanismu je velice jednoduché a provádí se změnou vzdálenosti g mezi odpuzujícími se permanentními magnety. Oproti předchozí verzi vibračního generátoru (Hadaš et al., 2005) je vzdálenost mezi magnety pro takto naladěný generátor podstatně větší, což je dáno jinou konstrukcí magnetického obvodu, tzn. menší hmotnost m_1 . Pro naladěnou vzdálenost mezi magnety ($g = 3$ mm) můžeme tuhost mezi magnety považovat za lineární.

4. Konstrukce magnetického obvodu

Konstrukce magnetického obvodu, který se pohybuje relativně vůči cívce se skládá ze 4 permanentních magnetů, které jsou fixovány ke dvěma deskám z magneticky vodivého materiálu. Tohle rozstavení je velmi vhodné pro vibrační generátor (Glynne-Jones., 2005). Pro tento velmi jednoduchý a vhodný magnetický obvod byly vybrány permanentní magnety ze vzácných zemin FeNdB. Magnety vytvářejí mezi sebou magnetické pole v poměrně velkém prostoru, ve kterém je umístěna cívka.



Obr.4 Magnetické indukce ve směru kolmém k směru relativního pohybu



Obr.5 Magnetická indukce v závislosti na poloze mezi magnety

Na obr. 4 je znázorněný model magnetického obvodu pomocí MKP v prostředí ANSYS. Je zde znázorněna magnetická indukce ve směru kolmém ke kmitavému pohybu. Hodnota magnetické indukce je vynesena v grafu na obr. 5. Křivky v tomto grafu ukazují hodnotu magnetické indukce ve středu a na kraji cívky, cívka umístěná mezi magnety, v závislosti na poloze v magnetickém obvodu. Pro zjednodušení můžeme uvažovat střední hodnotu magnetické indukce v místě umístění cívky $B_x = 0,45$ T.

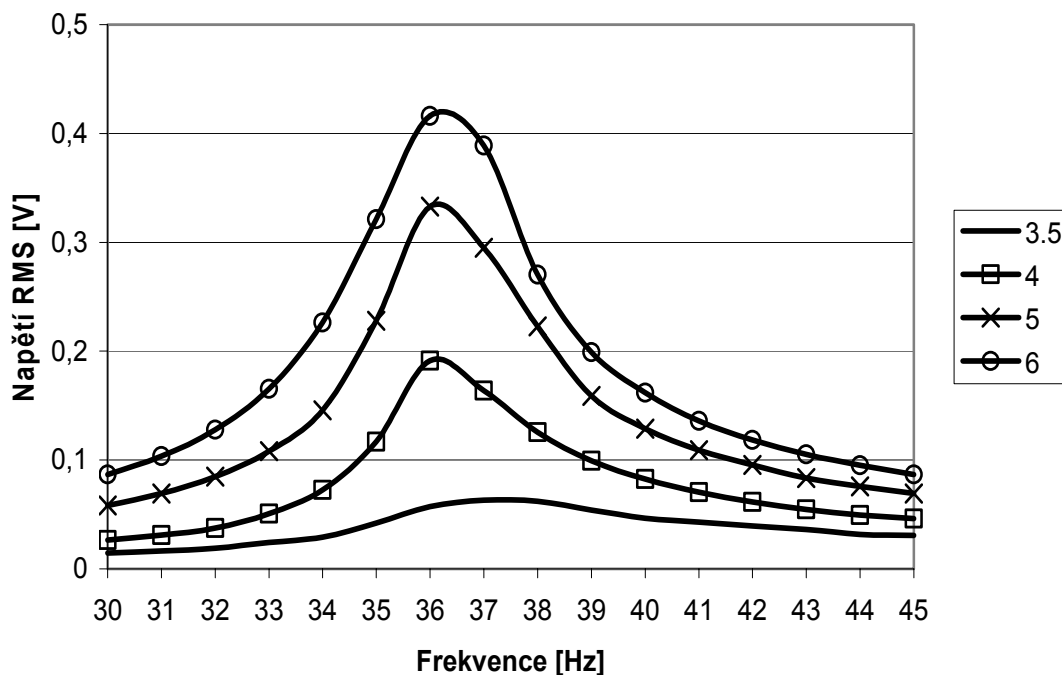
Při vybuzení relativním pohybem mezi cívkou a magnetickým obvodem dochází ke změně magnetického indukčního toku v místě cívky a díky Faradayova zákonu elektromagnetické indukce se na závitech cívky indukuje napětí.

Je uvažováno použití samonosné cívky bez jádra, která bude umístěna ve volném prostoru mezi jednotlivými dvojicemi magnetů. Při použití návrhu cívky s jádrem musíme dbát na to, že velké přitažlivé síly mezi jádrem cívky a magnety budou zachyceny v ose natáčení páky a způsobí tak větší třecí moment v kluzných ložiscích a tím sníží citlivost a celého vibračního generátoru na vibrace, tzn. při stejných budících vibracích se sníží relativní výchylka a tím i generovaný výkon.

Pro testovací účely a měření citlivosti generátoru byla navinuta pouze testovací cívka. Cívka je vinuta z drátu o průměru 0,05 mm a má okolo 120 závitů. Odpor této cívky je 85 Ω .

5. Měření vibračního generátoru

Takto sestavený a naladěný generátor s rezonanční frekvencí 36 Hz byl testován při zatížení okolními vibracemi z různou hodnotou zrychlení vibrací. Při měření byl ke generátoru připojen osciloskop s odporem 50 Ω . Toto zatížení generátoru představuje tlumení způsobené generováním elektrické energie. Ovšem v porovnání s hodnotou mechanického tlumení, která je způsobena třením v kluzných ložiscích je velmi malá. Tření v ložisku ovlivňuje citlivost generátoru na okolní vibrace.



Obr. 6 Indukované napětí v závislosti na frekvenci vibrací při různých intenzitách

Testovací vzorek vibračního generátoru byl buzen okolními vibracemi a byla měřena efektivní hodnota indukovaného napětí. Měření byla provedena pro různé intenzity budících vibrací, tzn. pro různé hodnoty zrychlení vibrací pro danou budící frekvenci, a jsou znázorněna na obr. 6. Velmi malé napětí generovaly vibrace s efektivní hodnotou zrychlení $3,5 \text{ m/s}^2$. Při této intenzitě vibrací je relativní pohyb utlumen třecí silou v ložisku. Při buzení vibrací s efektivní hodnotou zrychlení 4 m/s^2 a více dochází k dostatečnému relativnímu pohybu v rezonančním mechanismu. Při použití optimální cívky je tento generátor schopen z těchto vibrací generovat dostatečný výkon.

Vzorek vibračního generátoru byl schopen indukovat elektrické napětí v rozmezí zrychlení budících vibrací $4 - 7 \text{ m/s}^2$. Při efektivní hodnotě zrychlení nad 7 m/s^2 docházelo k velmi velké výchylce relativního pohybu a nastávaly zde rázy páky do rámu generátoru. Generátor musí být opatřen mechanickými nárazkami, které zabrání velkému relativnímu pohybu při velkých budících vibracích. Velký relativní pohyb v rezonančním mechanismu je nebezpečný z hlediska poškození cívky.

6. Návrh optimální cívky

Optimální návrh cívky je důležitý z hlediska maximálního generovaného výkonu, který je možno převést z pohybu rezonančního mechanismu. Jak už bylo několikrát publikováno (Roudny et al., 2005) a námi ověřeno (Singule et al., 2006), tak vibrační generátor generuje maximální výkon, pokud hodnota elektromagnetického tlumení způsobeného odebráním výkonu je stejná jako hodnota mechanického tlumení v rezonančním mechanismu.

Pokud předpokládáme hodnotu indukovaného napětí ve tvaru (Hadaš et al., 2005):

$$U = B_x \cdot N \cdot L \cdot v, \quad (1)$$

kde B_x je magnetická indukce, N je počet závitů cívky, L je aktivní délka závitu cívky a v je rychlost magnetického obvodu, tak celkový elektrický výkon bude mít tvar:

$$P = \frac{U^2}{R_C + R_Z}, \quad (2)$$

kde R_C je odpor cívky a R_Z je odpor zátěže. Ve vztahu (2) předpokládáme indukčnost této cívky bez jádra za velmi malou a frekvence 36 Hz je taktéž velmi malá.

Celkový výkon generovaný generátorem způsobuje elektromagnetické tlumení b_e . Toto tlumení (Singule et al., 2006) odebírání ze systému výkon:

$$P = \frac{1}{2} b_e \cdot v. \quad (3)$$

Celkový elektrický výkon a výkon způsobený odebráním elektrické energie ze systému se musí rovnat. Poté elektromagnetické tlumení je dáno vztahem:

$$b_e = \frac{2 \cdot (B_x \cdot N \cdot L)^2}{R_C + R_Z}. \quad (4)$$

Jak už bylo zmíněno, tak maximální elektrický výkon jakýkoliv vibrační generátor generuje při rovnosti mechanického a elektromagnetického tlumení. Proto vztah (4) musí být

použit pro návrh parametrů optimální cívky vzhledem k rezonančnímu mechanismu vibračního generátoru, tak aby elektromagnetické tlumení způsobené generovaným výkonem bylo shodné s mechanickým tlumením v rezonančním mechanismu.

Jelikož je mechanické tlumení v rezonančním mechanismu způsobené třením, není jednoduché najít hodnotu mechanického tlumení u této nelineární soustavy. Momentálně je práce zaměřena na nalezení matematického modelu soustavy, který bude popisovat tento vibrační generátor v souladu s měřeními a na základě tohoto modelu bude navržena optimální cívka pro daný rezonanční mechanismus.

7. Závěr

Vibrační generátor je vhodný nezávislý zdroj elektrické energie pro bezdrátové senzory pokud je snímané místo zatíženo dostatečnými vibracemi. Konstrukce vibračního generátoru musí být naladěna na budící vibrace a parametry elektromagnetického obvodu musí být vhodně naladěny podle vlastností rezonančního obvodu. Generovaný elektrický výkon závisí na kvalitě rezonančního mechanismu, konstrukci elektromagnetického obvodu, který převádí energii relativního pohybu na elektrickou energii, a intenzitě budících vibrací. Vhodně naladěný generátor s optimálně navrženou cívkou je schopen generovat efektivní elektrický výkon okolo 20 mW při efektivní hodnotě budících vibrací 0,6 G.

8. Poděkování

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

9. Literatura

- Glynne-Jones, P., Tudor, M. J., Beeby, S. P., White, N. M. (2004) An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 110, pp. 344-349.
- Hadaš, Z. (2005) *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Pojednání ke státní doktorské zkoušce, FSI VUT v Brně.
- Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č. (2005) Comparison and Assessment of different conception of vibration microgenerator construction. *Inženýrská mechanika 2005*, Svratka, pp. 101-102.
- Hadaš, Z., Singule, V., Ondrůšek, Č. (2005) Comparison of the Simulation Results of the Vibration Microgenerator Model with the Measuring of the Vibration Microgenerator Prototype. *Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005*, Jarnołtówek, pp. 419-422.
- 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.
- Singule, V., Hadaš, Z., Ondrůšek, Č. (2006) Analysis of Vibration Power Generator. *Inženýrská mechanika 2006*, Svratka.