



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

THE COMPARISON AND ASSESSMENT OF DIFFERENT CONCEPTION OF VIBRATION MICROGENERATOR CONSTRUCTION

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

Summary: *The paper deals with the comparison and assessment different conception of a vibration microgenerator construction. The vibration microgenerator is device that generates the electrical energy from the mechanical energy of an ambient vibration. The vibration microgenerator is a mechanical and electromagnetic coupled circuit. The construction of the microgenerator mechanism is tuned up to resonance frequency and it gets moving by permanent magnet through a coil. Owing to electromagnetic induction an output voltage is induced in the coil. This device is used as a power supply for independent feeding of passive sensors with electric output up to 1 mW.*

1. Úvod

Článek se zabývá porovnáním a zhodnocením různých koncepcí konstrukce vibračního mikrogenerátoru. Celkově vzato je vibrační mikrogenerátor konstruován jako mechanický rezonanční obvod, který je naladěn na svou vlastní frekvenci. Tato frekvence je shodná se střední hodnotou frekvence okolních vibrací. Vibrační mikrogenerátor proto pracuje v blízkosti své rezonanční frekvence a tím zesiluje amplitudu budících mechanických vibrací. Budící pohyb je transformován na relativní pohyb v elektromagnetickém obvodu, který je rovněž konstrukční součástí mikrogenerátoru. Tento obvod se skládá s permanentního magnetu a kotvy s cívkou, přičemž parametry jejich relativního pohybu jsou určeny naladěním mechanické konstrukce vibračního mikrogenerátoru. V cívce kotvy se podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce indukuje výstupní napětí.

Je navrženo a simulačně ověřeno několik koncepcí konstrukce jak rezonančního obvodu, tak i elektromagnetické části mikrogenerátoru. V tomto článku jsou tyto koncepce popsány,

* Ing. Zdeněk Hadaš, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420541142804, e-mail: hadas@kn.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.: +420541142189, e-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.: +420541142463, e-mail: ondrusek@feec.vutbr.cz

zhodnoceny a porovnány. Dále je naznačena jejich vhodnost z hlediska různých průběhů budících vibrací.

2. Princip vibračního mikrogenerátoru

Mechanismus mikrogenerátoru je představován kmitající hmotou o jednom stupni volnosti a je tvořen kombinací hmotnosti m , tuhosti k a tlumení b . Celý tento mechanismus je kinematically buzen okolními vibracemi z . Vlastní frekvence tohoto mechanismu je shodná s frekvencí budících vibrací z . Budící vibrace z s frekvencí v blízkosti rezonanční frekvence mechanismu způsobí rozkmitání hmoty mechanismu. V takto buzeném mechanismu nastává relativně velký pohyb hmoty m vůči základnímu rámu s cívkou a v důsledku tohoto pohybu se podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce generuje v cívce výstupní napětí.

Různé konstrukce mechanismu vibračního mikrogenerátoru se liší použitým typem tuhosti v mechanismu, lineární – nelineární, měkká – tvrdá charakteristika tuhosti, a dále také může být vybuzený relativní pohyb kmitající části v mechanismu zvětšován např. pomocí páky atd. Všechny tyto koncepce konstrukce mikrogenerátoru jsou detailněji popsány v následujících kapitolách tohoto článku.

3. Potřebná mechanická energie mikrogenerátoru

Vibrační mikrogenerátor je zařízení, které převádí mechanickou energii čerpanou z okolních vibrací na elektrickou energii. Jestliže požadujeme, aby výkon mikrogenerátoru byl kolem $P_{el} = 1$ mW a předpokládáme účinnost mikrogenerátoru při výrobě elektrické energie přibližně 30%, musíme stanovit minimální kinetickou energii E_k kmitající hmoty m ve vibračním mikrogenerátoru. Vybuzená kmitající hmota ve vibračním mikrogenerátoru bude mít poté dostatečnou energii potřebnou k výrobě elektrické energie požadovaného výkonu.

Pro elektrický výkon s účinností přeměny energie kolem 30% je zapotřebí mechanický výkon $P_{mech} = \frac{100}{30} \cdot P_{el}$ a při frekvenci kmitání hmoty kolem $f = 40$ Hz musí mít tedy kmitající hmota střední hodnotu kinetické energie za půlperiodu

$$E_{Kav} = P_{mech} \cdot \frac{1}{2 \cdot f} = 3,3 \cdot 0,001 \cdot \frac{1}{2 \cdot 40} = 41,7 \cdot 10^{-6} \quad [\text{J}; \text{W}; \text{Hz}], \quad (1)$$

Předpokládáme sinusový kmitavý pohyb hmoty mikrogenerátoru, a proto okamžitá hodnota kinetické energie kmitající hmoty je určena vztahem

$$e_K = E_{Kav} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t) = 59 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t). \quad [\text{J}] \quad (2)$$

Při tomto vybuzeném pohybu budeme uvažovat maximální amplitudu pohybu kmitající hmoty $a = 0,5$ mm. Při dané frekvenci f této amplitudě odpovídá maximální amplituda rychlosti $v = a \cdot 2\pi \cdot f$. Pro již určenou potřebnou kinetickou energii kmitající hmoty určíme její minimální hmotnost m , nutnou pro správnou funkci vibračního mikrogenerátoru jako

$$m = \frac{2 \cdot E_K}{v^2} = \frac{2 \cdot 59 \cdot 10^{-6}}{v^2} \doteq 8 \cdot 10^{-3}. \quad [\text{kg}; \text{J}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

Pokud je mechanismus vibračního mikrogenerátoru svými parametry naladěn na jiné hodnoty budících vibrací, je nutné určit pro tyto parametry mikrogenerátoru potřebnou hmotu kmitajícího členu mikrogenerátoru tak, aby bylo generováno dostatečné množství elektrické energie.

4. Tlumení kmitavého pohybu mikrogenerátoru

Maximální výchylka vybuzeného kmitání je určena naladěním mikrogenerátoru, blízkostí rezonančního stavu, a je ovlivněna celkovým tlumením mikrogenerátoru b . Jedná hlavně o tlumení třením b_T jednotlivých částí v mechanismu, dále o tlumení vyvolané generovaným proudem b_G a materiálovým tlumením b_M , pokud je jako tuhost použita např. šroubovitá pružina. Celkové tlumení vibračního mikrogenerátoru $b = b_T + b_G + b_M$ ovlivňuje nejvíce amplitudu kmitání mechanismu mikrogenerátoru. Hodnoty tlumení jak materiálového b_M pružiny, tak tlumení třením b_T zjistíme experimentálně. Tlumení b_G (5) vzniklé generováním výstupního proudu můžeme vyjádřit z generovaného elektrického výkonu P , - viz (4), který závisí na relativní rychlosti pohybu \dot{x} kmitající hmoty magnetického obvodu vůči cívce a dále taky na hodnotě indukčního magnetického toku.

$$P = b_G \cdot \dot{x}^2 \quad (4)$$

$$b_G = \frac{P}{\dot{x}^2} \quad [\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}; \text{W}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

Tuto část tlumení kmitání mechanismu principiálně nelze ovlivnit, přitom však podstatně ovlivňuje hodnotu amplitudy vybuzeného pohybu kmitající hmoty m . Proto parametry mechanismu mikrogenerátoru musí být optimálně naladěny. Nežádoucí je tlumení třením, které se snažíme eliminovat použitím vhodných materiálů stykových ploch v mechanismu. Jako vhodný materiál stykových ploch vzájemně se pohybujících součástí mechanismu se ukázal teflon se svým nízkým součinitelem tření $f = 0,04$ vůči oceli. Pokud je jako pružný člen v mechanismu mikrogenerátoru použita pružina, tak materiálové tlumení pružiny je ovlivněno charakterem její konstrukce.

Celková hodnota tlumení v mechanismu ovlivňuje amplitudu vybuzeného kmitavého pohybu v mechanismu mikrogenerátoru. Při vysoké hodnotě celkového tlumení dochází k utlumení kmitavého pohybu v mechanismu mikrogenerátoru i v okolí rezonanční frekvence. U takového utlumeného mechanismu je nutné zvyšovat amplitudu budících vibrací, aby nastal vybuzený kmitavý pohyb v mechanismu mikrogenerátoru. Proto pro již danou známou amplitudu budících vibrací se musí vhodně zvolit koncepce a navrhnout konstrukce mikrogenerátoru tak, aby tento mechanismus byl schopen i při této úrovni budících vibrací vyrábět elektrickou energii požadovaného výkonu.

5. Mikrogenerátorem generované elektrické napětí

Výstupní napětí mikrogenerátoru se generuje v pevné cívce, umístěné uvnitř pohyblivého magnetického obvodu. Vnější část magnetického obvodu je tvořena bubnem, k jehož víku je připevněna vnitřní část magnetického obvodu (permanentní magnet a jádro). Cívka je připevněna pevně k rámu mikrogenerátoru a buben je součástí mechanismu mikrogenerátoru a vykonává vybuzený kmitavý pohyb vůči cívce. Tímto pohybem se podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce (6) indukuje v závitech cívky výstupní napětí u_i , tedy

$$u_i = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r}. \quad (6)$$

Napětí se indukuje díky rychlosti pohybu v bubnu s permanentním magnetem vůči cívce. Pohybem bubnu s magnetem skrze cívku se v závitech indukuje výstupní napětí u_i . Pohyb bubnu je dán vybuzeným pohybem mechanismu, jehož buben s magnetem je částí jako další hmota m_i a generovaná elektrická energie představuje složku tlumení mechanismu b_G . Amplituda indukovaného napětí U_m na cívce je pro ortogonálně orientované veličiny v rovnici (6) dána zjednodušeným vztahem:

$$U_m = \pi d \cdot v \cdot B_x \cdot N \quad [V; m; ms^{-1}; T; -], \quad (7)$$

a závisí tedy na průměru cívky d a počtu závitů cívky N . Dále pak závisí na rychlosti pohybu v bubnu s permanentním magnetem vůči cívce a na magnetické indukci B_x ve vzduchové mezeře, kde je umístěno vinutí cívky. Permanentní magnety spolu s bubnem s magnetického materiálu jsou konstrukčně uspořádány tak, aby bylo dosaženo co největší hodnoty magnetické indukce B_x ve vzduchové mezeře bubnu, tedy v prostoru umístění cívky.

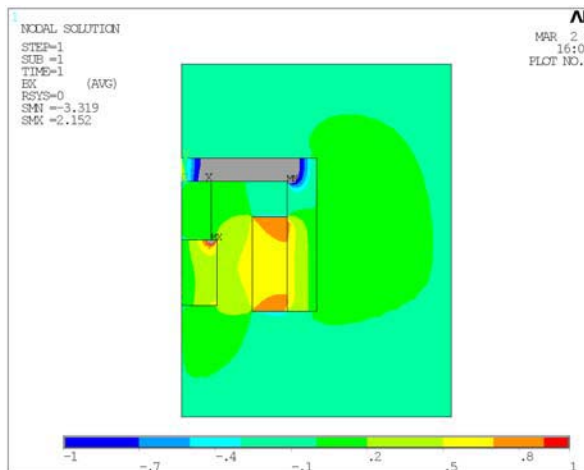
Kromě konstrukčního uspořádání je pro dosažení co největší hodnoty B_x rozhodující volba materiálu permanentního magnetu. Volíme proto magnety na bázi vzácných zemin, konkrétně FeNdB. Tyto magnety patří mezi nejkvalitnější magnety na trhu, ale oproti magnetům na bázi Sm-Co mají nevýhodu v nízké teplotě Curieova bodu (od 80 do 200 °C), což záleží na dodržení optimálního poměru jednotlivých prvků v materiálu magnetu. Tento fakt omezuje použití zařízení při vyšších teplotách.

6. Konstrukce magnetického obvodu a kotvy mikrogenerátoru

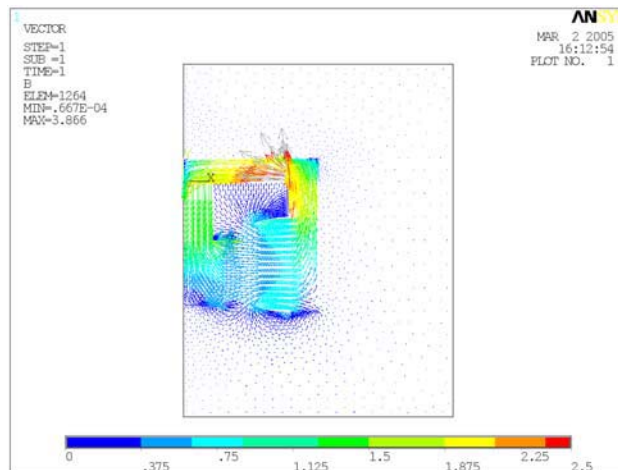
Vytvoření magnetického obvodu a kotvy mikrogenerátoru s konstrukcí vhodnou pro stanovené podmínky je jedním z nejdůležitějších úkolů při konstrukci mikrogenerátoru.

Prostorové uspořádání bubnu s permanentními magnety ze vzácných zemin (magnetický obvod mikrogenerátoru) je navrženo tak, aby byl vytvořen dostatečný prostor pro umístění cívky, a v tomto prostoru byla co největší hodnota magnetické indukce B_x . Pro varianty konstrukčního uspořádání byly vytvořeny simulační modely a metodou konečných prvků v prostředí ANSYS byla vypočítána hodnota magnetické indukce B_x . Z hlediska rotační symetrie bubnu se modeluje buben jako 2D osově symetrická úloha. V navrženém konstrukčním uspořádání magnetického obvodu je pomocí bubnu a permanentního magnetu nebo sady permanentních magnetů ze vzácných zemin distribuováno magnetické pole do vzduchové mezery, kde je umístěna cívka mikrogenerátoru.

Mezi nejvýhodnější se jeví konstrukce, kdy je válcový permanentní magnet vložen uvnitř bubnu a na vnitřním plášti bubnu jsou magnetické segmenty. Tato konstrukce vytváří v dostatečně velké vzduchové mezeře (tedy v místě umístění cívky) poměrně vysokou hodnotu magnetické indukce. Rozložení a směr vektorů indukce jsou uvedeny na podle obr. 1 a 2.



Obr. 1 Rozložení B_x v bubnu



Obr. 2 Rozložení \vec{B} v bubnu

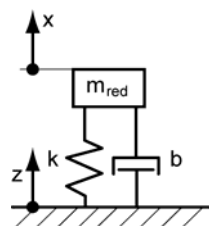
Z hlediska návrhu vhodné konstrukce mechanismu mikrogenerátoru je důležité znát konstrukci magnetického obvodu - bubnu, který je jednou ze součástí kmitajícího mechanismu a tvoří část hmoty tohoto mechanismu. Právě na tuto hmotnost m ladíme parametry mechanismu. Dále se u této konstrukce zvolí vhodné umístění bubnu v mechanismu mikrogenerátoru tak, aby amplituda kmitání bubnu oproti cívce byla co největší, čili aby generované napětí na cívce bylo co největší.

Konstrukci bubnu můžeme vyřešit i tak, že buben bude dutý, celý vibrační mechanismus mikrogenerátoru bude uvnitř a cívka bude umístěna okolo mechanismu uvnitř pláště bubnu.

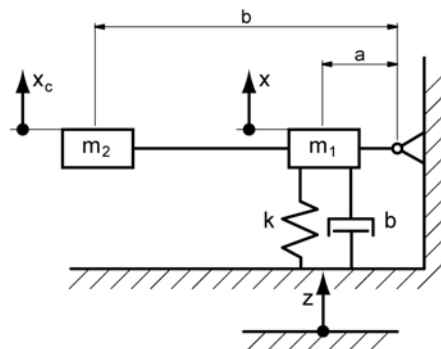
7. Koncepce mechanismu mikrogenerátoru

Koncepce mechanismu mikrogenerátoru je založena na kmitající hmotě m , která je upevněna vzhledem k rámu mikrogenerátoru pružným členem o dané tuhosti k . Rám mikrogenerátoru je buzen okolními vibracemi a k němu pružným členem mechanismu s tuhostí k připevňuje kmitající hmota m vykonává relativní pohyb vůči rámu. Tato hmota tedy představuje pohybující část magnetického obvodu, buben, a díky jejímu kmitání relativně k cívce umístěné na rámu mikrogenerátoru se generuje výstupní napětí v cívce. Pohyb mechanismu v mikrogenerátoru je tlumen celkovým tlumením b .

U nejjednodušší koncepce konstrukce mikrogenerátoru je pružným členem mechanismu válcová šroubovitá pružina s tuhostí k , na kterou je připevněna kmitající hmota m_{red} . Tato tuhost je lineární a schéma tohoto mechanismu mikrogenerátoru je uvedeno na obr. 3. Zde je hmotnost m uvedena jako m_{red} , která obecně pomocí metody redukce nahrazuje i složitější skutečnou soustavu podle obr.6 s hmotnostmi m_i soustavou jednodušší s hmotností m_{red} . Tato soustava má všechny dynamické vlastnosti shodné se soustavou původní a je popsána pohybovou rovnicí (6).



Obr. 3 Zjednodušené schéma mikrogenerátoru



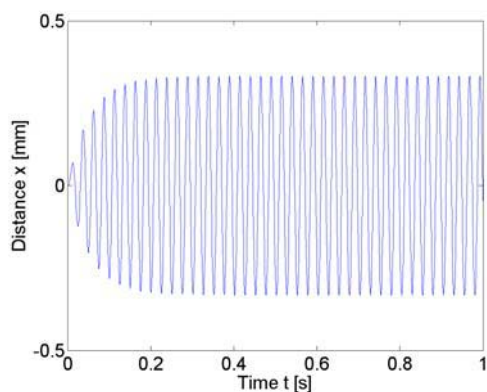
Obr. 4 Zjednodušené schéma mikrogenerátoru s pákou, sloužící ke zvětšení amplitudy pohybu

Obr. 4 znázorňuje schéma koncepce mikrogenerátoru s pákou, která slouží pro zvětšení amplitudy kmitání hmoty m_2 oproti amplitudě kmitání m_{red} , která je představována na obr. 3. Toto konstrukční řešení má výhodu v tom, že i při malé amplitudě budících kmitů, čili i malé vybuzené amplitudě x kmitající hmoty m , je amplituda kmitajícího pohybu x_c na konci páky b/a násobně větší. Nevýhodou je zde přidání většího tlumení způsobeného přidáním další třecí vazby v ose natáčení páky. Pohybová rovnice nyní bude mít tvar

$$m_{red}(\ddot{x} + \ddot{z}) + b\dot{x} + kx = 0, \quad (6)$$

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \Omega^2 x = h \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t.$$

Rám mikrogenerátoru je (jak je vidět na zjednodušeném schématu) buzen okolní vibrací $z = h \cdot \sin(\omega \cdot t)$ a sledujeme relativní výchylku x kmitající hmoty m_{red} vzhledem k rámu mikrogenerátoru, na kterém je připevněna cívka a ve které se indukují výstupní napětí.

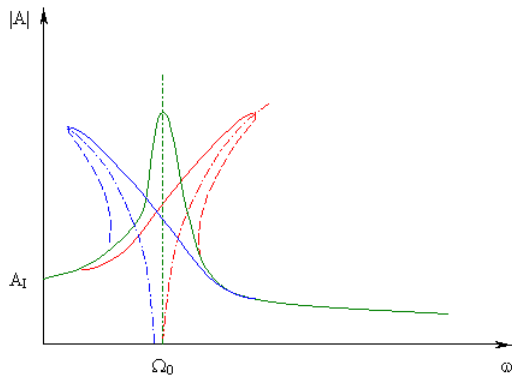


Obr. 5 Výchylka x kmitající hmoty m při naladění na rezonanční frekvenci

Chování tohoto zjednodušeného mechanismu systému, popsaného pohybovou rovnicí (6) s redukovanou hmotností, můžeme simulovat např. v prostředí *Matlab*. Tento systém je naladěn na rezonanční frekvenci 40 Hz a buzen vibrací se stejnou frekvencí a amplitudou budících vibrací $h = 0,05$ [mm]. Výsledná výchylka x kmitající hmoty m závisí hlavně na celkovém tlumení b mechanismu. Pokud předpokládáme při simulaci celkové tlumení mechanismu mikrogenerátoru $b = 0,3$ [N·s·m⁻¹], pak průběh vybuzeného kmitání hmoty m v rezonanční frekvenci je zobrazen na obr. 5.

Jak je vidět z obr. 5, je amplituda relativního pohybu kmitající hmoty m_{red} při rezonanční frekvenci a při tak malé hodnotě amplitudy budící vibrace h poměrně malá. Další nevýhodou této koncepce konstrukce mikrogenerátoru je již velký útlum kmitání x při frekvenci budících vibrací 1 Hz pod a nad vlastní frekvence mechanismu mikrogenerátoru. Tato koncepce konstrukce mikrogenerátoru je tedy vhodná pouze pro využití při téměř konstantní frekvenci budících vibrací a je nutno naladit parametry mechanismu mikrogenerátoru na tuto frekvenci a amplitudu vibrací.

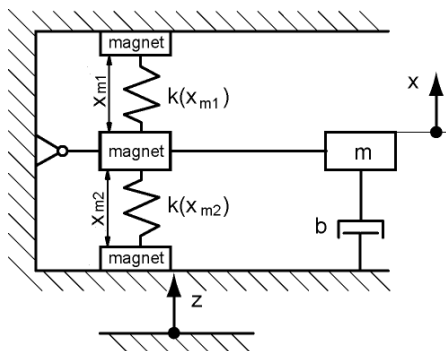
Z tohoto hlediska se jeví jako výhodnější použít nelineární tuhostní charakteristiku $k(x)$. Můžeme zde využít naklonění a stočení skeletové křivky v amplitudo-frekvenčním diagramu – viz obr. 6, která u použité nelineární tuhosti rozšíří frekvenční oblast, při které nastává poměrně velká amplituda pohybu x_c kmitající hmoty, a která je již využitelná ke generování napětí na cívce mikrogenerátoru.



Obr. 6 Amplitudo-frekvenční diagram; měkká - lineární - tvrdá charakteristika

Nejdůležitější částí návrhu konstrukce vibračního mikrogenerátoru je tedy analýza budících okolních vibrací, při kterých bude mikrogenerátor pracovat, na tyto podmínky se navrhne vhodné konstrukční řešení a naladí se optimální parametry mechanismu pro dané podmínky buzení. Charakteristická je tedy střední hodnota frekvence vibrací a amplituda vibrací. U nelineárních mechanismů záleží i na rychlosti změny frekvence vibrací a také na tom, jak často frekvence vibrací překračuje svoji střední hodnotu a dále na tom, jestli se rychleji zvyšuje nebo snižuje frekvence vibrací přes tuto hodnotu, na kterou je mechanismus

naladěn. Podle toho se použije v mechanismu mikrogenerátoru tuhost s měknoucí nebo tvrdnoucí charakteristikou.



Obr. 7 Schéma mechanismu se sadou odpuzujících se magnetů

Jako nelineární tuhost můžeme využít např. kuželové šroubovitě válcové pružiny a nebo sady navzájem se odpuzujících magnetů. Jak je zobrazeno na obr. 7, jeden magnet je umístěn pohyblivě, např. na páce, a další dva magnety, které budou pohyblivý magnet odpuzovat silou nelineárně úměrnou jejich vzdálenosti, budou připevněny na rámu mikrogenerátoru. Tyto odpuzující síly vytváří celkovou nelineární tuhost $k(x)$ v mechanismu. Podstatná výhoda tohoto konstrukčního řešení je, že zde odpadá materiálové tlumení tuhosti např. pružiny.

U odpuzujících se magnetů můžeme při vhodné koncepci konstrukce mikrogenerátoru (bez použití páky) výhodně využít magnetický tok odpuzujících se magnetů pro generování výstupního napětí na cívce. Toto by bylo výhodné pro konstrukční řešení dutého bubnu elektromagnetického obvodu, kdy celý mechanismus mikrogenerátoru bude uvnitř bubnu.

8. Simulační výpočty modelů mikrogenerátoru

Návrh konstrukce vibračního mikrogenerátoru se vytváří v prostředí *ProEngineer*. Toto prostředí je výhodné, protože lze jednoduše vytvořenou konstrukci modelu převést do modulu *ProMechanica Motion*, v kterém se provádějí simulační výpočty chování celého mechanismu jako dynamické soustavy tuhých těles. V prostředí *ProMechanica Motion* se simulují odezvy chování mechanismu na buzení vibracemi. Je možné zde i optimalizovat jednotlivé rozměry mechanismu tak, aby cílové chování soustavy bylo optimální vzhledem k jeho funkci.

Jednotlivé části mechanismu jsou tedy vytvořeny v modeláři *ProEngineer* a v prostředí *ProMechanica Motion* jsou modelovány vazby mezi jednotlivými částmi mechanismu, silové působení v mechanismu a celkové tlumení mechanismu mikrogenerátoru.

9. Závěr

Vibrační generátor je zařízení, které je vhodné použít jako nezávislý zdroj elektrické energie pro napájení pasivních senzorických soustav v místě snímání bez nutnosti přivádět elektrickou energii z vnějšího zdroje. Konstrukce vibračního mikrogenerátoru musí být vhodně naladěna na charakter vibrací, které se vyskytují u dané technické soustavy.

Co se týká porovnání a zhodnocení jednotlivých koncepcí konstrukce mechanismu mikrogenerátoru, jeví se jako velmi vhodné použití nelineární tuhosti sady odpuzujících se magnetů. Tyto magnety tvoří nelineární pružný člen bez vnitřního materiálového tlumení (na rozdíl od mechanické pružiny). Nevýhoda je v umístění pohyblivého magnetu do mechanismu do vedení nebo na natáčející páku, neboť zde vzniká další tlumení třením. Výhodná může být varianta s kombinací sady magnetů a pružiny, kde pružina bude tvořit část tuhosti mechanismu a zároveň bude nést pohyblivý magnet, který vytváří nelineární tuhost v mechanismu. Tato uvažovaná koncepce zatím ještě není simulačně ověřena.

Je tedy nutné správně vybrat koncepci konstrukčního řešení vibračního mikrogenerátoru pro daný charakter budících vibrací. Vhodným naladěním mechanismu mikrogenerátoru tedy dostaneme nevyčerpatelný zdroj energie pro potřebnou aplikaci za předpokladu, že bude soustava pracovat ve svém běžném režimu a vykazovat vibrace, na které je mikrogenerátor naladěn.

V současné době probíhá testování prototypu vibračního mikrogenerátoru a hledání nejvhodnějších konstrukčních materiálů pro jednotlivé konstrukční varianty vibračního mikrogenerátoru tak, aby tření při kmitání výrazně netlumilo kmitání mechanismu. Další práce budou zaměřeny na optimalizační výpočty s cílem zefektivnění funkce mikrogenerátoru a minimalizace jeho rozměrů při zachování jeho elektrického výkonu.

10. Poděkování

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

11. Literatura

- Hadaš, Z., Singule, V. (2004) Studie realizovatelnosti vibračního mikrogenerátoru. *7th International Symposium Mechatronika 2004*, Račková Dolina, pp. 26-31.
- Hadaš, Z., Singule, V. (2004) Design of a Vibration Microgenerator. *2nd International PhD Conference on Mechanical Engineering - PhD 2004*, Srní, pp. 31-32.
- Hadaš, Z., Singule, V. (2004) The Design of a Vibration Microgenerator. *Low Voltage Electrical Machines 2004*, Brno, pp. 33-38.