



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA VÝKONU ENERGY HARVESTERU PŘI BUZENÍ
VIBRACEMI REÁLNÉHO SYSTÉMU**

PERFORMANCE ANALYSIS OF ENERGY HARVESTER EXCITED WITH VIBRATIONS OF A REAL SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Hons

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Smilek

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Richard Hons**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Jan Smilek**
Akademický rok: 2015/16

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

Analýza výkonu energy harvesteru při buzení vibracemi reálného systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Většina současných kinetických energy harvesterů je konstruována tak, že rezonanční frekvence jejich mechanického členu je shodná s hlavní frekvencí budících vibrací. Některé perspektivní aplikace ovšem mohou poskytovat více využitelných frekvencí, popřípadě nemusí být možné z konstrukčních důvodů harvester naladit na dominantní frekvenci systému. V takovém případě je třeba upravit parametry harvesteru pro dosažení optimálního výkonu. Navíc je třeba brát v potaz, že funkce harvesteru ovlivňuje samotnou budící soustavu a harvester tak při nevhodném návrhu funguje jako tlumič vibrací.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte rešeršní studii konstrukcí a principů kinetických energy harvesterů.
2. Navrhněte a zpracujte algoritmus pro odhad výstupního výkonu energy harvesteru při znalosti frekvenčního spektra vstupních vibrací, implementujte úpravu parametrů modelu harvesteru pro optimalizaci výstupního výkonu.
3. Verifikujte navržené algoritmy na reálných datech, analyzujte jejich přesnost a vhodnost k dalšímu využití.
4. Analyzujte ovlivnění budící soustavy oscilující hmotou harvesteru a posuďte vhodnost využití kinetických energy harvesterů pro různé aplikace.

Seznam literatury:

Priya, S., Inman, DJ: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009.

Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

Slavík, J., Kratochvíl C.: Dynamika, 2005

Harb, A.: Energy harvesting: State-of-the-art, Renew. Energy, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654, Oct. 2011.

Khaligh, A.: Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 3, pp. 850–860, Mar. 2010.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi nastavení vibračního generátoru. Je provedena analýza generátoru jako lineárního systému a v programu Matlab určen výkon generátoru v závislosti na jeho vlastní frekvenci, což je ověřeno i na reálných datech. V práci je také zkoumán vliv generátoru na budící soustavu.

ABSTRACT

This thesis deals with the problematic of vibration generator settings. It includes analysis of generator as linear system and the performance of generator as function of its own frequency is calculated in the Matlab software, this is also verified on the real data sample. The influence of the generator on the basics body is tested.

KLÍČOVÁ SLOVA

Matlab, Simulink, lineární systém, energy harvesting, vibrační generátor

KEYWORDS

Matlab, Simulink, linear system, energy harvesting, vibration generator

Bibliografická citace

HONS, R. *Analýza výkonu energy harvesteru při buzení vibracemi reálného systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Smilek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2016

.....

Richard Hons

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Smilkovi za vstřícný přístup a neocenitelné rady v průběhu tvorby této práce.

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 CÍL PRÁCE A METODY ŘEŠENÍ	10
3 REŠERŠNÍ STUDIE	11
3.1 Kinetické energy harvestery	11
3.1.1 Elektromagnetické generátory	12
3.1.2 Elektrostatické generátory	13
3.1.3 Piezoelektrické generátory	14
3.1.4 Magnetostrikční generátor	15
3.2 Existující řešení kinetických energy harvesterů	16
4 ANALÝZA GENERÁTORU A NÁVRH ŘEŠENÍ	18
4.1 Analýza vibračního generátoru	18
4.2 Algoritmy pro výpočet výkonu generátoru jako lineárního systému	20
5 OVĚŘENÍ ALGORITMŮ NA REÁLNÝCH DATECH	25
5.1 Omezení parametrů	26
6 OVLIVNĚNÍ BUDÍCÍ SOUSTAVY OSCILUJÍCÍ HMOTOU HARVESTERU	28
6.1 Zhodnocení výsledků	30
7 ZÁVĚR	32
8 REFERENCE	33
9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	35
10 SEZNAM PŘÍLOH	36

1 ÚVOD

Energy harvesting je souhrnné označení pro výrobu energie z jevů dostupných v prostředí, kde je generátor umístěn, přičemž tyto jevy nejsou primárně určeny pro jeho napájení. Energy harvesting tak umožňuje výrobu elektrické energie z dějů, jako jsou například vibrace, rotace nebo změny teplot. Přesný český ekvivalent tohoto termínu neexistuje, energy harvesting lze však volně přeložit jako získávání energie, dalšími anglickými ekvivalenty jsou pojmy energy scavenging a power harvesting.

V soudobém chápání sousloví energy harvesting nebereme jako jakékoli využití energie z okolních zdrojů prostředí, ačkoli fotovoltaické nebo větrné elektrárny, jaké známe z krajiny, v podstatě využívají jeho princip – mění energii dostupnou z prostředí, respektive dějů, které nelze ovlivnit ani vyčerpat přeměnami energie. Podle [1] jsou tyto poměrně velké přeměny energie označovány jako macro energy harvesting, ovšem do klasifikace energy harvesterů je nezahrnujeme, hlavně proto, že většinou dodávají elektrickou energii do sítě/vedení a cílové zařízení je napájeno přívodem, zatímco moderní pojetí zahrnuje harvester a napájené zařízení jako nezávislou soustavu.

Uplatnění energy harvesting najde především v bezdrátových zařízeních a čidlech, u kterých je autonomní napájení výhodné, neboť není limitováno omezenou životností jako baterie. Zajímavou aplikací energy harvesting je také využití energie lidského těla, ať už pro napájení lékařských zařízení nebo drobné elektroniky.

2 CÍL PRÁCE A METODY ŘEŠENÍ

Hlavním cílem této práce je navržení a otestování postupu pro výpočet výkonu vibračního generátoru v závislosti na vlastní frekvenci mechanického členu. A to konkrétně při uvažování vibračního generátoru jako lineárního systému. Subcílem je pak ověřit, zda generátor dosahuje optimálního výkonu při nastavení na hlavní frekvenci buzení a jak je výstupní výkon ovlivněn konstrukčními limity jeho parametrů.

Bude vypracována studie konstrukčních principů energy harvesterů. Dále bude provedena analýza a odvození rovnic pro popis generátoru, tyto rovnice poslouží jako předloha pro sestavení skriptů v programu Matlab. Výsledky analytického řešení vycházející z odvozených rovnic budou porovnány s výstupy numerického modelu v prostředí Simulink. Výsledné skripty budou testovány jak na teoretických, tak na reálných datech a bude zkoumán i vzájemný vliv mezi generátorem a budící soustavou.

3 REŠERŠNÍ STUDIE

Zajištění energie pomocí energy harvestingu je vhodné použít tam, kde by konvenční řešení napájení, např. vodiči, bylo zbytečně neefektivní nebo nemožné. Energy harvester umožňuje napájení cílové zařízení absolutně nezávisle na externím napájení, výhodou je pak v podstatě neomezený přísun energie. Menší nevýhodu představuje množství získané energie, většinou lze pomocí energy harvestingu napájet pouze nízkopříkonové aplikace. Napájení pomocí takovýchto generátorů je ideálním řešením například pro sensory nebo další aplikace nenáročné na dodávaný příkon, např. MEMS zařízení.

Energy harvesting zařízení můžeme rozdělit podle toho, z kterého jevu/stavu okolí získávají energii [4]:

- SLUNEČNÍ ENERGIE
- TEPLOTNÍ GRADIENT
- ZMĚNY TLAKU V PROSTŘEDÍ
- PROUDĚNÍ TEKUTINY
- MECHANICKÁ ENERGIE

V této kapitole jsou popsány základní fyzikální jevy a principy, vysvětlující fungování kinetických energy harvesterů, tedy generátorů využívajících mechanické pohybové energie.

3.1 Kinetické energy harvestery

Jak už název napovídá, pod názvem kinetický energy harvester rozumíme generátor, využívající k chodu a produkci energie energii kinetickou/mechanickou. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších druhů využívání energy harvestingu, s kterým se můžeme setkat i v běžném životě, třeba při kempování ve formě rozličných přenosných rádií a svítilen napájených vibracemi či točením kličkou. Může se zdát, že kinetický energy harvesting je pouze převod mechanické energie na elektrickou, ačkoli tomu tak nemusí nutně být. V roce 1924 podal John Harwood patent na automatické hodinky se samonatahovacím mechanismem, kdy nátaž probíhá převodem pohybů ruky přes pohyb vahadla, mechanická energie pohybu se ukládá jako potenciální energie pružiny[17].

Kinetické energy harvestery lze rozdělit do čtyř základních skupin podle toho, jakým způsobem přeměňují mechanickou energii vstupující do generátoru na energii elektrickou.

Kinetické energy harvestery lze podle způsobu přeměny energie dělit na:

- Elektromagnetické
- Elektrostatické
- Piezoelektrické
- Magnetostrikční

3.1.1 Elektromagnetické generátory

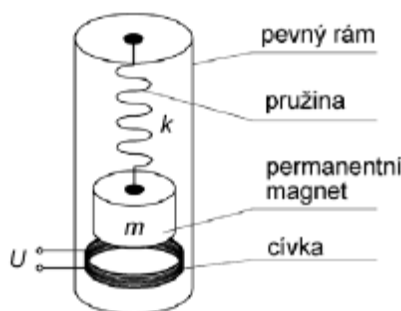
Základní myšlenkou elektromagnetických generátorů je využití zákona elektromagnetické indukce, kdy pohybující se část generátoru mění magnetické pole a v integrované cívkce je indukováno napětí. Pohybující se část zajišťující změnu magnetického pole v indukční cívkce bývá tvořena permanentním magnetem. Je možné využít i konstrukci obrácenou, kdy je pohybující se částí indukční cívkka a elektromagnet se nehýbe, ovšem toto řešení je náročnější na provedení, neboť je třeba zajistit připojení cívkky na výstupní vodiče.

Elektromagnetické generátory lze rozdělit do tří kategorií [2], podle typu vstupní kinetické energie:

- Rezonantní
- Rotační
- Hybridní

Rezonantní

Základem konstrukce rezonančního generátoru je obvykle magnetické zařízení, např. permanentní magnet, umístěné na pružině. Zátěž s pružinou bývá umístěna ve vhodně konstruovaném plášti, který obsahuje cívkky, v nichž při zatížení cyklickou silou (vibracemi) změna magnetického pole iniciovaná pohybem hmoty na pružině indukuje napětí. Jedná se o jednoduchý a při uvažování lineárního chování i poměrně snadno popsatelný typ generátoru.



Obr. 3.1 Základní schéma generátoru buzeného vibracemi. Převzato z [4]

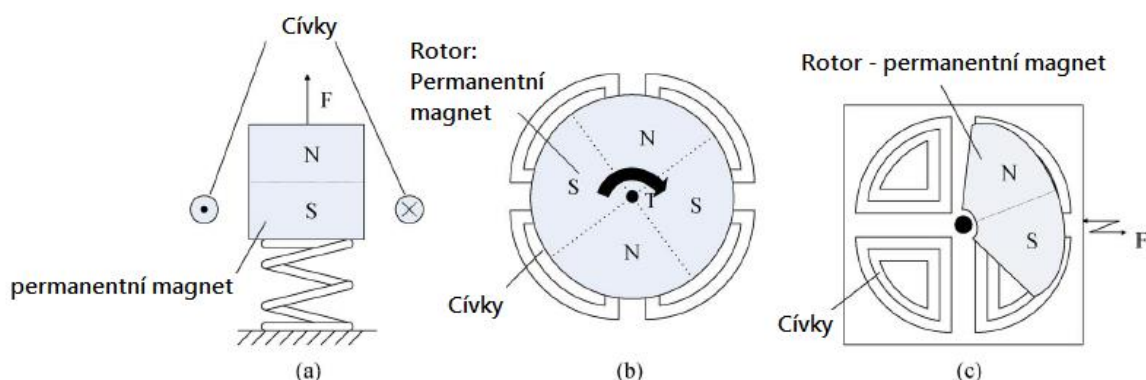
Rotační

Pro převod mechanické energie rotačního pohybu jsou konstruovány rotační generátory. Zdrojem mechanické energie bývá nejčastěji točící se hřídel. Energie přenášená na hřídel může pocházet například z otáčejících se os strojů. Tento typ generátorů může pracovat i při relativně vyšších rychlostech otáčení a dosahovat tak vyšších elektrických frekvencí oproti řešení rezonančnímu.

Hybridní

Hybridní generátory představují sloučení principů rotačního a rezonančního systému do jedné soustavy. Hybridní generátory svoje pojmenování získaly proto, že převádí

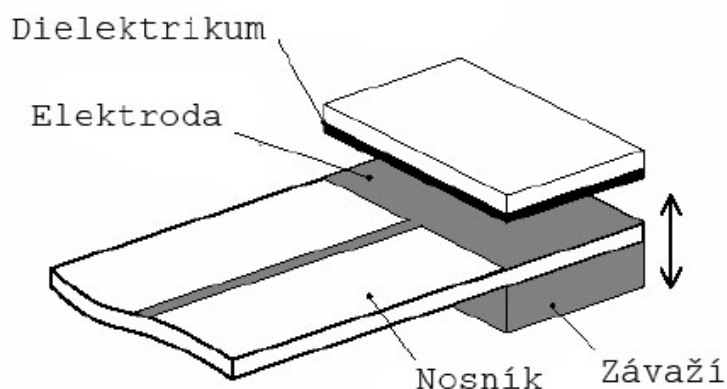
na elektrickou energii vibrace jako rezonanční generátory, ovšem děje se tak pomocí nevyváženého rotoru, který vibrace převede na rotační pohyb [2]. Velkou výhodou tohoto typu generátoru představuje větší šíře frekvenčního spektra zachycených využitelných vibrací oproti řešení rezonančnímu.



Obr. 3.2 Tři typy generátorů vybavené permanentními magnety: (a) Rezonanční generátor zatížený vibrační silou. (b) Rotační generátor zatížený krouticím momentem (c) Hybridní generátor s převodem lineárního pohybu na pohyb rotační, zatížen vibracemi. [2]

3.1.2 Elektrostatické generátory

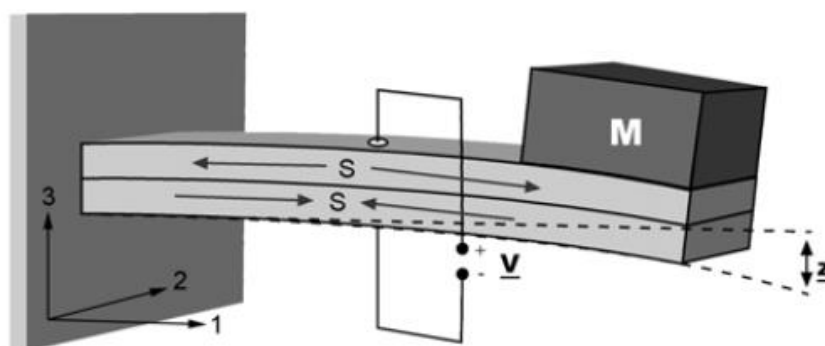
Fyzikální podstatu elektrostatického generátoru lze nalézt v principu elektrostatické indukce. Jev elektrostatické indukce popisujeme jako situaci, kdy se na povrchu jednoho tělesa indukuje elektrický náboj přiblížením dalšího, elektricky nabitého tělesa. Nejznámější aplikací jsou kondenzátory, ale jevu elektrostatické indukce může být s úspěchem využíváno i u mikrogenerátorů. Elektrostatický generátor se zpravidla skládá ze dvou elektrod oddělených dielektrikem, které může být představováno vzduchem, vakuem nebo izolantem [8]. Elektrickou energii pak vytváří vzájemný relativní pohyb elektrod vyvolaný vnějšími vibracemi. Konkrétní konstrukce může být založena na návrhu generátoru s konstantním nábojem nebo konstantním napětím [9]. Problematickým prvkem tohoto typu generátoru je nutnost využít zdroj počátečního napětí, nutný pro prvotní rozběh přeměny energie. Pokud se podaří dobrý konstrukční návrh, pak je takovýto elektrostatický generátor výhodné umístit zejména do MEMS zařízení.



Obr. 3.3 Schématický náčrt elektrostatického generátoru, převzato z [9].

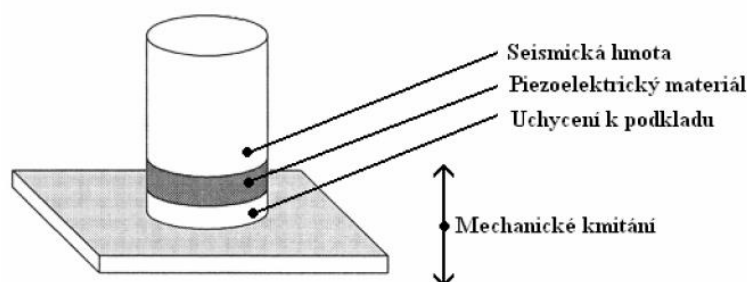
3.1.3 Piezoelektrické generátory

Funkčnost piezoelektrických generátorů umožňuje takzvaný piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev je vlastnost látek (krystalů) generovat elektrické napětí při deformaci. Byl poprvé pozorován Pierrem a Jacquesem Currieovými na krystalech turmalínu v roce 1880. V článku [5] jsou zmíněny dva typy piezoelektrických materiálů, a to piezokeramika a piezopolymery. Piezopolymery jsou flexibilní, ovšem na křehkou piezokeramiku ztrácí při porovnání efektivnosti přeměny energie. Piezoelektrických vlastností materiálu lze využívat i v generátorech. Jeden z principů funkce piezoelektrického generátoru je znázorněn na obr. 3.4, kdy je závaží (zde těleso hmotnosti m) upevněno na nosníku s dvěma piezoelektrickými vrstvami. Kmitání závaží, jehož je docíleno buzením vibracemi, deformuje nosník, přičemž jedna z vrstev je deformována tlakem a druhá tahem, podle výchylky. Deformace v piezoelektrických vrstvách generují elektrickou energii.



Obr. 3.4 Schéma vibračního piezoelektrického generátoru. Znázorněno napětí S v piezoelektrických vrstvách; M hmotnost závaží; V napětí; z vertikální výchylka. Převzato z [6]

Další možnou konstrukcí piezoelektrického generátoru je využití setrvačnosti tělesa nad piezoelektrickou vrstvou, kdy k deformování piezoelektrické vrstvy dochází vlivem vibrací působících na soustavu a při následném pohybu seismického tělesa z , resp. do piezoelektrického materiálu, znázorněno na obr. 3.5.

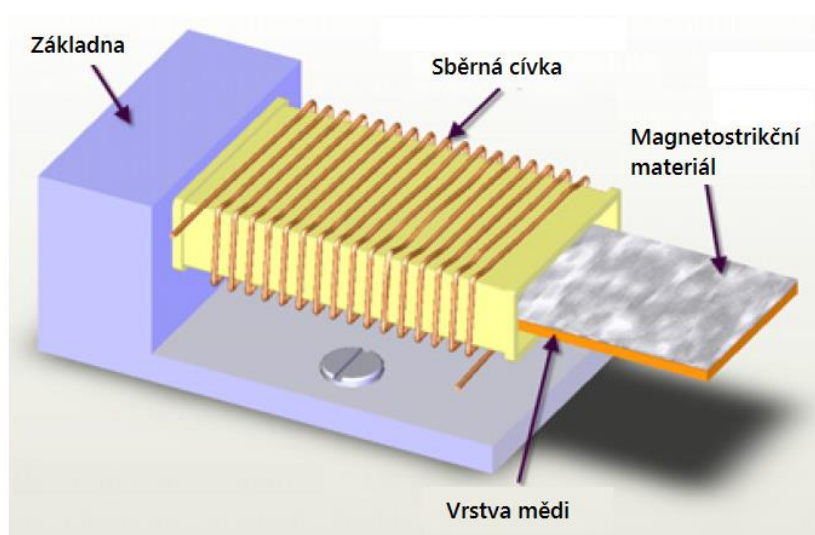


Obr. 3.5 Využití setrvačnosti tělesa pro piezoelektrický generátor. Převzato z [7]

3.1.4 Magnetostrikční generátor

Magnetostrikce je vlastnost některých feromagnetických materiálů, které při změně rozměrů změni svoje magnetické pole. Tento jev objevil James Joule v roce 1842. Magnetostrikce nalézá praktické uplatnění zejména u sensorů, kde se využijí možnosti detekce změn magnetického pole v závislosti na deformaci čidla z magnetostrikčního materiálu.

V případě generátoru lze využít situace, kdy deformací magnetostrikčního materiálu dochází ke změně magnetického pole a tato změna pak indukuje v cívce napětí. Je zřejmé, že principem tento postup odpovídá elektromagnetickým generátorům, s tím rozdílem, že cívku budí změna magnetického pole od deformace materiálu a nikoli pohyb magnetického členu. Jedna z možných konstrukcí zahrnuje několik tenkých vrstev magnetostrikčního materiálu (Metglas2605SC) laminovaných v měděném proužku a sběrnou cívkou okolo, přičemž vše je připevněno na základně [3], viz obr. 3.6. Vibrační zatížení pásky s mědi a magnetostrikčním materiálem způsobuje cyklickou deformaci pásky, při které dochází vlivem magnetostrikčního jevu k změně magnetického pole okolo pásky a následně se podle Faradayova zákona indukuje napětí v cívce a je odváděno vodičem ke spotřebičům.



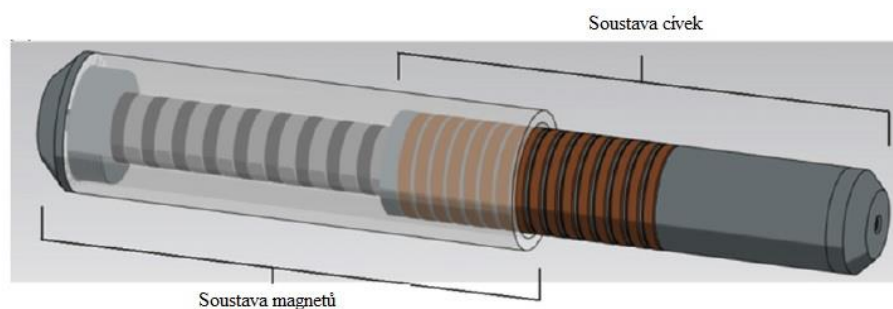
Obr. 3.6 Příklad teoretické konstrukce magnetostrikčního generátoru.[3]

3.2 Existující řešení kinetických energy harvesterů

V této podkapitole je pro ilustraci představeno několik konkrétních příkladů použití a koncepcí energy harvesterů.

Generátor jako tlumič v automobilu

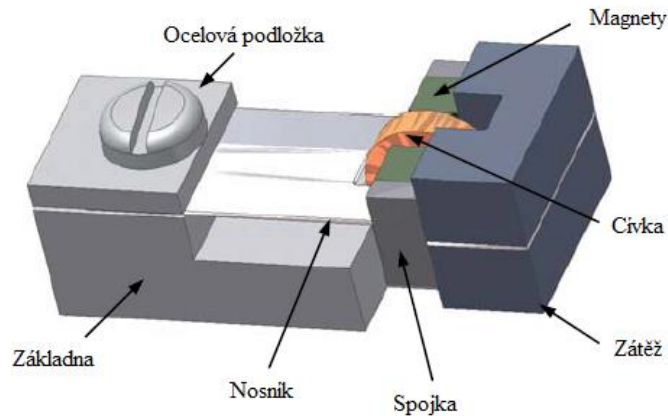
Trendy moderního automobilismu směřují k zefektivnění provozu, snižování emisí a minimalizaci vlivu na životní prostředí. Systémy jako rekuperace brzdné energie se prosazují i v běžných vozech a rozmach zažívají i elektromobily. Jedním se zajímavých nápadů je zabudování generátoru do tlumičů, což umožňuje energii nárazů od vozovky přeměnit na elektřinu namísto konvenčního absorbování v tlumicím médiu. Konstrukce lineárního tlumiče vibrací, znázorněná na obr. 3.6, sestává z cívek a permanentních magnetů, umístěných na ose tlumiče. Vlivem vibrací pak relativní pohyb magnetů vůči cívkám generuje elektrický proud, váha takto provedeného tlumiče by byla přibližně 28 kg [11]. Při návrhu takového generátoru je nutné brát v potaz nejen vlastnosti soustavy, jako tuhost pružin, hmotnost vozu a tuhost pneumatik, ale také komfort cestujících. Získaná energie závisí nejvíce na povrchu cesty, rychlosti a tuhosti pneumatik. Středně velký osobní automobil na standardní silnici generuje při rychlostech 97 km/h výkon přibližně 100-400W [10].



Obr. 3.6 Ukázka generátoru jako tlumiče vozu.[11]

Ukázka reálného vibračního generátoru

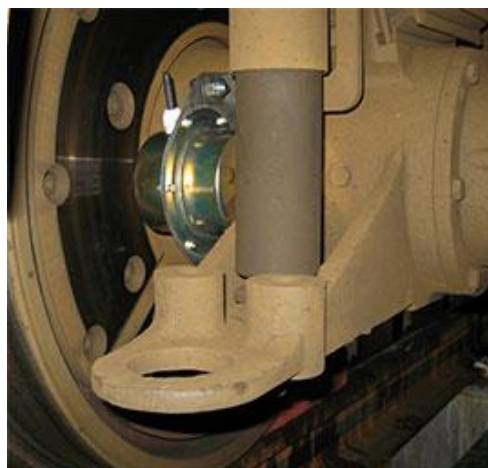
Jedním z možných konstrukčních řešení generátoru určeného pro sběr energie z vibrací je laboratorní konstrukce uvedená v článku [12]. Jedná se o generátor navržený pro reálnou aplikaci – kompresor. Hlavní částí generátoru je základna, na níž je připevněn pružný nosník, který udává tuhost zařízení. Na konci nosníku jsou umístěny dva páry neodymových magnetů spojených spojkami, jež pomáhají lepšímu průběhu magnetického toku od magnetů během vibrace. Na magnetický obvod přiléhá wolframové závaží, které zajišťuje dostatečnou pohybující se hmotu. Cívka, v níž se relativním pohybem magnetů indukuje energie, je připevněna k základně a umístěna mezi dvojicí magnetů na pružném nosníku. Při vlastní frekvenci soustavy 52Hz a buzení na vlastní frekvenci byl při experimentu změřen výkon 46,6 μ W [12].



Obr. 3.7 Konstrukce vibračního generátoru v laboratorních podmínkách[12]

Generátor pro aplikaci na železnici

Zajímavé využití energy harvesting představila firma Perpetuum, jedná se o komplexní systém určený pro sběr dat z provozu železničních tratí v reálném čase. Sensory umístěné na podvozku vlakové soupravy umožňují monitorovat stav trati, jízdní komfort a míru opotřebení ložisek podvozku. Tyto údaje pak mohou být využity k prevenci rizik a snížení nákladů. Napájení snímačů je řešeno pomocí vibračního generátoru, integrovaného ve společném pouzdře s jednotkou sensorů. Jednotka sensorů je vybavena akcelerometrem, teploměrem a pomocnou elektronikou. Údaje ze sensorů jsou poté předávány dále do jednotky umístěné ve vagónu, která zároveň monitoruje aktuální polohu přes GPS, a odtud bezdrátově distribuovány k dalšímu zpracování. Mezi plusy tohoto řešení patří snadná montáž a bezpečnost, neboť není zasahováno do žádných funkčních prvků. Zásadní výhodou je pak absolutní bezúdržbovost systému, podle webu firmy [13] je životnost sensorů 20 let a vibračního generátoru dokonce 100 let.

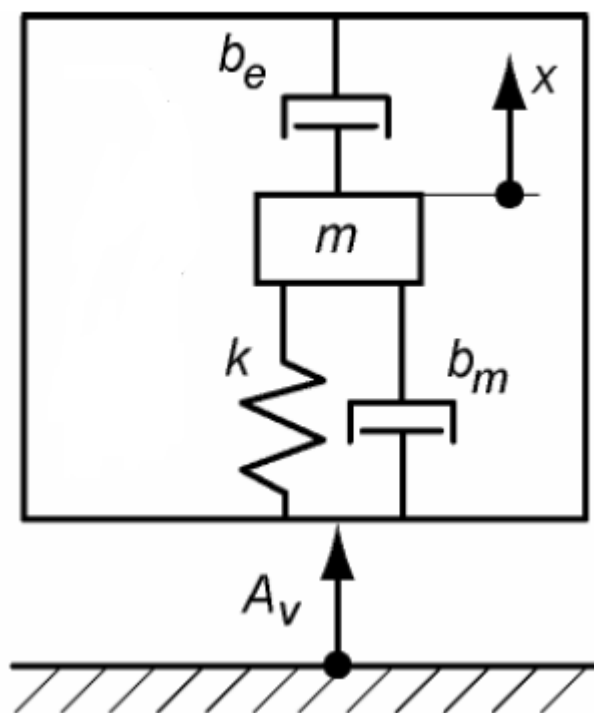


Obr. 3.8 Diagnostická jednotka s vibračním generátorem na podvozku vlaku[13]

4 ANALÝZA GENERÁTORU A NÁVRH ŘEŠENÍ

4.1 Analýza vibračního generátoru

Vibrační generátor lze považovat za lineární systém a generátor převést na zjednodušený model znázorněný na obr. 4.1. Uvažujeme generátor s jedním stupněm volnosti. Při takto zjednodušeném modelu je pak možné získat vztahy pro výchylku a následně výkon generátoru z dynamických rovnic zjednodušené soustavy.



Obr. 4.1 Schéma obecného vibračního generátoru. Převzato z [4]

Model systému znázorněný ve schématu na obr. 4.1 uvažuje pružný člen, popsáný tuhostí k , na němž je umístěno těleso o hmotnosti m . Soustava je buzena vstupním zrychlením A_v , které způsobuje pohyb tělesa m o relativní výchylku x . Na relativní pohyb má vliv i elektromagnetické tlumení b_e a mechanické tlumení b_m .

Pohybovou rovnici takového generátoru lze napsat podle principů dynamiky ve tvaru (pokud uvažujeme buzení kmitáním A_v , resp. výchylkou z) $A_v = \ddot{z} = -Z_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$, uvedeno v [4],[14],[9]. Lze potom rovnici zapsat v obecné podobě:

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

Zavedeme vlastní frekvenci generátoru Ω jako:

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Dále pak uvažujeme kritické tlumení:

$$b_k = 2m\Omega \quad (3)$$

Následně poměrný útlum:

$$\zeta_0 = \frac{b_e + b_m}{b_k} \quad (4)$$

S pomocí vztahů v rovnicích (2),(3),(4) lze po dosazení do rovnice (1) přepsat obecnou rovnici soustavy generátoru jako:

$$\ddot{x} + 2\zeta_0\Omega\dot{x} + \Omega^2x = A_v \quad (5)$$

Výkon vibračního generátoru je úměrný na elektromagnetické tlumící síle, kterou vytváří proud v kotvě generátoru:

$$F = b_e\dot{x} = b_ev \quad (6)$$

Okamžitý výkon, který generátor produkuje, je pak integrálem síly F z rovnice (6), lze tedy psát:

$$p = b_e\dot{x}^2 \quad (7)$$

Okamžitá výchylka generátoru může být vyjádřena z rovnice (5), po dosazení do rovnice okamžitého výkonu (7) dostáváme okamžitý výkon generátoru jako:

$$p(t) = \frac{b_e A_0^2 \omega^2 (\cos(\omega t))^2}{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_0^2 \Omega^2 \omega^2} \quad (8)$$

Vyjádříme součinitel naladění generátoru ve tvaru:

$$\eta = \frac{\omega}{\Omega} \quad (9)$$

Můžeme rovnici (9) přepsat do tvaru:

$$p(t) = \frac{b_e A_0^2 \eta^2 (\cos(\omega t))^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4\zeta_0^2 \eta^2} \quad (10)$$

Pokud je generátor buzen polohou či zrychlením jako sinusovou vlnou, pak uvedené vzorce pro výkon platí. Využijeme znalostí o goniometrických funkcích a přepíšeme rovnici (8) do tvaru pro průměrný výkon lineárního vibračního generátoru:

$$P = \frac{b_e A_0^2 \omega^2}{2((\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_0^2 \Omega^2 \omega^2)} \quad (11)$$

Zavedeme složku poměrného útlumu, způsobenou vlivem generování energie:

$$\zeta_e = \frac{b_e}{2m\Omega} \quad (12)$$

V případě, že soustavu budíme zrychlením o frekvenci shodné s rezonanční frekvencí generátoru a využití poměrného útlumu z rovnic (4) a (12), se vzorec celkového výkonu v rovnici (11) redukuje na tvar:

$$P_{max} = \frac{A_0^2 \zeta_e m}{4\zeta_0^2 \omega} \quad (13)$$

4.2 Algoritmy pro výpočet výkonu generátoru jako lineárního systému

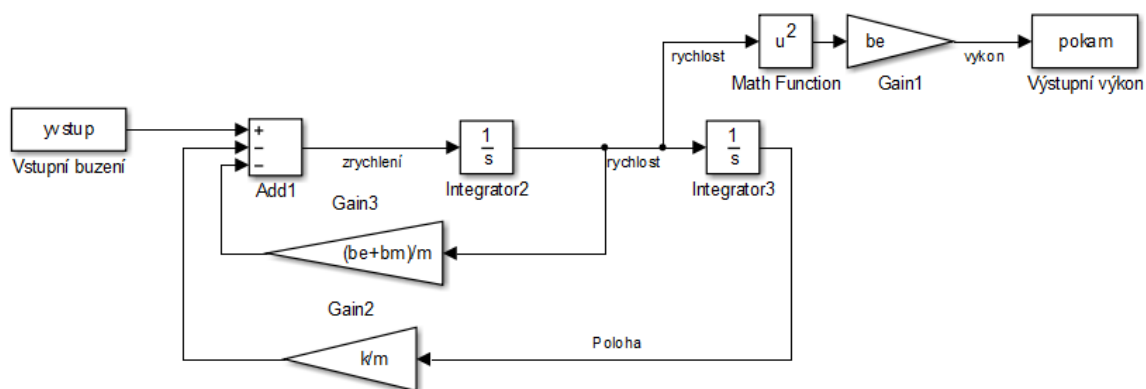
Konvenční přístup nastavení vibračního generátoru spočívá v seřízení jeho vlastní frekvence na frekvenci shodnou s hlavní frekvencí budících vibrací. Pokud definujeme dynamický systém harvesteru popsany v kapitole 4.1 jako lineární, pak je možné se domnívat, že nejlepší nastavení parametrů energy harvesteru, tak aby bylo dosaženo nejvyššího možného výkonu, nemusí být nutně shodné s hlavní frekvencí vibrací. Nebo případně nemusí být vůbec technologicky možné vyrobit harvester na hlavní frekvenci budících vibrací.

V lineárním systému platí princip superpozice. Jednou z vlastností superpozice je aditivita, kdy vstupní veličiny projdou systémem, aniž by se vzájemně ovlivnily. Součet výstupů jednotlivých složek vstupu je tedy shodný s výstupem sečtených složek vstupu. Obecná rovnice aditivity převzata z [15]:

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t) \quad (14)$$

Díky superpozici je tudíž možné rozložit vstupní vibrace na harmonické složky, určit výkon každé z těchto složek a sečtením všech harmonických složek získat výsledný výkon. Dekompozicí buzení na jednotlivé složky je pak možné určit výkon generátoru podle analytického vzorce operujícího s harmonickým vstupem.

Pro ověření tohoto řešení byly s pomocí analýzy z předchozí kapitoly vytvořeny algoritmy v programu Matlab, které při známých parametrech určí teoretický výkon generátoru pro různé vlastní frekvence. Simulace sestávají jak z analytického řešení, tak i ověření pomocí prostředí Matlab -Simulink. Model z prostředí Simulink je znázorněn na obr. 4.2.

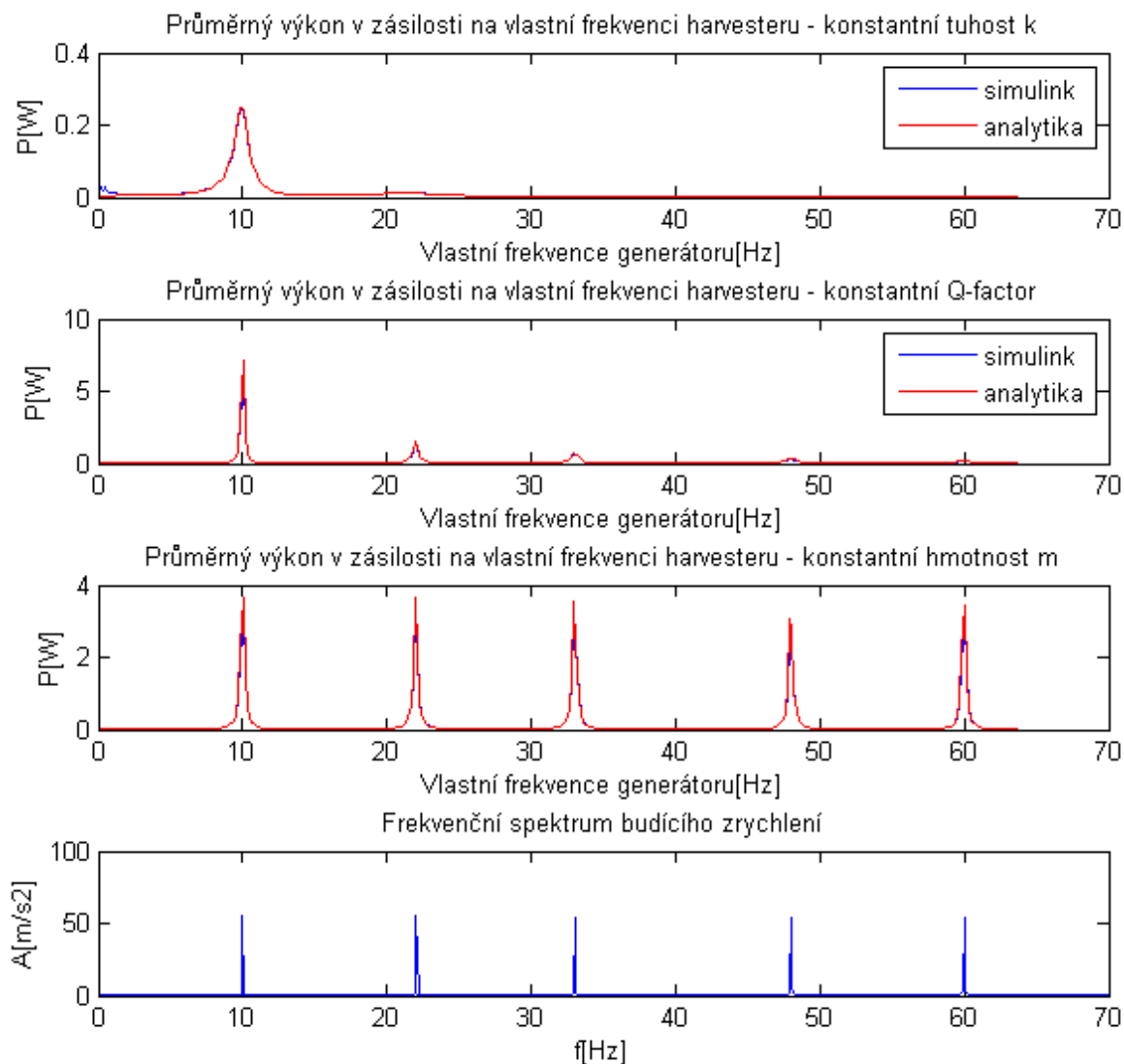


Obr. 4.2 Model generátoru v Simulinku

Z rovnic uvedených v analýze generátoru vyplývá, že hlavní frekvence Ω závisí na tuhosti a hmotnosti, tedy při nastavování mechanického členu na potřebnou frekvenci je možné ponechat konstantní tuhost a frekvenci měnit změnou hmotnosti, anebo ponechat hmotnost a měnit tuhost. Kromě těchto způsobů je ještě možnost měnit jak tuhost, tak hmotnost a zachovávat tzv. faktor kvality nebo Q faktor (quality factor). Q faktor lze zapsat jako:

$$Q = \frac{1}{2\zeta_0} = \frac{b_k}{2(b_e + b_m)} \quad (15)$$

Existují tedy tři způsoby nastavování generátoru: konstantní hmotnost, konstantní tuhost a konstantní Q faktor. Pro účely ověření algoritmů, modelu a demonstrace způsobu nastavení vlastní frekvence generátoru bylo zvoleno buzení, jehož složky mají sinusový průběh a totožné amplitudy při rozdílných frekvencích. Frekvenční spektrum buzení je zachyceno na čtvrtém z grafů v obr. 4.3.



Obr 4.3 Průměrný výkon v závislosti na vlastní frekvenci generátoru

Z výsledných grafů na obr. 4.3 je zjevné, že špičky výkonů pro takto nastavené buzení odpovídají příslušným hlavním frekvencím budícího zrychlení. I přes drobné odchylky shoda výkonu analytického, určeného vzorcem (11), a modelu v Simulinku, potvrzuje správnost odvozeného vzorce.

Hodnoty výsledných výkonů mají do jisté míry vypovídající hodnotu, je ovšem nutné brát v potaz parametry simulací, které mají na velikost výstupního výkonu největší vliv.

Parametry simulací byly dány jako:

Elektromagnetické a mechanické tlumení: $b_e = b_m = 0.01 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$.

Konstantní tuhost: tuhost $k = 10 \text{ Nm}^{-1}$; hmotnost $m = 0.25 \text{ kg} - 0.06 \text{ g}$ pro 1 Hz až 65 Hz

Konstantní hmotnost: $m = 0.01 \text{ kg}$, $k = 0.39 \text{ Nm}^{-1} - 1666.7 \text{ Nm}^{-1}$, pro 1 Hz až 65 Hz

Konstantní Q faktor: $Q = 45$, $m = 0.14 \text{ kg} - 2,2 \text{ g}$, $k = 5,53 \text{ Nm}^{-1} - 367 \text{ Nm}^{-1}$, pro 1 Hz až 65 Hz

Z průběhů výkonů na spektru zkoumaných vlastních frekvencí vyvstávají rozdíly dané způsobem nastavování vlastní frekvence generátoru. Pro tyto módy nastavení lze poměrně snadno odvodit vzorce výkonu v případě rezonance (shody vlastní frekvence a frekvence budící), které dokazují platnost výsledků z Matlabu a popisují tvar křivek výkonů.

Změna vlastní frekvence při konstantní tuhosti

Při nastavování vlastní frekvence způsobem zachování tuhosti se z určené vlastní frekvence dopočítá hmotnost m . Pro případ, kdy se vlastní frekvence shoduje s frekvencí budícího zrychlení a při konstantní tuhosti, lze vzorec průměrného výkonu přepsat do tvaru:

$$P = \frac{b_e A_0^2 k^2}{2(b_e + b_m)^2 \Omega^4} \quad (16)$$

Takto upravený vzorec definuje průběh výkonu při konstantní tuhosti znázorněný na prvním grafu obr. 4.3. Pro konstantní tuhost je výkon nejvyšší při shodě vlastní frekvence a frekvence buzení, ovšem maximální velikost je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlastní frekvence/frekvence buzení. Proto v grafu dosahuje průběh výkonu vrcholu na nejnižší z hlavních frekvencí buzení (10 Hz) a další maxima již nejsou zřejmá.

Změna vlastní frekvence při konstantním Q faktoru

Pro nastavení vlastní frekvence při zachování Q faktoru zachováváme tuto veličinu a měníme hmotnost a tuhost. Podle rovnice (15) pro Q faktor lze zapsat průměrný výkon pro rezonanci v závislosti na Q faktoru:

$$P = \frac{b_e A_0^2 Q^2}{2\Omega^2} \quad (17)$$

Z tohoto vzorce plyne, že průměrný výkon v rezonanci při konstantním Q faktoru je přímo úměrný druhé mocnině Q a nepřímo úměrný druhé mocnině vlastní/budící frekvence. Vzorec koresponduje s průběhem grafu výkonu v závislosti na vlastní frekvenci na obr. 4.3. Nejvyšší peak je stejně jako pro konstantní tuhost na 10 Hz, ale zřetelné jsou i další peaky, ačkoli jejich hodnota s rostoucí frekvencí klesá.

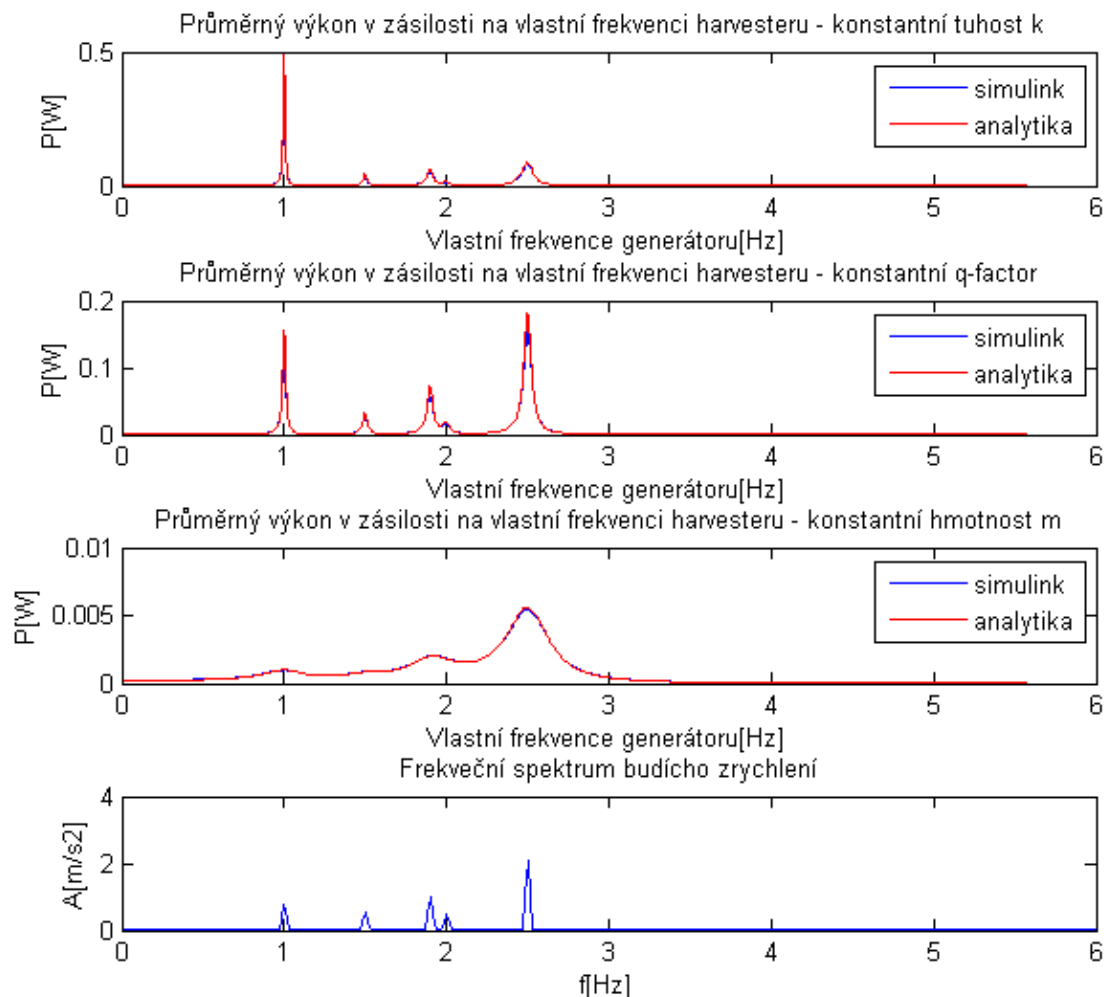
Změna vlastní frekvence při konstantní hmotnosti

Při nastavování vlastní frekvence způsobem zachování hmotnosti se z určené vlastní frekvence dopočítá tuhost k . Pro případ, kdy se vlastní frekvence shoduje s frekvencí budícího zrychlení a při konstantní hmotnosti, lze vzorec průměrného výkonu přepsat do tvaru:

$$P = \frac{b_e A_0^2 m^2}{2(b_e + b_m)^2} \quad (18)$$

Je zřejmé, že při konstantní hmotnosti nemá frekvence budící vlny vliv na výsledný výkon. Výkon je v tomto modu nastavování závislý pouze na amplitudě buzení a nastavené hmotnosti. Tento předpoklad splňuje i numerické řešení – třetí graf na obr 4.3, kdy při konstantní hmotnosti jsou výkony na všech hlavních frekvencích buzení přibližně shodné.

Jelikož výše definované buzení se díky stejným a vysokým amplitudám neblíží reálnému, je vhodné ověřit výpočty i na nízkých, nerovnoměrných amplitudách. Výsledek simulace pro budící zrychlení s nižšími amplitudami a frekvencemi je zobrazen na obr. 4.4. Opět lze pozorovat shodu Simulink modelu s skriptem v Matlabu. Je tak zřejmé, že obě navržená řešení uspokojivě fungují.

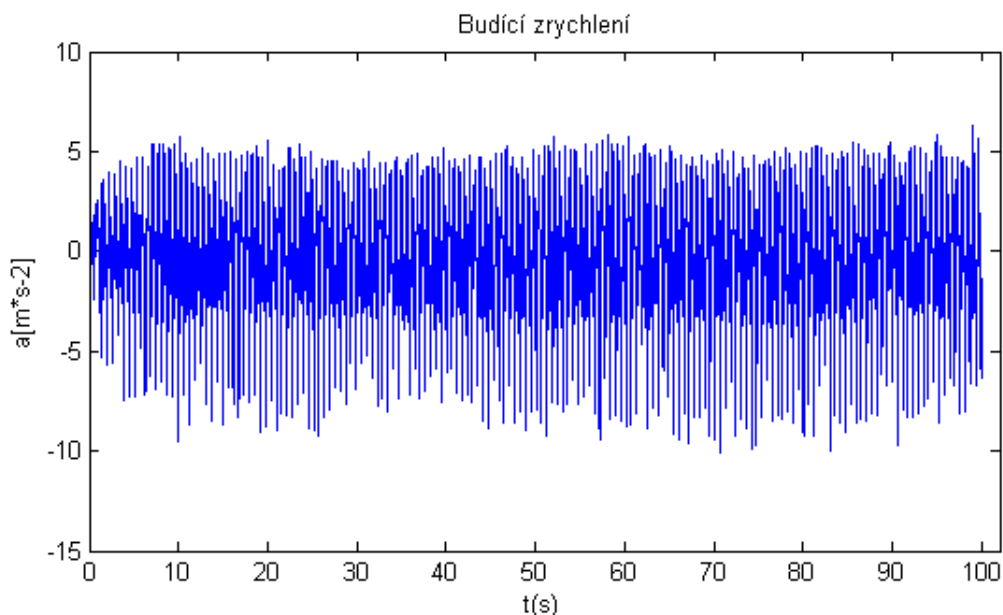


Obr. 4.4 Grafy závislosti výkonu na vlastní frekvenci generátoru a graf frekvenčního spektra buzení pro nízké amplitudy.

5 OVĚŘENÍ ALGORITMŮ NA REÁLNÝCH DATECH

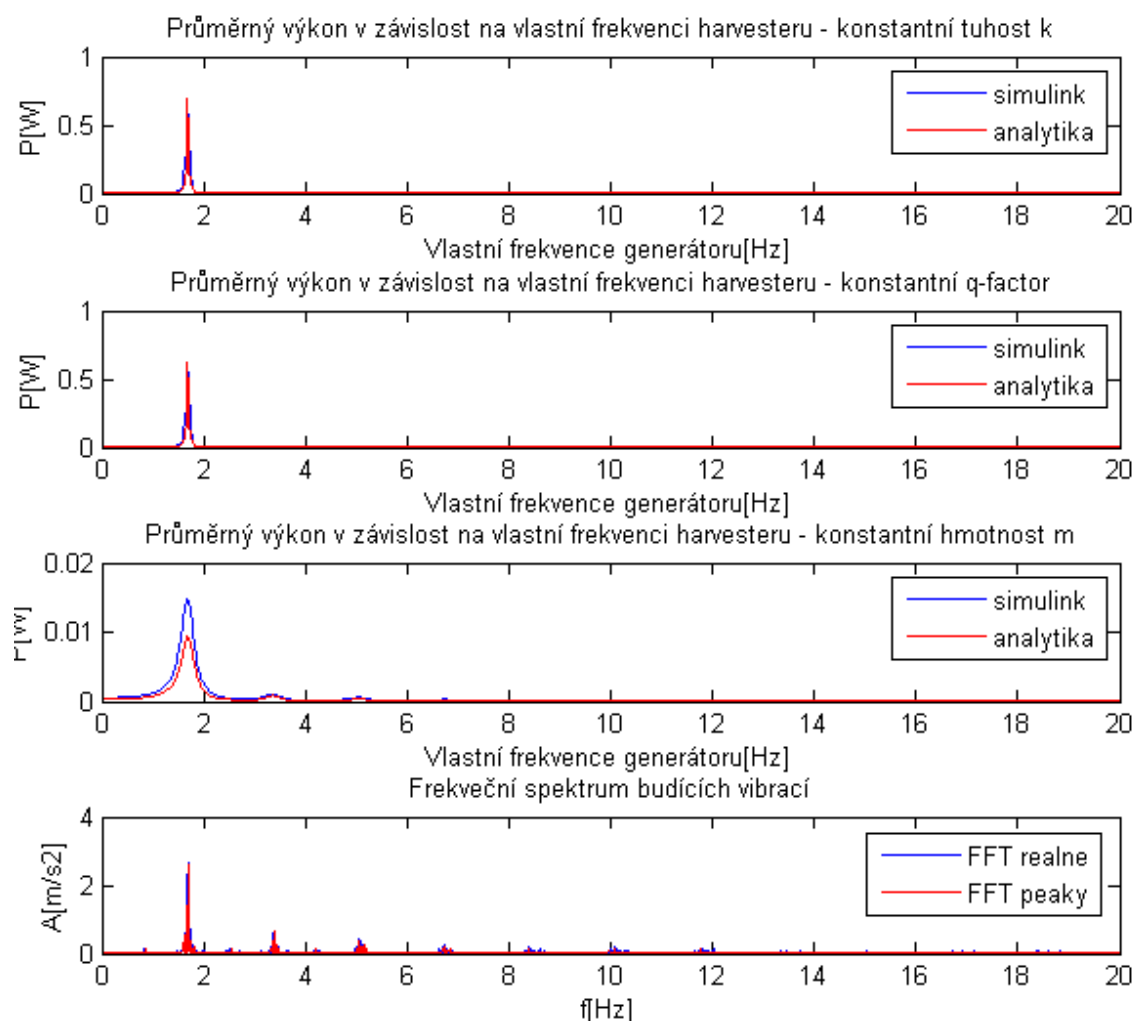
Jelikož při reálném použití nebude generátor buzen teoretickým spektrem vibrací, je vhodné ověřit funkčnost navržených algoritmů na reálných datech. Reálná data mají na rozdíl od testovacích dat z předchozí kapitoly více harmonických složek a šum.

Testovaná reálná data pochází z akcelerometru, jde tedy o zrychlení, konkrétně o data z lidské chůze. Série dat má délku 100 vteřin, při vzorkovací frekvenci 3,2 kHz. Data jsou nejprve převedena z jednotek g do $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, filtrována a frekvenční spektrum je pak získáno funkcí FFT (fast Fourier transform) integrované v Matlabu. Testovaná data v časové doméně jsou znázorněna na obr. 5.1. Problém při zpracování takto koncipovaných dat pro použití v algoritmu výpočtu výkonu představuje funkce FFT. I přes použití Hanningova okna dochází v získaných údajích k menšímu zkreslení, zejména k snížení přesnosti hodnot amplitud. Odchyšky však nejsou velké, takže FFT poskytuje dostatečně přesné hodnoty frekvenčního spektra a jak je zřejmé ze srovnání výkonů na obr. 5.2, získané výsledky se od hodnot ze Simulinku, které nejsou zatíženy chybou z FFT, příliš neliší.



Obr. 5.1 Budící zrychlení v časové doméně

Dekompozice signálu na jednotlivé harmonické složky byla provedena z výsledků Fourierovy transformace a vyvozovaný výkon zahrnul 30 složek frekvenčního spektra s nejvyšší amplitudou. Funkčnost takového řešení je ilustrována na posledním grafu obr. 5.2, který zobrazuje frekvenční spektrum vstupních vibrací a spektrum signálu získaného součtem lineárních složek. Výsledné srovnání výkonů pro různé vlastní frekvence generátoru pro nastavování s konstantní tuhostí, hmotností a Q faktorem je uvedeno na obr. 5.2.



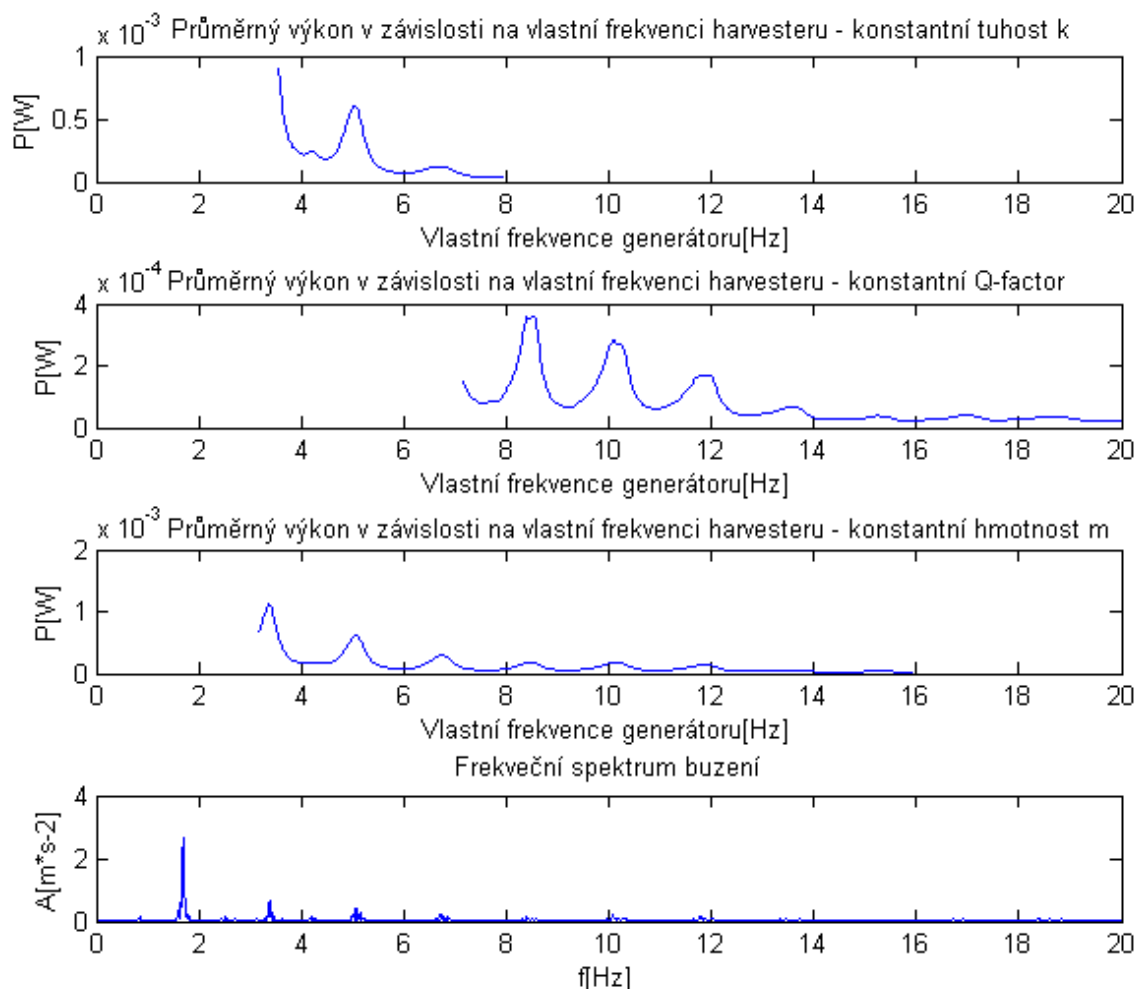
Obr. 5.2 Grafy srovnání výstupních výkonů podle nastavení jednotlivých parametrů a frekvenční spektrum buzení.

5.1 Omezení parametrů

Výše uvedené srovnání a grafy výkonů platí pouze za předpokladu, že je generátor možné nastavit na příslušné parametry s pomocí libovolných hodnot. Reálný generátor má ovšem limity a omezení ve velikostech parametrů, není tedy možné získat stejné spektrum výkonu jako pro libovolné parametry v obr. 5.2. Pro účel simulace byla zvolena omezení:

- Maximální hmotnost mechanického členu 0,020 kg
- Q faktor v rozmezí 10 – 50

Závislost výkonu na vlastní frekvenci generátoru při uvažování omezení parametrů je znázorněna na obr. 5.3. Při srovnání s výkony bez těchto omezení na obr. 5.2 vyplývá, že limity parametrů podstatně sníží maximální možný dosažitelný výkon, a to pro všechny módy nastavení.

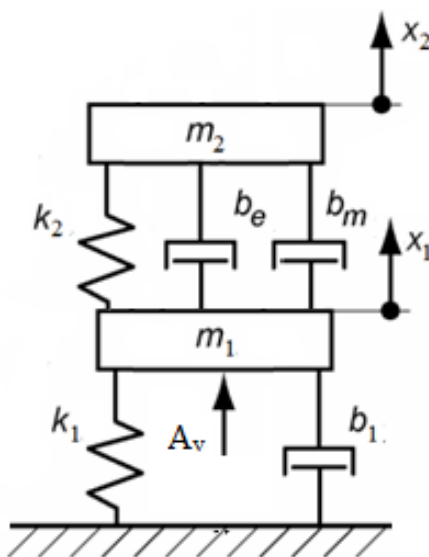


Obr. 5.3 Graf závislosti výkonů na vlastní frekvenci generátoru pro omezení parametrů

Z grafů výkonů na obr. 5.2 a 5.3 je vidět, že nejvhodnější nastavení generátoru představuje pro danou sérii dat nastavení na hlavní frekvenci buzení. Díky omezením v grafech na obr. 5.3 je zřejmé, že pokud není možné generátor nastavit na hlavní frekvenci buzení, tak je vhodné, aby frekvence odpovídala některé z dalších harmonických frekvencí buzení, nikoliv tedy frekvenci mezi peaky budícího spektra. Z porovnání hodnot získaných bez omezení parametrů a s nimi je také zřejmý vysoký pokles hodnoty maximálního výkonu generátoru s nastaveným omezením.

6 OVLIVNĚNÍ BUDÍCÍ SOUSTAVY OSCILUJÍCÍ HMO- TOU HARVESTERU

V předchozích úvahách a výpočtech, kdy byl harvester buzen z vnějšku zrychlením, bylo toto buzení uvažováno jako nezávislé, tedy umístěný generátor neměl vliv na vstupní vibrace. Je však zřejmé, že pokud je generátor umístěný na kmitajícím tělese, pak svými parametry přímo ovlivňuje budící soustavou a mění tak její dynamické chování, a tudíž i charakter vibrací, jež vstupují do generátoru samého. Definováním parametrů umístěného generátoru tak lze využít k tlumení vibrací (pokud jsou nežádoucí), což ovšem vede k redukci množství energie generátorem vyrobené. Příkladem takového druhu tlumiče jsou například kyvadla ve výškových budovách určená k pohlcení výkyvů konstrukce. Tyto systémy nazývané hmotnostní tlumiče můžeme najít ve stavebnictví [16].



Obr. 6.1 Soustava s dvěma stupni volnosti, harvester a základní těleso

Situaci, kdy je buzeno základní těleso, na němž je umístěn generátor, lze znázornit zjednodušeným schématickým modelem jako soustavu s dvěma stupni volnosti, viz obr. 6.1. Kde m_1 je hmotnost základního tělesa, b_1 tlumení, k_1 pak tuhost tělesa a x_1 jeho relativní výchylka. Základní těleso je pak buzeno zrychlením A_v . Harvester je definován tuhostí k_2 , výchylkou x_2 a tlumením b_2 . Přičemž tlumení b_2 je součet parametrů b_e a b_m :

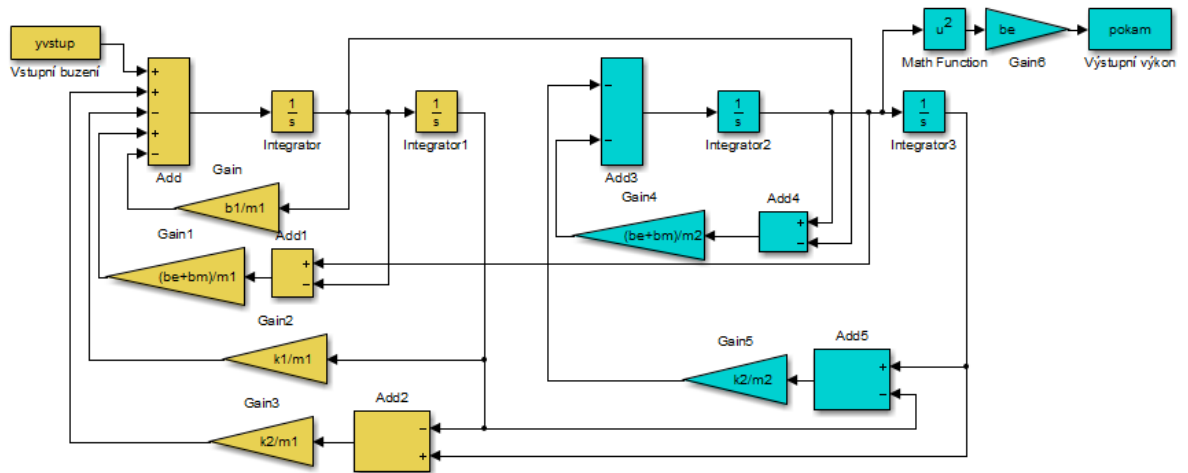
$$b_2 = b_e + b_m \quad (19)$$

Pro soustavu tvořenou generátorem a tělesem platí rovnice, které odpovídají standardním rovnicím pro soustavu s dvěma stupni volnosti uvedených v [14]. Přepíšeme-li je do tvaru pro buzení zrychlením a pro veličiny znázorněné na obr. 6.1, dostáváme rovnice:

$$\ddot{x}_1 + \frac{b_1}{m_1} \dot{x}_1 - \frac{b_2}{m_1} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \frac{k_1}{m_1} x_1 - \frac{k_2}{m_1} (x_2 - x_1) = A_v \quad (20)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (21)$$

Za pomoci rovnic (20) a (21) lze pak sestavit model v prostředí Matlab Simulink, a to pomocí grafických bloků, umožňujících snadné zpracování diferenciálních rovnic bez nutnosti analytického řešení. Výsledný model v tomto prostředí je zobrazen na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Model soustavy s dvěma stupni volnosti v Simulinku. Základní těleso označeno žlutě, harvester modře.

Účelem takto koncipovaného modelu a iniciačního skriptu, je zjištění vlivu, který má základní těleso na výkon generovaný harvesterem. Spouštěcí skript v Matlabu obsahuje parametry buzení, základního tělesa a generátoru. Zkoumanou veličinou je poměr hmotnosti základního tělesa k hmotnosti generátoru a výstupní výkon. Model je pro zjednodušení buzen harmonickým zrychlením se sinusovým průběhem. Vlastní frekvence generátoru odpovídá frekvenci vstupních vibrací. Simulace zkoumá tři situace, a to rozdílné vlastní frekvence generátoru a základního tělesa, konkrétně pro situace, kdy je vlastní frekvence tělesa rovna 50%, 100% a 150% vlastní frekvence generátoru. Při nastavování parametrů základního tělesa byla uvažována vždy určitá hmotnost a následně dopočítána tuhost k_1 ze znalosti vlastní frekvence.

Parametry simulace:

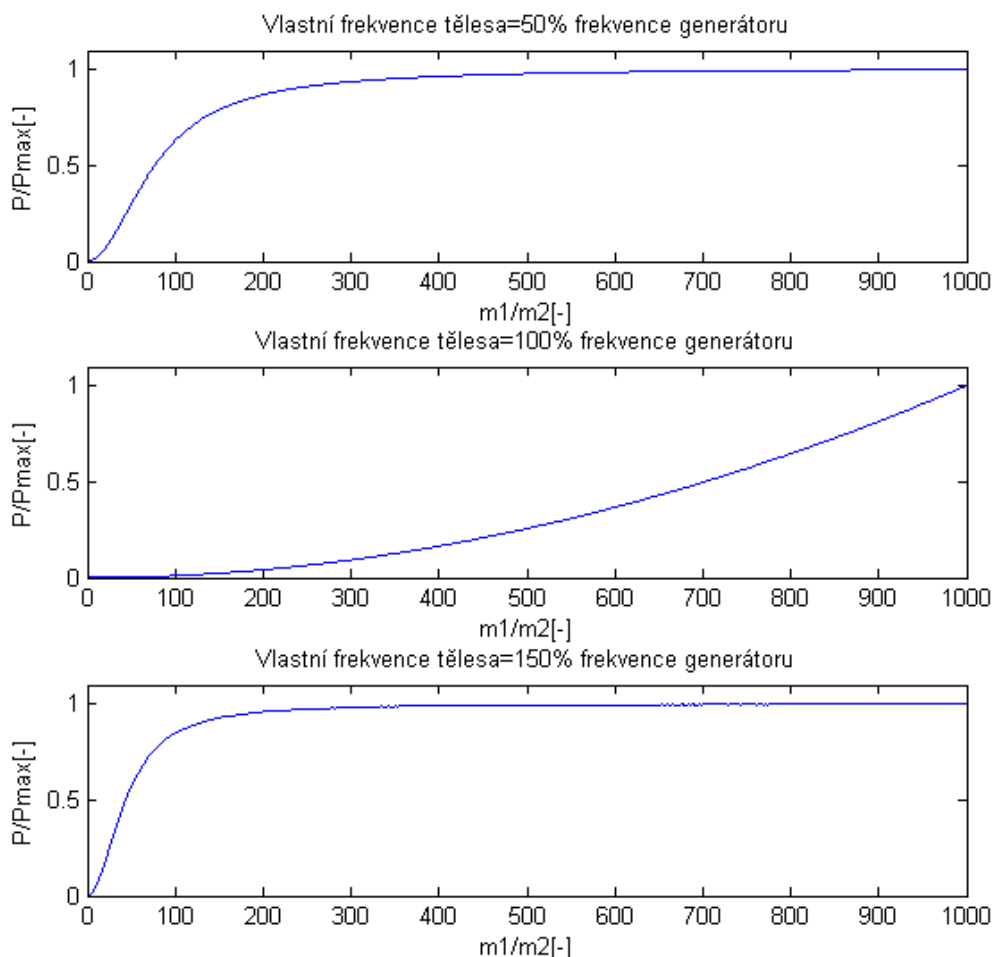
Buzení: sinusové s amplitudou $A = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a frekvencí $\omega = 10 \text{ Hz}$, s vzorkovací frekvencí $F = 500 \text{ Hz}$. Čas simulace $T = 10 \text{ s}$

Generátor: hmotnost $m_2 = 0.01 \text{ kg}$, vlastní frekvence $\Omega_2 = 10 \text{ Hz}$, tlumení $b_e = b_m = 0,01 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, tuhost $k_2 = 157,9 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$

Základní těleso: tlumení $b_1 = 0,02 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, hmotnost $m_1 = \text{od } 0.01 \text{ kg do } 10 \text{ kg}$, vlastní frekvence $\Omega_1 = 5 \text{ Hz}, 10 \text{ Hz a } 15 \text{ Hz}$ pro jednotlivé cykly.

Výstupem simulace, resp. skriptu je trojice grafů znázorňující podíl výkonu pro dané nastavení a maximálního výkonu v závislosti na poměru hmotností základního tělesa a generátoru – m_1/m_2 .

6.1 Zhodnocení výsledků



Obr. 6.3 Grafy závislosti generovaného výkonu na poměru hmotností základního tělesa a generátoru

Z výstupů simulace zobrazených na obr. 6.3 vyplývá, že tvar křivky výstupního výkonu generátoru je na poměru vlastních frekvencí harvesteru a základního tělesa silně závislý.

Pro první a třetí graf má výkon přibližně stejný průběh, kdy na začátku roste a poté zůstává přibližně ustálený, resp. mírně roste v prvním grafu. Poměr hmotností, pro který výkon dosáhne přibližně maxima, je pak na prvním grafu mírně vyšší.

Pokud jsou vlastní frekvence generátoru a tělesa shodné, pak má křivka výkonu v závislosti na poměru hmotností rostoucí průběh, obr. 6.3 - prostřední graf. Při těchto parametrech jsou generátor i těleso nastaveny na vlastní frekvenci shodnou s frekvencí budící vibrace, tedy nastává rezonance. Graf má se zvyšujícím se podílem hmotností rostoucí průběh díky vysokému zatlumení způsobeného generátorem. Základní těleso pracující v provozním stavu rezonance je také značně problematické. Výchylka harvesteru by v tomto provozním stavu navíc nejspíš přesahovala fyzické limity zařízení.

Z výsledků plyne, že pokud je hodnotícím kritériem návrhu dosáhnout maximálního množství generované energie pro co nejvyšší hmotnost generátoru, tedy nejnižší poměr hmotností základního tělesa a harvesteru, pak by se poměr hmotností měl pohybovat kolem 400 pro harvester s vyšší frekvencí než těleso, resp. přibližně 200 pro harvester s frekvencí nižší než základní těleso. Z grafů je patrné, že od těchto poměrů hmotností již nižší hmotnost generátoru příliš nezvyšuje výkon, tudíž není nutné používat lehčí generátor.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat kinetický energy harvester a za předpokladu, že definovaná soustava je lineární systém provést výpočet a úpravu parametrů pro zjištění výstupního výkonu. Práce zahrnuje stručný přehled možných konstrukcí a principů funkčnosti kinetických energy harvesterů. Z teoretického modelu vibračního generátoru byly vyvozeny analytické rovnice, na jejichž základě byly vytvořeny skripty v programu Matlab a v prostředí Simulink. Simulací soustavy s dvěma stupni volnosti byl analyzován i vliv generátoru na základní těleso.

Navržené řešení výpočtu výkonu při uvažování generátoru jako lineárního systému dává uspokojivé výsledky. Možnost, že by optimální nastavení frekvence mechanického členu generátoru na jinou než dominantní (možnou s ohledem na omezení parametrů) frekvenci budících vibrací poskytovalo vyšší výkon, se nepotvrdila. Vytvořené skripty a modely lze použít pro odhad výstupního výkonu a potřebných parametrů generátoru ze známého buzení. Algoritmus výpočtu byl také úspěšně ověřen na reálných datech. Výsledky navrženého analytického řešení korespondují s výsledky Simulinku, algoritmy jsou tedy dostatečně přesné.

Analýza ovlivnění budící soustavy oscilující hmotou harvesteru byla provedena v prostředí Simulink. Pro simulaci byly použity rovnice kmitání s dvěma stupni volnosti. Pro nízké poměry hmotností základního tělesa a generátoru nedosahuje maxima, protože generátor zatlumí základní těleso. V určitém poměru hmotností ovšem výkon dosáhne maxima a s vyšším poměrem hmotností již neroste. S použitím navrženého postupu je tak možné určit potřebnou hmotnost generátoru tak, aby bylo dosaženo optimálního výkonu.

8 REFERENCE

- [1] HARB, Adnan, 2011. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 36, č. 10, s. 2641–2654. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.06.014
- [2] KHALIGH, a, Peng ZENG a Cong ZHENG, 2010. Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies #x2014;State of the Art. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* [online]. roč. 57, č. 3, s. 850–860. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2009.2024652
- [3] WANG, Lei a F G YUAN, 2008. Vibration energy harvesting by magnetostrictive material. *Smart Materials and Structures* [online]. roč. 17, č. 4, s. 045009. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/17/4/045009
- [4] Hadaš Z. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. 98 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně na ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitelé disertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, Csc., doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.
- [5] KIM, Heung Soo, Joo Hyong KIM a Jaehwan KIM, 2011. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. roč. 12, č. 6, s. 1129–1141. ISSN 12298557. Dostupné z: doi:10.1007/s12541-011-0151-3
- [6] ROUNDY, S a P K WRIGHT, 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures* [online]. roč. 13, č. 5, s. 1131–1142. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/13/5/018
- [7] HANUS, J. *Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [8] BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, 17(12), R175-R195 [cit. 2016-02-08]. DOI: 10.1088/0957-0233/17/12/R01. ISSN 0957-0233.
- [9] SMILEK, J. *Chůze jako alternativní zdroj elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..
- [10] SATPUTE, Nitin, Shankar SINGH a S SAWANT. Energy Harvesting Shock Absorber with Electromagnetic and Fluid Damping. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. London: Sage Publications Ltd, 2014 [cit. 2016-03-18]. DOI: 10.1155/2014/693592. ISSN 16878132.
- [11] ZUO, Lei a Pei-Sheng ZHANG. Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions. *Journal of Vibration and Acoustics* [online]. 2013, 135(1), 011002- [cit. 2016-04-23]. DOI: 10.1115/1.4007562. ISSN 0739-3717.

- [12] BEEBY, S P, R N TORAH, M J TUDOR, P GLYNNE-JONES, T O'DONNELL, C R SAHA a S ROY. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2007, 17(7), 1257-1265 [cit. 2016-03-19]. DOI: 10.1088/0960-1317/17/7/007. ISSN 0960-1317.
- [13] Perpetuum Rail. *Perpetuum*. [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.perpetuum.com/rail/>
- [14] Mechanika těles – Dynamika. [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola_7.html
- [15] doc. Ing. Jiří Krejsa, PhD.. Základy zpracování signálu. . [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~ruja/vyuka/ZZS/DSP04.pdf>
- [16] HMOTNOSTNÍ TLUMIČE. *KGF hydraulika*. [online]. 23.3.2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://kgf.cz/cs/produkty/hmotnostni-tlumice-tmd>
- [17] History. Harwood-watches. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.harwood-watches.com/en/history/index.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Rozměr	Veličina
A_v	$[m \cdot s^{-2}]$	budící zrychlení
b_e	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	elektromagnetické tlumení
b_m	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	kritické tlumení
b_k	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	mechanické tlumení
b_1	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	tlumení
b_2	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	tlumení
F	$[N]$	elektromagnetická tlumící síla
k	$[N \cdot m^{-1}]$	tuhost
m	$[kg]$	hmotnost
P	$[W]$	výkon
v	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost
x	$[m]$	výchylka
ζ_0	$[-]$	poměrný útlum
ζ_e	$[-]$	elektromagnetický útlum
η	$[-]$	součinitel naladění
Ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	vlastní frekvence
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	budící frekvence

10 SEZNAM PŘÍLOH

1. Testovací data

Nízké amplitudy

HARVESTER2_N.SLX

Ini_test_nizke.m

Nizke_matlab.m

Nizke_simulink.m

Vysoké frekvence_amplitudy

HARVESTER2_V.SLX

Ini_test_velke.m

matlab_velke.m

simulink_velke.m

2. Reálná data

analytickyR.m

data_head_normalwalk_smilek_02.mat

HARVESTERDATAWALK.SLX

INI_real.m

simulinkR.m

3. Reálná data omezení parametrů

data_head_normalwalk_smilek_02.mat

HARVESTERDATAWALKOMEZ.SLX

simulinkOMEZ.M

4. Ovlivnění budící soustavy

2stupnevolnosti.m

cast4model.SLX